

Министерство образования и науки Украины
Днепропетровский государственный технический университет
«ДГТУ»

В. И. ЛАВРИНЕНКО, В. Ю. СОЛОД

**ИНСТРУМЕНТЫ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ
МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ
АБРАЗИВНОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ**

Монография

Каменское
«ДГТУ»
2016

УДК 621.921
ББК 34.637
Л13

Рецензенты:

С. Е. Шейкин — доктор технических наук
Ф. В. Новиков — доктор технических наук, профессор

Рекомендовано к печати ученым советом Днепродзержинского государственного технического университета, протокол № 2 от 25.02.2016 г.

Лавриненко В. И.

Л13 Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки : монография / В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод. — Каменское : ДГТУ, 2016. — 529 с.

ISBN 978-966-175-143-8

В монографии приведены основные сведения о свойствах, составах и областях применения сверхтвердых абразивных материалов, а также обрабатываемых ними инструментальных и композиционных материалов при абразивной и физико-технической обработке в машиностроении. Поданы современные представления о процессах обработки абразивными инструментами из сверхтвердых материалов (СТМ) и их показатели. Приведены данные о свойствах абразивных СТМ, абразивных композитов, содержащих СТМ, показатели режущего слоя шлифовальных кругов из СТМ, данные о смазочно-охлаждающих технологических средах и их свойствах, качестве поверхности, обрабатываемой инструментами из СТМ. Поданы сведения о процессах механообработки с введением дополнительной энергии в зону обработки, их показатели. Предназначена для научных и инженерно-технических работников, работающих в области создания, производства и применения инструментов из СТМ для обработки инструментальных и композиционных материалов в машиностроении, а также для преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

В монографії наведені основні відомості про властивості, склади та області застосування надтвердих абразивних матеріалів, а також оброблюваних ними інструментальних та композиційних матеріалів при абразивній і фізико-технічній обробці в машинобудуванні. Подані сучасні уявлення про процеси обробки абразивними інструментами з надтвердих матеріалів (НТМ) та їх показники. Наведені дані про властивостях абразивних НТМ, абразивних композитів з НТМ, показники ріжучого шару шліфувальних кругів з НТМ, дані про мастильно-охолоджуючих технологічних середовищах та їх властивостях, якості поверхні, що піддається обробці інструментами з НТМ. Подані відомості по процесам механообробки з введенням додаткової енергії в зону обробки, їх показники. Призначена для наукових і інженерно-технічних робітників, що працюють в області створення, виробництва і застосування інструментів з НТМ для обробки інструментальних та композиційних матеріалів в машинобудуванні, а також для викладачів, аспірантів та студентів вищих навчальних закладів.

ISBN 978-966-175-143-8

**УДК 621.921
ББК 34.637**

© В.И. Лавриненко, В.Ю. Солод, 2016
© ДГТУ, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
Глава 1. СВЕРХТВЕРДЫЕ АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	7
1.1. Сверхтвердые материалы	7
1.2. Шлифовальные порошки из сверхтвердых материалов.....	16
1.3. Зерна шлифпорошков сверхтвердых материалов	25
1.4. Включения в зернах СТМ и их перемещения в результате термообработки.....	37
1.5. Покрyтия зерен СТМ.....	46
Глава 2. АБРАЗИВНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПОРОШКАМИ СТМ	49
2.1. Связки абразивных композитов и их свойства.....	49
2.2. Характеристики и свойства композитов из СТМ.....	70
2.3. Исследование эффекта изменения градиента содержания связующего металлических композитов	82
2.4. Формирование структуры металлических композитов.....	87
2.5. Формирование структуры гальванического рабочего слоя	94
2.6. Абразивсодержащие композиты с опорными элементами в рабочем слое.....	99
Глава 3. ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ ИЗ СТМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ	104
3.1. Формирование рабочего слоя шлифовальных кругов.....	104
3.2. Формирование структуры информационных показателей шлифовальных кругов.....	118
3.3. Формоизменение режущей поверхности шлифовальных кругов из СТМ в процессе обработки.....	137
3.4. Формы и типоразмеры шлифовальных кругов	147
3.5. Специальные круги из СТМ для процессов алмазно-абразивной обработки	148
3.6. Обзор конструкций алмазных отрезных кругов и тенденции их развития	191
Глава 4. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ СТМ	200
4.1. Основные понятия процессов обработки.....	200
4.2. Основные понятия процессов шлифования кругами из СТМ	205

4.3. Положение о критической производительности шлифования	214
4.4. Межэлектродный промежуток при электрошлифовании кругами из СТМ	218
4.5. Расчет плотности общего технологического тока при электрошлифовании кругами из СТМ.....	220
Глава 5. ПРОЦЕССЫ ШЛИФОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	226
5.1. Обработка инструментальных и быстрорежущих сталей.....	226
5.2. Обработка твердых сплавов	238
5.3. Обработка безвольфрамовых твердых сплавов	273
5.4. Обработка инструментальных керамик	280
5.5. Обработка магнитотвердых сплавов	305
Глава 6. ПРОЦЕССЫ ШЛИФОВАНИЯ С ВВЕДЕНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ В ЗОНУ ОБРАБОТКИ ИЛИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА КОНТАКТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ.....	314
6.1. Необходимость и условия введения дополнительной энергии в зону обработки кругами из СТМ.....	314
6.2. Электрохимическое шлифование кругами из СТМ.....	326
6.3. Электроэрозионное (электроконтактное) шлифование кругами из СТМ	346
6.4. Шлифование кругами из СТМ с дополнительным плазменным воздействием на режущую поверхность кругов....	365
6.5. Шлифование литого пористого белого чугуна кругами из СТМ.....	370
Глава 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ.....	376
7.1. Электрические явления в процессах фрикционного контакта.....	376
7.2. Электризация в процессах абразивной обработки кругами из СТМ	390
7.3. Функционирование термоЭДС при шлифовании кругами из СТМ	408
7.4. Учет электрических явлений при шлифовании кругами из СТМ	413

Глава 8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ	417
8.1. Охлаждающая функция технологических сред	417
8.2. Смазывающее действие технологических сред	421
8.3. Смачивающая, проникающая и моющая способность технологических сред.....	426
8.4. Использование поверхностно-активных веществ в технологических средах.....	429
8.5. Использование твердых смазок в технологических средах	433
8.6. Технологические жидкости как средство неярной поляризации	439
Глава 9. КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ	447
9.1. Шероховатость обработанной поверхности и взаимосвязь ее параметров	447
9.2. Влияние характеристики шлифовальных кругов из СТМ на шероховатость обработанной поверхности	454
9.3. Шероховатость поверхности монокристаллов с учетом их кристаллографической ориентации.....	467
9.4. Структурные изменения и напряжения в поверхностном слое обрабатываемых материалов.....	476
9.5. Использование внутренних напряжений для изменения качества поверхностного слоя	482
ЛИТЕРАТУРА.....	487

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сверхтвердые материалы (СТМ) являются современным наукоемким высокотехнологическим продуктом, важным звеном в решении вопросов эффективной механообработки труднообрабатываемых материалов XXI столетия. СТМ имеют ряд уникальных свойств, которые отличают их среди других инструментальных материалов – высокую твердость, прочность при сжатии, трещиностойкость, теплопроводность, химическую стойкость и т.д. Благодаря этим уникальным свойствам СТМ широко применяются в современном машиностроении, как эффективный инструментальный материал. Вместе с тем, дальнейшим повышением эффективности применения таких материалов являются новейшие разработки в области современных инструментов, содержащих СТМ. Поэтому в монографии приведены сведения о составах и свойствах, как самих материалов, так и инструментов, в которых они применяются, а также сведения по процессам обработки с их использованием.

В монографии в главе 1 изложены основные сведения о свойствах, составе и областях применения сверхтвердых абразивных инструментальных материалов. Глава 2 посвящена характеристикам и свойствам абразивных композитов из СТМ, а также особенностям формирования их структуры. В главе 3 представлены сведения о конструкциях стандартных и специальных шлифовальных кругов из СТМ. Глава 4 посвящена основным понятиям и теоретическим аспектам процессов шлифования кругами из СТМ. В главе 5 поданы сведения о процессах шлифования инструментальных и композиционных материалов (твердых сплавов, сталей, керамик и т.п.). Глава 6 посвящена процессам шлифования с введением дополнительной энергии в зону обработки или дополнительным физико-техническим воздействием на контактные поверхности. В главе 7 представлены сведения по исследованию и применению электрических процессов при абразивной обработке. Глава 8 содержит сведения о смазочно-охлаждающих технологических средах применительно к процессам абразивной обработки. В главе 9 помещены сведения о показателях качества обработанной поверхности при абразивной обработке инструментами из СТМ. Авторы надеются, что данная монография найдет достаточно широкий круг пользователей среди специалистов и поможет им в учебной, научной и практической деятельности.

Авторы

ГЛАВА 1

СВЕРХТВЕРДЫЕ АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1.1. Сверхтвердые материалы

Термины и определения

К этому классу относятся главным образом материалы с ковалентными направленными связями и с микротвердостью более высокой, чем микротвердость природного корунда (или более 20,0 ГПа) [1].

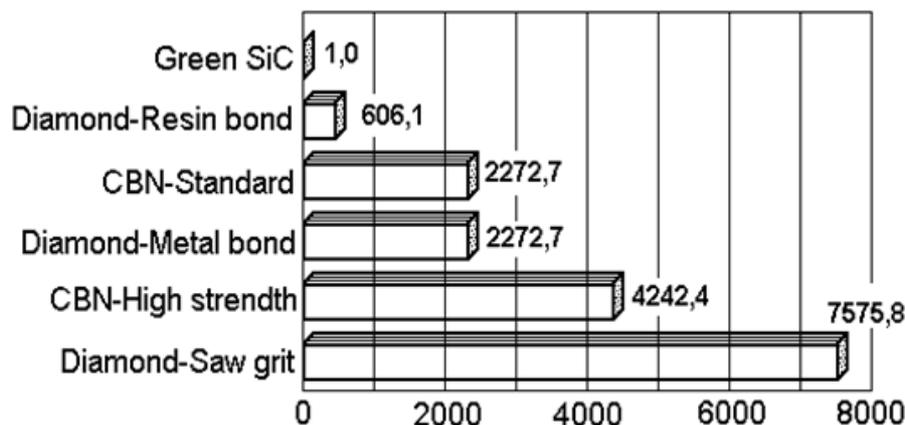
На первом Международном совещании по сверхтвердым материалам во Франции [2] было предложено относить к сверхтвердым материалы, имеющие твердость выше 40 ГПа, а к ультратвердым – выше 70–80 ГПа.

Авторам [3] такое разделение представляется не вполне обоснованным, так как при таком подходе из разряда сверхтвердых выпадает ряд поликристаллических композиционных материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора, например, амборит или киборит, которые традиционно относят к сверхтвердым материалам. Поэтому, авторы [3] предложили относить к сверхтвердым материалы с твердостью 20–120 ГПа, т.е. твердость которых выше твердости природного корунда и может достигать твердости грани (111) монокристаллов природного алмаза типа Па. Этому определению соответствуют такие материалы как алмаз, кубический нитрид бора (сBN), карбонитрид бора (BC_2N), борид магния-алюминия ($AlMgB_{14}$), карбоборид алюминия ($AlB_{40}C_4$), ромбический γ - B_{28} и др. [3].

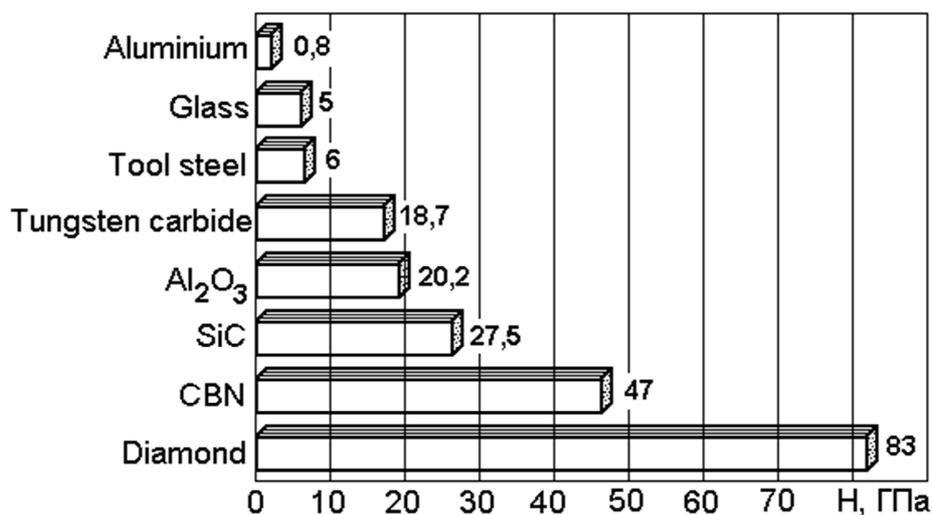
Обратим внимание на то, что теоретическая (предельная) твердость алмазов не должна превышать 210 ГПа [4].

Сравнительные характеристики и свойства сверхтвердых материалов

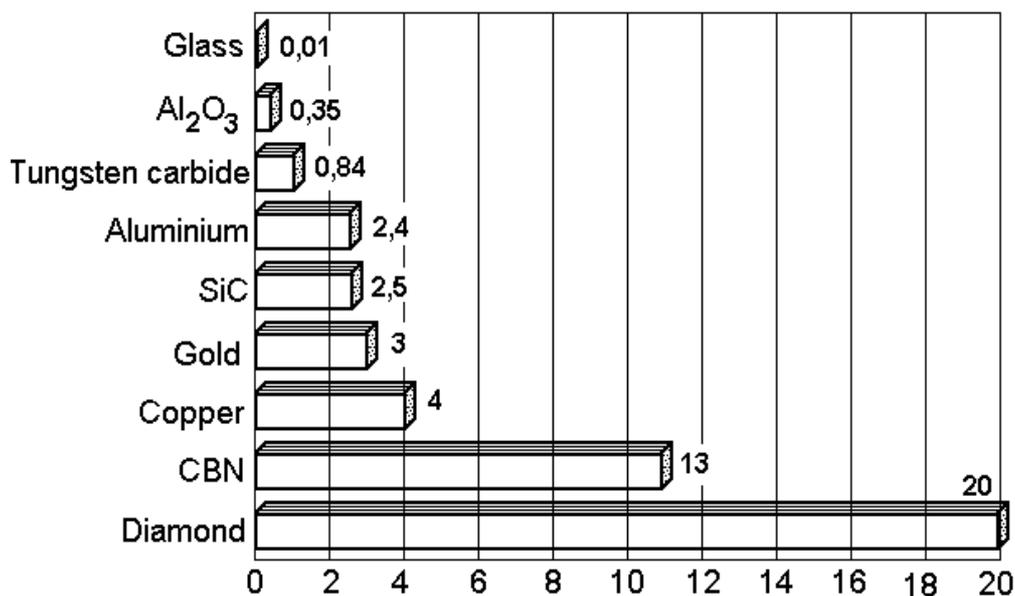
Сравнительная стоимость зерен абразивных материалов, в т.ч. сверхтвердых при одинаковой массе материала по данным [5]:



По данным работы [5] твердость материалов, в т.ч. сверхтвердых, составляет:



Сравнительная (в относительных единицах) теплопроводность материалов, в т.ч. сверхтвердых, по данным работы [5] составляет:



Алмаз

Алмаз – кристаллический материал, являющийся полиморфной модификацией углерода кубической сингонии [6]. Это атомарная трехмерная кристаллическая структура углерода, характеризующаяся тетраэдрическим расположением атомов углерода в решетке, связанных ковалентными связями. Алмаз наиболее твердый природный углеродный материал. Искусственный алмаз может быть синтезирован из графита при созданном

уровне температур (1700–1800 °С) в реакционной ячейке, находящейся под давлением 6–8 ГПа [7].

Свойства (монокристалл): плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 - 3,52$ [8]; твердость, по Виккерсу, ГПа – 80 [9], 115 [10]; твердость по Кнуппу, ГПа – 57–104 [8], 63 [10]; модуль упругости, ГПа – 1141 [8, 10], 1200 [9]; модуль сдвига, ГПа – 553; объемный модуль, ГПа – 442 [8]; коэффициент Пуассона, $\nu - 0,07$ [8], 0,1 [9]; доля пластической деформации в общей упруго-пластической деформации, $\delta_n - 0,161$ [9]; трещиностойкость, $\text{МПа}\cdot\text{м}^{0,5} - 3,4$ [8], 5 [10]; теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}) - 500\text{--}2000$ [8], 680–2400 (для природных) [11]; КЛТР, $\cdot 10^{-6} - 1,18$ [12]. Для кристаллов алмаза без видимых включений прочность на сжатие составляет 17,5 ГПа (теоретическая прочность составляет не менее 112 ГПа) [13]. Горение алмаза на воздухе происходит при 800–900 °С. Для графитизации с ощутимой скоростью необходима температура в 1500–1600 °С. Пластическая деформация в алмазе происходит при температурах свыше 1600 °С [14].

Из-за наличия определенного количества примесей алмаз может быть диэлектриком (беспримесный), полупроводником и сверхпроводником [7]. Электросопротивление алмазов зависит от системы, в которой их синтезировали. Алмазы, полученные в системе Zn–C, изоляторы, и имеют электросопротивление – $6\cdot 10^{13}$ Ом. Наименьшее электросопротивление наблюдается в кристаллах, полученных в присутствии сплавов, богатых магнием ($3\cdot 10^4$ Ом) [15]. Исследования монокристаллов размером от 260 до 815 мкм, синтезированных в системе на основе магния, показали, что при комнатной температуре они имели электросопротивление от $2,6\cdot 10^2$ до $2\cdot 10^6$ Ом [16].

Сравнение теплопроводности монокристаллов природного и синтетического алмазов приведено в работе [11]. Природные алмазы типа Ia при 100 °С имеют теплопроводность – 730–770 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а при 280 °С – 520 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Синтетические алмазы – при 40 °С имеют теплопроводность – 520–660 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а при 280 °С – 400 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [11]. Энтальпия и теплоемкость природных и синтетических алмазов при 350 К соответственно: природный алмаз – 75,75 кДж/кг и 0,706 кДж/(кг·К), баллас – 81,38 кДж/кг и 0,713 кДж/(кг·К), САМ – 79,79 кДж/кг и 0,740 кДж/(кг·К) [17].

Для алмаза характерной является анизотропия твердости, которая обуславливает разную износостойкость и шлифуемость алмазов в зависимости от кристаллографического направления. Алмаз труднее обрабатывается по грани октаэдра, легче – по грани ромбододекаэдра, а наилучше – по грани куба [18].

Алмазы динамического синтеза – существенно отличаются от природных и синтезированных в камерах высокого давления своей структурой, формой зерен, фазовым составом, физико–механическими и эксплуа-

тационными свойствами. Фазовый состав алмазов, полученных при ударном нагружении чугунов, характеризуется наличием, кроме кубической, еще и гексагональной модификацией (лонсдейлита), содержание которой может достигать 50 %. Алмазы, синтезированные в чугуне, содержат те же включения, что и исходный графит. Форма зерен алмазов изменяется от игольчатой, пластинчатой до изометрической. Поверхность зерен очень развитая. Максимальный размер зерен достигает 100 мкм. Удельная поверхность неклассифицированного алмазного порошка составляет $10,4 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$. По прочности взрывные алмазы соответствуют марке АС4, а по абразивной способности близки к микропорошкам АСН [19].

Обратим внимание на то, что лонсдейлит – гексагональный алмаз, кристаллический материал, представляющий собой полиморфную модификацию углерода, и имеющий вюрцитоподобную структуру. Лонсдейлит в чистом состоянии не встречается. Он бывает в сочетании с кубическим алмазом (в метеоритных, взрывных, ударных алмазах). Алмаз (кубический) и лонсдейлит (гексагональный алмаз) являются полиморфными алмазными структурами [6]. Характеристики алмаза и лонсдейлита, соответственно [1]: плотность, ρ , г/см³ – 3,53 и 3,52, параметры элементарных ячеек: a , нм – 0,357 и 0,252, c , нм – 0,357 и 0,412. При этом, лонсдейлит имеет существенно (до 4 раз) меньшую термостабильность по сравнению с алмазом [20].

Субструктура алмазов, синтезированных динамическим методом, в значительной степени зависит от давления, температуры, продолжительности ударного импульса и скорости охлаждения шихты. Возникающий при этом высокоразвитый микрорельеф поверхности и особенности структуры определяют абразивную способность микропорошков. Так, в работе [21] изучена абразивная способность природных алмазов с лонсдейлитовой фазой ударного происхождения ($A_{\text{л}}$) и природных алмазов (A), полученных путем дробления борта, проведено сравнение ее с абразивной способностью алмазов, синтезированных статическим (АСМ, АСН) и динамическим (АВ) методами. Используемые при экспериментах природные алмазы с лонсдейлитовой фазой представляют собой сплюснутые зерна с острыми кромками. Абразивная способность алмазов определялась по стандартной методике [1] и выражалась количеством сошлифованного корунда (мг) за 60 мин (табл. 1.1).

Из табл. 1.1 видно, что в порядке возрастания абразивной способности алмазы образуют следующий ряд: A –АСМ–АВ–АСН– $A_{\text{л}}$. Обращает внимание то, что светлоокрашенные лонсдейлитовые алмазы характеризуются повышенной абразивной способностью. Рентгеновский фазовый анализ показал, что в светлых алмазах содержится до 15 % лонсдейлита, а в темных – до 45 %. Кроме того, в зернах содержатся примеси тонкодис-

персного графита, который равномерно рассеян в алмазной матрице или образует в ней тончайшие прослойки. В светлых алмазах графит содержится в малом количестве, а в темных его количество как минимум составляет 4 % и с другими примесями достигает 10–12 %. Установлено [21], что абразивная способность природных алмазов с лонсдейлитовой фазой $A_{л}$ зернистостью 60/40 на всех стадиях шлифования корунда выше, чем у порошков АСМ той же зернистости, что связано с увеличением удельной поверхности порошка в результате раскалывания зерен алмаза. Важно также отметить, что зерна АСМ, АСН и А – осколки монокристаллов, а зерна $A_{л}$ и АВ – в основном поликристаллические агрегаты, состоящие из частичек субмикронных размеров (АВ) и сильно ориентированных параллельных пластинок ($A_{л}$), в которых часто встречаются волокнистые и игольчатые кристаллы [22]. Поэтому удельная поверхность алмазов с лонсдейлитовой фазой значительно больше удельной поверхности статических алмазов, что, очевидно, способствует возрастанию абразивной способности.

Таблица 1.1. Абразивная способность (мг) алмазов, полученных в динамических и статических условиях

Зернистость алмазов	$A_{л}$	АВ [22]	А	АСМ	АСН
14/10	47	–	30	35	41
20/14	62/55	40	36	38	46
28/20	92/68	41	37	41	47
40/28	99/59	46	38	41	49
60/40	92/59	–	–	40	53

Примечание: для алмазов $A_{л}$ в числителе указана абразивная способность светлых зерен, в знаменателе – темных.

Наноалмазы – (ультрадисперсные или кластерные алмазы), получаемые при детонации взрывных веществ с отрицательным кислородным балансом, особый тип алмазного материала, свойства которого в значительной степени определяются состоянием его поверхности. Частичка наноалмазов имеет сложное строение. В центре частички есть ядро, в котором атомы углерода в состоянии sp^3 -гибридизации находятся в узлах кристаллической решетки алмаза с межплоскостным расстоянием 2,06 Å. Алмазное ядро окружено оболочкой из переходных рентгеноаморфных структур углерода, в которой есть фрагменты деформированной алмазной структуры, луковичного углерода, графита, аморфного углерода и другие кластеры. Таким образом, частички наноалмаза не являются чисто углеродным материалом и, к тому же, сам углерод находится в них одновременно в нескольких модификациях, и только одна из которых соответствует структуре алмаза. Функциональные группы, в которые входят кислород, азот и др.,

являются неотъемлемой частью частичек наноалмаза. Так, алмазная частичка размером около 4 нм состоит приблизительно из $12 \cdot 10^3$ атомов углерода, из них около $3 \cdot 10^3$ являются поверхностными, и содержат функциональные группы и включения. Состав наноалмазов, масс. % – углерод (78), азот (2,6), водород (0,8), кислород + несгораемый остаток (18,6) [23].

Детонационные наноалмазы (ДНА) имеют относительно большую удельную поверхность (300–400 м²/г) и их ключевое отличие от других алмазов состоит в способности содержать на поверхности большое количество разных функциональных групп. Очищенные твердые ДНА представляют собой кластерный углеродный алмазосодержащий материал, состоящий из агрегатов частичек округлой или неправильной формы со средним размером частичек не более 10 нм. Каждая частичка, входящая в состав кластера (первичный агрегат ДНА) представляет собой сложное структурное образование, состоящее из [24]:

- ядра из углеродных атомов (sp^3 -гибридизованных), связанных в кубическую кристаллическую структуру, характерную для алмаза, которая охватывает 70–90 % углеродных атомов и имеет размеры 40–60 Å;

- углеродной оболочки вокруг ядра из переходных рентгеноаморфных структур углерода толщиной 4–10 Å, в которую может входить 10–30 % углеродных атомов;

- поверхностного слоя, содержащего кроме углеродных атомов и другие гетероатомы, причем количество последних (N, H, O) может достигать 10 % от общей массы частички.

Однако, частички ДНА более правильно представлять не маленьким кристаллом ДНА с дефектной поверхностью, а объемным, жестко структурированным «полимером», внутренний каркас которого создается насыщенными связями углерода, а поверхность – высокомолекулярными группировками [23].

Кубический нитрид бора (BN_{сф})

Кубический нитрид бора – искусственный абразивный материал на основе нитрида бора, содержащий не менее 90 % нитрида бора кристаллической структуры β-BN. Его получают из нитрида бора гексагональной структуры α-BN. Синтез кубического нитрида бора (КНБ) осуществляют, подобно алмазу, при высоких температурах (свыше 1600 °С) и давлениях (свыше 8 ГПа) [25]. Кубический нитрид бора (β-BN) впервые получен Венторфом [26] путем нагревания гексагонального нитрида бора (α-BN) до температуры 1500 °С при давлении 5,5 ГПа в присутствии металлического лития и других катализаторов. Торговые марки – эльбор (Россия), кубонит (Украина), белбор (Беларусь), боразон (США), CBN – Япония, Китай [10].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 3,44–3,49 [13, 27], 3,45–3,47 [28]; твердость, *HV*, ГПа – 73,7±1,4 [29], 76 [10], 90 [28], 90–92,5 [13], 92,5 [27]; модуль упругости, ГПа – 710 [30], 712 [31], 720 [27, 28, 32], 752±6 [29], 980 [10]; коэффициент Пуассона, ν – 0,098 [30]; модуль объемного деформирования, ГПа – 330 [31]; предел прочности при сжатии, ГПа – 0,5 [28], 1,5 [27]; предел прочности при изгибе, МПа – 550–650 [31], 1100 [30]; трещиностойкость, МПа·м^{0,5} – 4,5 [10]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 41,9; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 0,670 [28, 32]; КЛТР, 10⁻⁶ град⁻¹ – 2,5–4,7 [28, 32], 3,4 [13], 4,7 [30], 6 [31]; теплостойкость, °С – 1300–1500 [28], 1400–1500 [32].

Процесс обратного перехода кубического нитрида бора (BN_{CF}) в графитоподобный (BN_T) состоит из двух стадий: низкотемпературной (до 1400–1500 °С), где имеет место перестройка решетки на поверхности агрегатной частички и на внутренних границах, и высокотемпературной (выше 1400 °С) [33].

Эльбор – синтетический абразивный материал, содержащий не менее 90 % кубического нитрида бора. Содержание поликристаллических агрегатов зернистого строения составляет в материале около 80 %. Имеет высокую термическую и химическую стойкость. Отсутствие химического сродства эльбора со сталями, в отличие от алмаза, определило именно эту область его эффективного применения. Кристаллы эльбора представлены преимущественно комбинацией положительного и отрицательного тетраэдров. Монокристаллический эльбор (марки – ЛП) для абразивных целей получают кристаллизацией из флюида в условиях высоких температур и давлений из составов системы Mg–B–N. Строение кристаллов – мозаичное, блочное и иногда секториально-мозаичное. В связи с этим грани кристаллов имеют развитый микрорельеф. Эльбор обычный (марка – ЛО) для изготовления абразивного инструмента получают при более высоких давлениях и температурах из составов системы Mg–B–N в виде мелкокристаллического блока, имеющего наряду с кристаллами кубического нитрида бора (размером до 0,2 мкм) до 30 % побочных продуктов синтеза [34].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 3,45–3,47; твердость, *HV*, ГПа – 90; модуль упругости, ГПа – 720; предел прочности на сжатие, ГПа – 0,5; теплопроводность, Вт/(м·К) – 41,87; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 0,670; КЛТР, 10⁻⁶ град⁻¹ – 2,5–4,7; теплостойкость, °С – 1300–1500 [34].

Гексанит-А (BN_B) – поликристаллический абразивный сверхтвердый материал на основе плотных модификаций нитрида бора (BN_B, BN_{CF}), твердость которого 60–80 ГПа [35]. Структура – преимущественно вюртцитная [36].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 3,28–3,40 [36], 3,33–3,38 [37]; твердость, *HV*, ГПа – 40–60 [36], 55–80 [37]; модуль упругости, ГПа – 720; пре-

дел прочности при сжатии, ГПа – 3–5; предел прочности при изгибе, МПа – 1,2–1,5 [37]; теплостойкость, °С – 900 [36], 1100 [37].

Вюртцитный нитрид бора ($\text{BN}_\text{В}$) является фазой при высоком давлении, которая термодинамично нестойка при нормальных давлениях и температурах. Тем не менее, как метастабильная фаза он долговременно существует в таких условиях как в виде порошка, так и в компактных поликристаллах. Это связано с кинетическим фактором, обусловленным значительной величиной энергетических барьеров элементарных актов фазового перехода вюртцитного нитрида бора в графитоподобный ($\text{BN}_\text{Г}$), в первую очередь актов зародышеобразования, а в случае мартенситной перестройки и продвижения когерентной границы раздела. Превращение $\text{BN}_\text{В} \rightarrow \text{BN}_\text{Г}$ происходит при нормальных давлениях, начиная с 600 °С. Образовавшиеся $\text{BN}_\text{Г}$ -частицы преимущественно являются поликристаллическими и характеризуются микропластинчатой субструктурой [38].

Зернистые компакты микропорошков сверхтвердых материалов

Одним из путей получения композиционных материалов на основе алмаза является сращивание отдельных химически активированных алмазных зерен углеродом, осажденным из газовой фазы в слое алмазного порошка [39]. Зарастивание пор между отдельными алмазными частицами можно условно рассматривать как способ получения композитов алмаза при низких давлениях. Основой направленного синтеза композитов является диффузионная кинетика осаждения углерода в пористом теле. Исследования [39] показали, что в ходе процесса синтеза углеродной связки наблюдается закономерное изменение пористости исходных заготовок, что указывает на постепенное заполнение углеродной связкой имеющихся пор. Таким образом происходит постепенное сращивание исходных алмазных зерен микропорошка в алмазный композит зернистостями от 40/28 до 2500/2000.

Основой синтезированных при давлениях ниже атмосферного новых композиционных материалов из СТМ, структурированных углеродной связкой, являются [40]: микропорошки КНБ (КМ 3/2, КМ 0,5/0), микропорошки синтетического алмаза (АСМ 60/40, АСМ 14/10, АСМ 2/1, АСМ 1/0) и наноразмерные алмазы детонационного синтеза. Образование углеродной структурированной матрицы обеспечивается газовой составляющей – углеродсодержащими газами: метаном (CH_4), природным газом (CH_4 – 95 %), смесью метана и тетрахлорэтана ($\text{CH}_4 + \text{CCl}_4$). Основными параметрами, характеризующими процесс физико-химического синтеза, являются: температура (до 1723 К), давление (до $5,1 \cdot 10^4$ Па) и расход углеродсодержащего газа (до $4,7 \cdot 10^{-4}$ м³/с) в реакторе. Холодное прессование брикетов осуществляется в пресс-формах при давлении 10–15 МПа. После синтеза

из компактов разных форм и размеров получают порошки на соответствующем дробильно-классификационном оборудовании и вибростолах [40].

Обратим внимание на то, что при производстве абразивных порошков и поликристаллов сверхтвердых материалов зернистость кристаллических шлифпорошков из КНБ (кубонита, эльбора) ограничена (50/40–200/160) по технологическим возможностям их изготовления, что сдерживает интенсификацию процессов металлообработки. Поэтому разработки в направлении изготовления шлифпорошков КНБ большей зернистости в виде зернистых компактов из микропорошков КНБ являются актуальными.

В тоже время производство абразивных порошков и поликристаллов сверхтвердых материалов сопровождается накоплением большого количества малоходовых порошков, преимущественно мелкодисперсных микропорошков КНБ зернистостей 3/2, 3/1, 2/1, 1/0, 0,5/0. Только небольшой объем этих микропорошков используется при изготовлении шлифовально-полировальных смесей (паст, суспензий) [41]. Укажем, что зернистость кристаллических шлифпорошков из КНБ (кубонита, эльбора) ограничена (50/40–200/160) по технологическим возможностям их изготовления, что во многих случаях не позволяет решать актуальные задачи металлообработки. Поэтому разработки в направлении изготовления шлифпорошков КНБ большей зернистости в виде зернистых компактов из микропорошков КНБ являются также актуальными. Для этого разработан указанный выше физико-химический синтез изготовления композиционных компактов, на основе микропорошков кубонита с размером зерен менее 3 мкм, и получения прочного углеродного связующего зерен КНБ в условиях поликонденсации и диффузионной кинетики при высокой температуре (~1250 °С) в реакторе и давлении метана ниже атмосферного при наличии молибденового катализатора. Показано [41], что для получения компактов и шлифпорошков с максимальной плотностью и прочностью зерен при снижении зернистости исходных микропорошков 3/2, 3/1, 2/1, 1/0, 0,5/0 увеличивается расход CH_4 ($3,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с} \rightarrow 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$), снижаются давление ($2,5 \cdot 10^4 \text{ Па} \rightarrow 2,2 \cdot 10^4 \text{ Па}$) и температура ($1250 \text{ °С} \rightarrow 1100 \text{ °С}$). Это позволило получать компакты шлифпорошков КНБ разных зернистостей, прочностные характеристики которых приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Характеристики компактов из микропорошков КНБ [41]

Исходные микропорошки	Прочность компактов, Н, по зернистости			Выход годных порошков, %
	400/315	250/200	125/100	
КМ 3/2	7,5	4,9	3,0	92
КМ 3/1	7,1	4,8	2,9	90
КМ 2/1	6,3	4,5	2,8	89
КМ 1/0	6,0	4,1	2,5	87

Сверхтвердый материал «Фуллерит».

Авторами [42] разработан новый метод синтеза сверхтвердого материала под названием «Фуллерит». Фуллерит – молекулярный кристаллический материал, в узлах кристаллической решетки которого находятся молекулы фуллерена C_{60} , молекулы сферической формы, состоящие из 60 атомов углерода. Одним из факторов, который препятствует широкому внедрению фуллерита, является сложность его синтеза. Формирование трехмерной структуры этого материала начинается при давлении в 13 ГПа. Ученым [42] удалось в несколько раз снизить значения параметров инициации реакции синтеза фуллерита путем простой добавки дисульфида углерода (CS_2) к смеси начальных реактивов. Оказалось, что такая добавка не только снижает необходимый уровень давления до значения в 8 ГПа, но и значительно ускоряет ход синтеза фуллерита.

Фуллерены – молекулярная форма углерода в виде больших замкнутых молекул, например, полого кластера, состоящего из 60 атомов углерода. Молекула C_{60} имеет геометрию икосаэдра – футбольного мяча. На нынешнее время получены не только молекулы C_{60} , но известны работы о выделении в индивидуальное состояние фуллеренов с 70, 76, 78, 82, 84, 90, 96, 102, 106, 110 и более атомами углерода. Структурные исследования выявили, что молекула C_{60} состоит из комбинаций 12 пентагонов и 20 гексагонов. Термин «фуллерен» – имеет свое происхождение от имени американского архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера, который в 1985 году применил подобные структуры при конструировании куполов строений [43].

Фуллериты – тетраэдрические структуры молекулярной формы (фуллерена) углерода [43]. В работе [44] кристаллическая структура фуллерита C_{60} (фуллерен C_{60} в конденсированном состоянии) характеризуется ГЦК-решеткой с постоянной решетки $a = 14,18 \text{ \AA}$.

1.2. Шлифовальные порошки из сверхтвердых материалов

Алмазные порошки – алмазные зерна после их выделения из продуктов синтеза, представляющие собой отдельные кристаллы, сростки и обломки кристаллов. Для получения однородных по составу алмазных порошков указанное сырье подвергают механическому, ультразвуковому или взрывному дроблению с последующей классификацией зерен по размерам.

Алмазный порошок – совокупность кристаллов и поликристаллов алмаза размером не более чем 3000 мкм [6].

Алмазный микропорошок – алмазный порошок, в котором размеры зерен основной фракции не более чем 60 мкм [6].

Алмазный субмикропорошок – алмазный микропорошок, в котором размеры зерен основной фракции менее чем 1 мкм [6].

Алмазный шлифпорошок – алмазный порошок, зерна основной фракции которого задерживаются на ситах с размером стороны ячейки не менее чем 40 мкм [6]. Алмазные шлифпорошки выпускают зернистостью от 2500/2000 до 50/40. Основной характеристикой, разграничивающих марки шлифпорошков, является их прочность при статическом сжатии зерен. Обозначение марок алмазных шлифпорошков состоит из буквенных и цифровых индексов. Буквами АС обозначаются порошки из синтетических монокристаллических алмазов. АР – из синтетических поликристаллов. При этом к индексу АР добавляется буква, обозначающая тип исходного поликристаллического алмаза: В – баллас, К – карбонадо, С – спеченный. К буквенным обозначениям добавляется цифровой индекс, характеризующий для шлифпорошков АС среднее арифметическое значение показателей прочности на сжатие всех зернистостей данной марки в Ньютонах, а в шлифпорошках АР – в сотых долях Ньютона. Если порошок дополнительно сортирован по какому-то отличительному свойству, то после цифрового индекса добавляется соответствующий индекс буквой: Т – термостойкие (термостойкие), Н – немагнитные, неэлектропроводные, А – повышенной адсорбционной активности и др. Например, АС125Т 400/315 – шлифпорошок синтетического алмаза марки 125, термостойкий, зернистостью 400/315 мкм [10].

АС2 – марка синтетических алмазов повышенной хрупкости, имеющая прочность (разрушающая нагрузка) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах $2 H$, и зерна которых преимущественно представлены агрегатами с развитой поверхностью. По данным [45] порошки зерен АС2 100/80 имеют: прочность зерен при одноосном сжатии, $H - 2,4$; удельную поверхность порошка, $\text{см}^2/\text{г}$ – 194; количество зерен в карате, шт. – $125 \cdot 10^3$. Коэффициент их теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) - 146$ [46].

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС2 по ДСТУ 3292-95:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125
1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	2,2

АС4 – марка синтетических алмазов, которая имеет прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах $4 H$, и зерна которых преимущественно представлены агрегатами и сростками. По данным [45] порошки зерен АС4 100/80 имеют: прочность зерен при одноосном сжатии, $H - 4,26$; удельную поверхность порошка, $\text{см}^2/\text{г}$ – 140; количество зерен в карате, шт. – $121 \cdot 10^3$.

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС4 по ДСТУ 3292-95:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160
2,5	2,6	2,9	3,6	4,1	5,0	6,0

АС6 – марка синтетических алмазов, которая имеет прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах $6 H$, и зерна которых представлены отдельными кристаллами, а также агрегатами и сростками. По данным [45] порошки зерен АС6 100/80 имеют: прочность зерен при одноосном сжатии, $H - 6,17$; удельную поверхность порошка, $\text{см}^2/\text{ст} - 95$; количество зерен в карате, шт. – $90 \cdot 10^3$.

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС6 по ДСТУ 3292-95:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
3,8	4,1	4,4	4,9	5,8	6,8	8,0	9,2

АС15 – марка синтетических алмазов, которая имеет прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах $15 H$, и зерна которых представлены кристаллами удлиненной формы (не менее за 40 %), а также агрегатами и сростками с обломками кристаллов [1].

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС15 по ДСТУ 3292-95:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
6,0	7,0	8,0	9,0	11,0	13,0	15,0	17,0

315/250	400/315	500/400	630/500
20,0	25,0	29,0	32,0

АС20 – марка синтетических алмазов, которая имеет прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах $20 H$, и зерна которых представлены кристаллами удлиненной формы (не менее 60%), а также агрегатами и сростками с обломками кристаллов [1].

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС20 по ДСТУ 3292–95:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
9,0	10,0	12,0	13,0	15,0	17,0	20,0	23,0

315/250	400/315	500/400	630/500
27,0	33,0	39,0	46,0

АС32 – марка синтетических алмазов, которая имеет прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах $32 H$, и зерна которых преимущественно представлены изометричными кристаллами, а также обломками кристаллов, сростков и агрегатов – не более 15 % [1]. Окисление АС32 500/400 происходит при $760 \text{ }^\circ\text{C}$ [47].

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС32 по ДСТУ 3292–95:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
14,0	16,0	18,0	21,0	25,0	30,0	36,0	40,0

315/250	400/315	500/400	630/500
47,0	57,0	67,0	82,0

АС50 – марка синтетических алмазов, которая имеет прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах 50 H , и зерна которых преимущественно представлены изометричными кристаллами, причем около 20 % из них – совершенные кристаллы, а содержание обломков, сростков и агрегатов – не более 12 % [1]. Окисление АС50 500/400 происходит при 750 °С [47].

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС50 по ДСТУ 3292–95:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
20,0	22,0	25,0	29,0	35,0	41,0	50,0	58,0

315/250	400/315	500/400	630/500
70,0	78,0	91,0	113,0

АС65 – марка синтетических алмазов, которая имеет прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах 65 H , и зерна которых преимущественно представлены изометричными кристаллами, причем около 30 % из них – совершенные кристаллы, а содержание обломков, сростков и агрегатов – не более чем 10 % [1].

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС65 по ДСТУ 3292–95:

63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
29,0	33,0	37,0	45,0	54,0	65,0	75,0

315/250	400/315	500/400	630/500
90,0	102,0	118,0	146,0

АС80 – марка синтетических алмазов, которая имеет прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах 80 H , и зерна которых преимущественно представлены изометрическими кристаллами, причем не меньше чем 45 % из них – совершенные кристаллы, наличия агрегатов не допускается, а содержание обломков и сростков – не более 10 % [1].

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС80 по ДСТУ 3292–95:

100/80	125/100	160/125	200/160	250/200	315/250	400/315	500/400	630/500
46	55	67	79	90	102	125	146	180

АС100 – марка синтетических алмазов, которая имеет прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах 100 H , и зерна которых преимущественно представлены совершенными кристаллами, причем не менее 55 %, а оставшееся кристаллы с незначительными дефектами, и допустимое содержание сростков – не более 6 % [1].

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС100 по ДСТУ 3292–95:

100/80	125/100	160/125	200/160	250/200	315/250	400/315	500/400	630/500
58	69	83	99	113	129	156	188	225

АС125 – марка синтетических алмазов, имеющая прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах 125 H , и зерна которых преимущественно представлены совершенными кристаллами, причем не менее 70 %, а остальное кристаллы с незначительными дефектами, и допустимое содержание сростков – не более 4 % [1].

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС125 по ДСТУ 3292–95:

125/100	160/125	200/160	250/200	315/250	400/315	500/400	630/500
86,0	104,0	123,0	141,0	161,0	195,0	226,0	282,0

АС160 – марка синтетических алмазов, имеющая прочность (разрушающую нагрузку) зерен шлифпорошка средней зернистости в пределах 160 H , и зерна которых преимущественно представлены совершенными, хорошо ограненными кристаллами кубо- и октаэдрического габитуса (около 85 %), а остальное кристаллы с незначительными дефектами и сростки практически отсутствуют [1]. Применение – камнеобрабатывающий и правящий инструмент.

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков АС160 по ДСТУ 3292–95:

125/100	160/125	200/160	250/200	315/250	400/315	500/400	630/500
113,0	132,0	158,0	180,0	205,0	249,0	282,0	360,0

АС200–АС400 – высокопрочные шлифпорошки. Развитие технологии синтеза и одновременное усовершенствование процессов сортирования создали возможность изготовления особенно прочных алмазов в виде порошков, которые не вошли в перечень марок стандарта ДСТУ 3292-95 и отвечают ТУ 88.090.029–98 «Шлифпорошки из синтетических алмазов марок АС200, АС250, АС300, АС400». Эти порошки применяют: в алмазно-абразивном инструменте на металлических связках, в инструментах для правки, обработки камня, стройматериалов, горных пород. Показатели их прочности при статическом сжатии приведены в таблице [10]:

Зернистость	Показатель прочности, H , не менее, для марок				
	АС200	АС250	АС300	АС350	АС400
125/100	141	177	220	275	345
160/125	165	206	258	322	403
200/160	200	250	310	386	482
250/200	225	280	350	440	550
315/250	256	320	400	500	625
400/315	311	390	486	607	760
500/400	355	444	555	690	867
630/500	450	560	700	880	1100
800/630	525	656	820	1025	1280

АСТ – алмаз синтетический термостойкий предназначенный для оснастки камнеобрабатывающего и бурового инструмента. Выпускается в виде монокристаллических порошков зернистостями от 100/80 до 630/500 [10], 200/160 до 630/500 [48]. Марки алмазов от АС50 до АС160 [10], АС50Т до АС170Т [48]. Зерна АСТ отличаются высокой химической чистотой (среднее содержание включений 0,4 масс. %) и изометрической формой [48].

ГА – поликристаллический абразивный сверхтвердый материал на основе плотных модификаций нитрида бора.

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков ГА зернистостью [49]:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
0,27	0,32	0,39	0,54	0,70	0,95	1,30	1,40

315/250	400/315	500/400	630/500	800/630	1000/800
3,10	4,70	6,80	10,90	15,00	18,00

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков ГА зернистостью [35]:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
0,29	0,36	0,45	0,66	0,83	1,10	1,49	2,00

315/250	400/315	500/400	630/500	800/630	1000/800
2,60	4,10	5,20	7,50	9,60	12,10

КО – кубический нитрид бора торговой марки кубонит пониженной прочности, соответствует марке кубонита К1 согласно ТУУ 26.8-05417377-170-2007.

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков КО зернистостью [10]:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160
2,0	2,0	2,0	2,3	2,6	2,8	3,0

КР – кубический нитрид бора торговой марки кубонит средней прочности, что соответствует марке кубонита К3 согласно ТУУ 26.8-05417377-170-2007.

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков КР зернистостью [10]:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
2,6	2,9	3,3	3,8	4,4	5,2	6,2	–

КВ – кубический нитрид бора торговой марки кубонит высокой прочности, соответствует марке кубонита К4 согласно ТУУ 26.8-05417377-170-2007.

Разрушающая нагрузка (H) для шлифпорошков КВ зернистостью [10]:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
3,6	4,1	4,6	5,3	6,2	7,3	8,7	10,5

КТ – высокопрочный кубический нитрид бора (кибор), что соответствует марке кубонита К6 согласно ТУУ 26.8-05417377-170-2007. Кристаллы содержат меньшее в сравнении с обычным КНБ количество добавок и более изометричны по кристаллографическому строению [50]. Структура – кубическая. Свойства – плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 3,4; твердость, *HV*, ГПа – 90; теплостойкость, °С – 1200 [36].

Разрушающая нагрузка (*H*) для шлифпорошков КТ зернистостью [35]:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
–	–	–	7,0	11,2	14,8	16,0	18,0

Теплоемкость (Дж/(кг·К)) кибора в интервале температур 300–900 К [51, 52]:

300	350	400	500	600	700	800	900
662	863	1022	1269	1416	1529	1608	1692

Кристаллы кибора марки КТ светло-желтого цвета с размером до 250 мкм имеют теплопроводность при 298 К достигающую 572 Вт/(м·К) [53].

ЛО – кубический нитрид бора торговой марки эльбор пониженной прочности.

Разрушающая нагрузка (*H*) для шлифпорошков ЛО зернистостью [35]:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
–	–	1,8	2,0	2,1	2,3	2,3	–

ЛП – кубический нитрид бора торговой марки эльбор средней прочности.

Разрушающая нагрузка (*H*) для шлифпорошков КР зернистостью [35]:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
–	2,4	2,8	3,1	3,7	4,3	5,1	6,1

Зернистость порошков сверхтвердых материалов – определяется размером зерен материала и зерновым составом по разным стандартам [54]:

<i>FIPA-Standard</i>		Стандарт <i>ISO</i> , мкм	Стандарт США, <i>mesh</i>	ГОСТ 9206–80, мкм
Алмаз <i>Diamond</i>	КНБ <i>Bornitrid</i>			
1	2	3	4	5
<i>D1181</i>	–	1180/1000	16/18	1250/1000
<i>D1001</i>	–	1000/850	18/20	1000/800
<i>D 851</i>	–	850/710	20/25	800/630
<i>D 711</i>	–	710/600	25/30	
<i>D 601</i>	–	600/500	30/35	630/500
<i>D 501</i>	–	500/425	35/40	500/400
<i>D 426</i>	–	425/355	40/45	400/315

1	2	3	4	5
<i>D</i> 356	–	355/300	45/50	315/250
<i>D</i> 301	<i>B</i> 301	300/250	50/60	
<i>D</i> 251	<i>B</i> 251	250/212	60/70	250/200
<i>D</i> 213	<i>B</i> 213	212/180	70/80	200/160
<i>D</i> 181	<i>B</i> 181	180/150	80/100	
<i>D</i> 151	<i>B</i> 151	150/125	100/120	160/125
<i>D</i> 126	<i>B</i> 126	125/106	120/140	125/100
<i>D</i> 107	<i>B</i> 107	106/90	140/170	100/80
<i>D</i> 91	<i>B</i> 91	90/75	170/200	
<i>D</i> 76	<i>B</i> 76	75/63	200/230	80/63
<i>D</i> 64	<i>B</i> 64	63/53	230/270	63/50
<i>D</i> 54	<i>B</i> 54	53/45	270/325	50/40
<i>D</i> 46	<i>B</i> 46	45/38	325/400	

Эквивалентный диаметр зерен шлифпорошков используется в ряде случаев, например при разработке и анализе методов классификации, а также сортировке порошков, что связано с анализом движения зерен в жидкой или газообразной среде, для оценки размеров зерен используют эквивалентный диаметр, представляющий собой диаметр шара, объем которого равен объему данной частички. Экспериментальное определение основано на подсчете количества зерен порошков в единице массы [55]:

Эквивалентные диаметры зерен шлифпорошков, мкм

Зернистость	AC2	AC4	AC6	AC15	AC32
630/500	–	–	–	–	549
500/400	–	–	–	441	446
400/315	–	–	353	358	362
315/250	–	–	287	290	294
250/200	–	223	234	236	239
200/160	–	183	190	192	194
160/125	144	149	154	156	158
125/100	118	122	126	137	128
100/80	97	99	102	103	105
80/63	80	81	83	94	85
63/50	66	66	67	88	69
50/40	53	54	55	55	56

Количество алмазных зерен в одном карате порошка – тыс. шт. в 1 карате [55]:

Зернистость	AC2	AC4	AC6	AC15	AC32	AC80
1	2	3	4	5	6	7
630/500	–	–	–	–	0,6	–
500/400	–	–	–	1,3	1,2	1,1

1	2	3	4	5	6	7
400/315	–	–	2,4	2,3	2,2	1,9
315/250	–	–	4,5	4,3	4,2	4,0
250/200	–	9,6	8,4	8,1	7,8	6,3
200/160	–	17,7	15,6	15,1	14,5	12,8
160/125	34,9	32,5	28,9	28,2	27,0	25,6
125/100	64,5	58,9	54,0	52,5	50,1	47,5
100/80	118,0	111,1	100,0	98,0	94,3	91,2
80/63	217,0	202,0	183,0	183,0	176,9	161,2
63/50	408,0	377,0	357,0	333,0	327,8	302,0
50/40	714,0	714,0	625,0	625,0	625,0	588,2

Реальное (посчитанное) количество зерен (тыс. шт.) в 1 карате алмазного порошка [56]:

Зернистость порошка	Марка алмазов				
	AC2	AC4	AC6	AC15	AC32
630/500	–	–	–	–	0,65
500/400	–	–	–	1,25	1,21
400/315	–	–	2,44	2,33	2,25
315/250	–	–	4,53	4,35	4,19
250/200	–	9,60	8,41	8,11	7,81
200/160	–	17,7	15,6	15,1	14,5
160/125	36,0	32,5	29,1	28,2	27,1
125/100	65,2	59,8	54,0	52,6	50,4
100/80	118	110	100	98,1	93,9
80/63	213	202	186	183	175
63/50	386	372	346	341	326
50/40	669	685	644	636	606

CBN Abrasives – абразивы кубического нитрида бора. В производстве применяются с 1969 г. [57]. На 2000 год около 30 % всех процессов шлифования в мире проводится CBN кругами, причем объем стоимости таких кругов составил более 370 миллионов \$ USA. Для сравнения укажем, что объем обработки шлифованием разных сталей и суперсплавов составил почти 1,3 billion \$ USA. Исторически наибольший объем использования CBN имеет место в Японии [57].

Потребление CBN в промышленности в % [57]:

Промышленность	Америка	Европа	Другие страны
Автомобильная	25	28	30
Подшипниковая	12	15	18
Аэрокосмическая	18	6	3
Инструментальная	19	21	18
Зубчатые передачи	7	10	10
Другие	19	20	21

1.3. Зерна шлифпорошков сверхтвердых материалов

Во всех теоретических разработках зерно СТМ рассматривается как сплошной материал без пор и включений, а сами зерна различаются только по развитости их поверхности. Соответственно распределение тепловых полей или полей напряжений, расчет теплоотвода из зоны резания зерном выполняется для сплошного материала.

На самом деле такой подход оправдан только для зерен алмазов высокой прочности, начиная с АС50, т.е. для инструмента для камнеобработки, бурового и правящего инструмента. В то же время, для алмазных зерен невысокой прочности АС4–АС32 и кубического нитрида бора всех марок, кроме КТ, используемых в механообработке, характерны существенная пористость, наличие пустот и каверн (рис. 1.1) и, как следствие, повышенное содержание включений в своем составе, т.е. повышенная дефектность зерен.

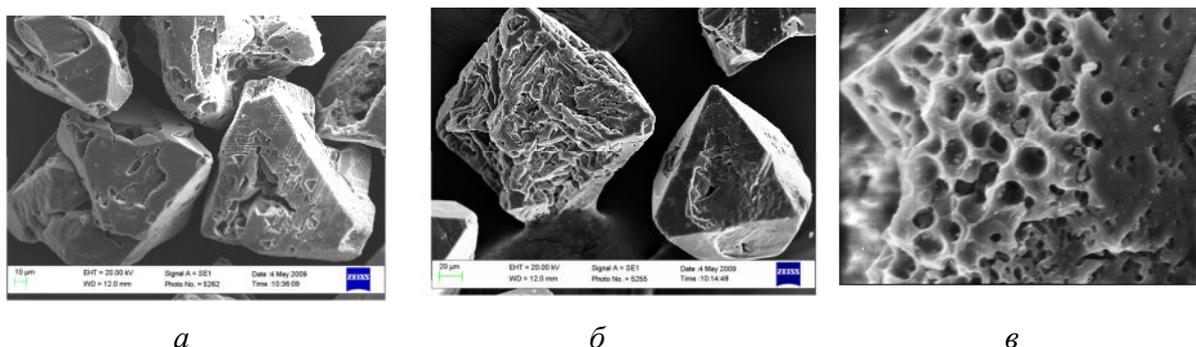


Рис. 1.1. Морфология алмазных зерен АС6 125/100 (а, б) и кубонита КР 125/100 (в)

Пористость алмазов – отношение объема пор к всему объему твердого тела. Поскольку внутреннюю пористость измерять невозможно, то практически под понятием пористости понимают отношение объема открытых пор к общему объему твердого тела. Поры шириной менее 2,0 нм относятся к микропорам, от 2 до 20 нм – мезапорам, более 20 нм – макропорам [58].

Таблица 1.3. Значения пористости алмазов [58]

Зернистость	Пористость, %, для алмазов марок	
	АС6	АС15
400/315	–	7,37
250/200	7,93	5,03
160/125	4,94	2,19
100/80	3,81	1,89
63/50	4,48	1,63

По данным [58] пористость алмазов колеблется в пределах от 0,68 до 8,0 % и зависит от марки алмазов и их зернистости (табл. 1.3). С повышением зернистости пористость возрастает, а с повышением прочности зерен – снижается.

Дефектность поверхности алмазных зерен связана с тем, что поверхность алмазной частички формируется на конечной стадии кристаллизации и как бы отражает своим составом всю технологическую предысторию. Прочность кристалла зависит в значительной степени от дефектности поверхности. На поверхности кристалла в результате действия сил межатомного взаимодействия удерживаются примесные атомы и молекулы разных соединений, а также твердые микрочастицы в количествах, пропорциональных уровню дефектности поверхности [59]. Оценка дефектности поверхности алмазных зерен проводится [59] с учетом показателей прочности зерен по величине их разрушающей нагрузки (P, H), удельной поверхности порошка ($S_{уд}, м^2/г$), приобретенной магнитной восприимчивости ($\chi_H, м^3/кг$) и характеристики уровня дефектности ($K_a, \%$):

Параметры	Образцы алмазных шлифпорошков зернистости 500/400 марок					
	АС160	АС125	АС100	АС80	АС50	АС32
P, H	297,0	268,0	200,3	163,0	99,1	55,8
$S_{уд} \cdot 10^{-2}, м^2/г$	3,5	8,2	14,0	16,0	18,0	27,0
$\chi_H \cdot 10^{-8}, м^3/кг$	8,4	10,7	55,1	150,8	169,1	540,0
$K_a, \%$	0,05	0,12	0,27	0,61	0,88	1,23

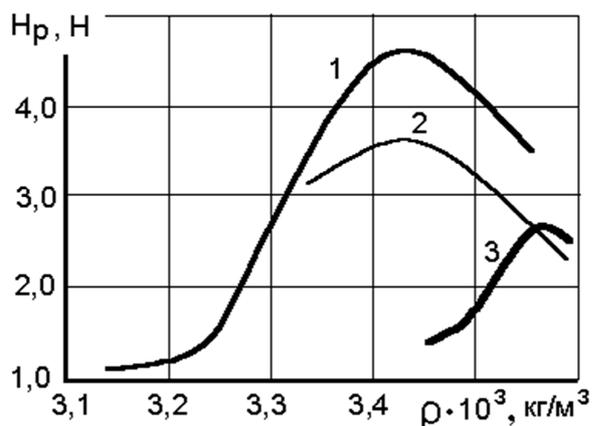


Рис. 1.2. Зависимость прочности алмазных зерен от их плотности: 1 – зеленые кристаллы 315/250 синтезированные в Fe–Ni системе, 2 – темные кристаллы 250/200 синтезированные в Fe–Ni системе, 3 – кристаллы марки АСК 250/200 [60]

Плотность алмазных зерен как раз и зависит от их дефектности и колеблется от 3,4 г/см³ до 3,7 г/см³, хотя наиболее вероятной является плотность от 3,5 до 3,55 г/см³ [60]. Это зависит от режима синтеза и использованного при этом катализатора. Плотность в определенной степени связана с разрушающей нагрузкой (прочностью зерен). Характер такой зависимости представлен на рис. 1.2.

Как для природных, так и для синтетических алмазов существует корреляция между плотностью и их прочностью. Прочность «тяжелых» алмазов в среднем в 1,6 раза превышает прочность «легких» [61].

При обработке результатов испытаний и установлении значения показателя прочности зерен шлифпорошков из сверхтвердых материалов в большинстве случаев исходят того, что распределение значений показателя прочности зерен шлифпорошков из сверхтвердых материалов подчиняется нормальному закону распределения.

На самом деле значения показателя прочности зерен СТМ, из наиболее распространенного для шлифования кругами из СТМ диапазона марок и зернистостей шлифпорошков, подчиняется не нормальному, а логарифмически-нормальному закону распределения, поэтому при обработке данных по стандартизированным методикам действительные значения показателя прочности зерен порошков СТМ искажаются.

Распределение показателя значения прочности (разрушающей нагрузки) зерен СТМ изучено в работе [62], где для определения вида функции распределения показателя прочности зерен порошков СТМ на раздавливание (методика ДСТУ 3292–95 «Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия») было проведено серию экспериментов, минимальную выборку в которых приняли в 100, а рабочую в 500 экспериментальных точек. При контрольных проверках использовали выборки по 1000 та 5000 точек. Статистическую обработку результатов измерений проводили с помощью программы *YPCON* «Обработка статистических данных и выбор теоретического закона распределения непрерывной случайной величины». Программа располагала данные выборки в исходном порядке, разбивала упорядоченную совокупность на равные интервалы, подсчитывала эмпирические частоты, строила эмпирическую функцию распределения и далее среди известных заданных теоретических законов (нормального, равномерного, бета- и гамма-распределения, χ -квадрат распределения, логарифмически-нормального, Вейбулла, Стьюдента, экспоненциального, Роллея, Максвелла, Лапласа-Шарлье) определяла тот, которому полученное эмпирическое распределение подчиняется наилучшим образом. Правильность выбора проверяли одним из критериев согласия: Пирсона, Колмогорова, Бернштейна, Ястремского, Романовского.

На рис. 1.3 приведены эмпирические функции распределения значений показателя прочности зерен трех марок порошков СТМ (представлены точками). Видно, что это распределение несимметрично и не подчиняется нормальному закону. С помощью программы *YPCON* установлено, что полученные эмпирические распределения значений показателя прочности зерен порошков марок АС2 100/80 (выборка 500 шт.), АС2 160/125 (500 шт.), АС4 100/80 (500 и 5000 шт.), АС4П 100/80 (500 шт.), АС6 250/200 (500 шт.), АС6 250/200 ТО (100, 200, 300, 400 и 1000 шт.), АС15 160/125 (250, 250 и 500 шт.), КР 100/80 (500 шт.), КР 100/80 ТО (500 шт.), КТ 80/63 (рекуперированный, 500 шт.), МДА100 (250 шт.) с наибольшей

вероятностью подчиняется логарифмически-нормальному закону, для которого плотность распределения исследованной величины x имеет вид:

$$f(x) = \frac{0,4343}{\sigma\sqrt{2\pi} \cdot x} \exp\left[-\frac{(\lg x - a)^2}{2\sigma}\right],$$

где a и σ математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение случайной величины соответственно.

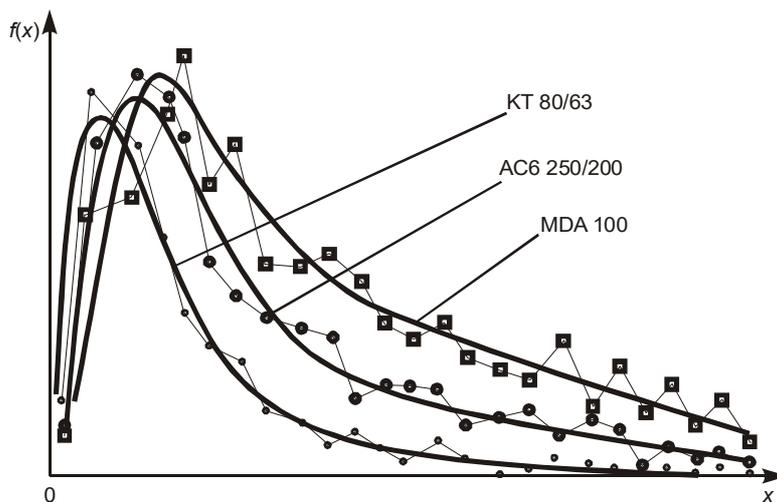


Рис. 1.3. Эмпирические и теоретические кривые плотностей распределения показателя прочности зерен порошков СТМ трех марок [62]

Представленные на рисунке теоретические кривые (сплошные линии) плотности распределения значений показателя прочности зерен x трех порошков СТМ, иллюстрируют результаты обработки экспериментальных данных. Статистическая обработка результатов измерений величины показателя прочности зерен порошков показала, что во всех рассмотренных случаях на уровне значимости в 0,15 гипотеза о логарифмически-нормальном распределении не отклоняется. Результаты статистической обработки показателей прочности зерен шлифпорошков СТМ приведены в табл. [62].

Марка порошка СТМ	Выборка, шт.	Результаты статистической обработки данных			H_p^H , Н	$H_p^{лн}/H_p^H$, %
		a	σ^2	$H_p^{лн}$, Н		
АС4 100/80	5000	5,9652	0,7472	5,05	3,97	27,2
АС6 250/200 *	1000	6,9774	0,7282	13,71	10,04	36,6
АС2 160/125	500	5,8198	0,6272	4,02	3,44	16,8
КР 100/80	500	6,7032	0,7552	5,32	4,00	32,8
КТ 80/63 **	500	6,3510	0,7459	7,43	5,73	29,8

Примечание: * – порошок алмаза после термообработки; ** – порошок кубонита после рекуперации из шлифовального инструмента.

В таблице параметр $H_p^{\text{лн}}$ – среднее значение разрушающей нагрузки, полученное на основе логарифмически-нормального распределения. Значения средней разрушающей нагрузки $H_p^{\text{н}}$ зерен алмазных порошков получены по методике ДСТУ 3292–95 «Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия», а кубонита – по ТУУ 88.090.018–98 «Порошки кубического нитрида бора (кубонита)». Анализ полученных результатов показывает относительную близость параметров плотности распределения a и σ^2 , что подтвердило вывод про высокую достоверность данных, полученных на основе логарифмически-нормального распределения [62]. Анализ таблицы также свидетельствует о том, что при обработке данных по стандартизованным методикам действительные значения показателя прочности зерен порошков занижаются на 17–37 %. Установлена связь между показателями прочности, обчисленными по нормальному и логарифмически-нормальному закону:

$$\Delta H_p^{\text{лн}} = H_p^{\text{н}}(18,16 + 1,89 \cdot 10^{-4} H_p^{\text{н}}).$$

В целом, приведенные выше исследования позволяют утверждать, что значения показателя прочности зерен СТМ, из наиболее распространенного для шлифования кругами из СТМ диапазона марок и зернистостей шлифпорошков подчиняется логарифмически-нормальному закону распределения.

Перед тем, как перейти к рассмотрению моделей формы зерен СТМ, обратим внимание на то, что коэффициент формы зерен рассчитывают как отношение длины проекции зерна к ширине этой проекции [10]. Укажем, что от обычных зерен следует отличать игольчатые алмазные зерна, максимальный и минимальный размеры которых в плоскости проекции имеют отношение 3:1 и более [6]. В целом, размер алмазного зерна – полусумма длины и ширины прямоугольника, условно описанного вокруг проекции зерна таким образом, чтобы большая сторона прямоугольника соответствовала наибольшей длине алмазного зерна [6].

При моделировании процессов шлифования важным является выбор формы зерен СТМ, как базовой модели. В научной литературе встречаются разные взгляды на выбор таких моделей. В работе [63] наиболее вероятной представляется форма зерна в виде шара или конуса с закругленной вершиной. Автор [64] рассматривает форму зерен в виде цилиндра и куба. В работе [65] форма зерна представлена в виде двух пирамид, соединенных основаниями между собой. В работе [66] профиль зерна представлен кривыми 2-го порядка. Авторами [66–69] принята форма зерна в виде эллипсоида вращения, причем авторы [66, 67] обращают внимание на то, что это важно в том случае, когда необходимо учитывать пространственную ори-

ентацию зерен, а модель зерна в виде шара – нивелирует разницу в пространственной ориентации.

В работе [70] проведено сравнение разных моделей зерен. При этом, анализ геометрической формы плоского сечения зерен СТМ сводился к выбору базовых аппроксимирующих кривых 2-го порядка и расчетной проверки степени отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей кривой. За базовые кривые принимали: круг, эллипс, ромб, квадрат и правильный шестигранник. В качестве критерия для сравнения разных вариантов принимали ширину соответствующего концентричного кольца (круг, эллипс) или рамки (квадрат, ромб, шестигранник), в которую попадали все экспериментальные данные и стремились к вариантам с минимальными ширинами. Указанный выше алгоритм реализован в виде программы на языке ФОРТРАН-77. По структуре программа состоит из основной (управляющей) программы и 5-ти подпрограмм, каждая из которых выполняет процедуру аппроксимации одной из базовых кривых. Входными параметрами для всех подпрограмм являются результаты измерения координат точек контура сечения зерна и центра соответствующих фигур. Последние определялись расчетным путем с помощью одной из подпрограмм, которая вызывалась первой и была неизменной для всех аппроксимирующих кривых. Исходными параметрами подпрограмм были ширина кольца или рамки, а также другие геометрические параметры фигур (радиус круга, полуось эллипса, диагонали ромба, стороны квадрата и шестигранника). Последовательный вызов указанных выше подпрограмм осуществлялся управляющей программой. Он организован в виде цикла по количеству наборов экспериментальных данных. Более детально методика исследований изложена в работе [70]. Анализ расчетов, проведенных для 5 марок шлифпорошков СТМ разной зернистости: АС2 160/125, АС4 250/200, АС6 250/200, АС15 500/400, КР 160/125 показал, что, если принять для эллипса отклонение от реальных данных за $K_{от}=1,0$, то для других форм отклонение будет следующим: круг – 1,234, ромб – 2,493, квадрат – 2,582, шестигранник – 2,602. Таким образом, погрешность при выборе модели зерен (по отношению к эллипсоиду вращения) составляет: для шара – 23,4%, для двух конусов (сечение – ромб) – 149,3%, а для других моделей погрешность еще больше. Тем самым подтверждено, что за базовую модель зерна необходимо принимать эллипсоид вращения. Кроме того, такая модель позволяет также учитывать пространственную ориентацию зерен, что является важным для построения модели системы «зерно–связка». В связи с этим, определенное значение имеет вопрос влияния зернистости и прочности зерен на коэффициент отклонения ($K_{от}$) модели зерен в виде эллипсоида вращения от шара. Для алмазов марок диапазона от АС2 до АС32, МДА и кубического нитрида бора марок КР и КТ зернистостью от

45/36 до 630/500 установлены следующие корреляционные зависимости, которые описывают значения величины коэффициента отклонения между эллипсоидом и шаром в зависимости от прочности: $K_{от} = 1,315 - 0,353/H_p$ (погрешность 5,1 %) и от зернистости: $K_{от} = 1,233 + 1,588 \cdot 10^{-4} Z$ (погрешность 5,9 %) шлифпорошков СТМ, где Z – зернистость по нижнему сити, мкм. Анализ этих зависимостей показывает, что только небольшие ($Z < 50$ мкм) и малопрочные зерна ($H_p < 2H$) не намного отличаются от шара, а это означает, что только такие зерна еще возможно аппроксимировать шаром, а остальные нежелательно, поскольку это приведет к повышению погрешностей расчетов [62].

Объем алмазного зерна ($\cdot 10^{-6}$ мкм³) для марок зерен [55]:

Зернистость	АС2	АС4	АС6	АС15	АС32	АС80
500/400	–	–	–	43,50	47,31	51,51
400/315	–	–	23,29	24,37	25,22	29,82
315/250	–	–	12,50	13,07	13,55	14,16
250/200	–	5,91	6,73	6,99	7,27	8,99
200/160	–	3,21	3,64	3,75	3,89	4,42
160/125	1,62	1,73	1,96	2,01	2,10	2,21
125/100	0,88	0,96	1,05	1,08	1,13	1,19
100/80	0,48	0,51	0,57	0,58	0,60	0,62
80/63	0,26	0,28	0,31	0,31	0,32	0,35
63/50	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,19
50/40	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10

В работе [62] для зерна-эллипсоида его объем с учетом радиусов закругления вершин зерен (ρ), их зернистости по большему сити (Z_{max}) и коэффициента изометричности (α) представлен в виде:

$$V_3 = 4/3\pi \alpha [0,707(0,897 \cdot Z_{max} - 2\rho) + \rho]^3.$$

Изометричности коэффициент (α) – отношение меньшего размера длины зерна к большему. Например, для зерна $\alpha = b/a$, где a – большая полуось, а b – меньшая полуось [46]. В работе [71] подтверждено, что зерна СТМ по форме наиболее близки к эллипсоиду вращения, и, как следствие, они, естественно, имеют определенное сжатие, и, соответственно, коэффициент изометричности. Анализ экспериментальных и расчетных данных показывает, что коэффициент изометричности эллипсоида-зерна зависит:

от зернистости: $\alpha = 0,796 - 6,094 \cdot 10^{-5} Z$ (погрешность 3,9 %)
и прочности зерен: $\alpha = 0,786 - 1,133 \cdot 10^{-4} H_p$ (погрешность 3,8 %).

Видно, что чем большими являются значения Z и H_p , тем более сжаты зерна. Установлено также, что чем больше отличаются шар и эллипсоид, тем больше и сжаты зерна: $\alpha = 0,928 - 0,114 K_{от}$ (погрешность 3,3 %).

Для некоторых марок зерен и зернистостей шлифпорошков зерен СТМ конкретные данные коэффициента изометричности приведены в таблице [62]:

Зернистость СТМ	Марка зерен СТМ				
	АС2, КО	АС4, КП ЛП	АС6, ЛКВ	АС15, D46 КТ	АС32, MDA100
45/36	–	–	–	0,76±0,05	–
80/63	–	–	0,73±0,06	–	–
100/80	0,76±0,04	0,86±0,03	–	0,80±0,05	–
125/100	–	–	–	0,80±0,05	0,86±0,03
160/125	0,81±0,05	0,76±0,05	–	–	–
200/160	–	–	0,82±0,04	0,75±0,05	0,82±0,04
250/200	–	0,79±0,04	0,81±0,04	0,74±0,04	–
315/250	–	–	0,78±0,06	–	–
400/315	–	–	0,72±0,05	–	–
630/500	–	–	–	0,77±0,06	0,77±0,04

Угол заострения вершин зерен – является углом между двумя касательными к проекции контура зерна на плоскость. В большинстве случаев для разных абразивных зерен такой угол находится в зоне от 90 до 120 градусов. Установлено, что угол заострения вершин зерен коррелирует с их прочностью как $\beta = 103,7 + 13,1 \cdot \lg H_p$, а в зависимости от зернистости угол заострения β с погрешностью 1,75 % может быть описана зависимостью $\beta = 80,9 \cdot Z^{0,0764}$ [71]. Значения углов заострения для разных СТМ приведены в табл. 1.3–1.5.

Таблица 1.3. Углы заострения вершин зерен порошков СТМ [71]

Характеристика порошка СТМ		β , град	Характеристика порошка СТМ		β , град
Марка	Зернистость		Марка	Зернистость	
АС2	160/125	117,6 ± 3,8	АС32	200/160	120,0 ± 4,4
АС4	100/80	109,4 ± 3,8	АС32	630/500	126,0 ± 3,4
АС4	250/200	112,8 ± 3,8	MDA	125/100	99,4 ± 4,0
АС6	200/160	119,8 ± 4,4	D46	45/36	105,6 ± 4,8
АС6	250/200	119,8 ± 4,2	τR''180	200/160	116,2 ± 4,6
АС6	400/315	116,6 ± 4,4	КР	160/125	116,6 ± 4,4
АС15	100/80	113,0 ± 3,8	КТ	80/63	112,2 ± 4,8
АС15	125/100	117,2 ± 3,4	АС2МА	100/80	99,2 ± 4,0
АС15	200/160	121,6 ± 4,0	АС6С	250/200	120,0 ± 3,8
АС15	250/200	120,4 ± 4,2			
АС15	500/400	132,4 ± 3,0			

Таблица 1.4. Угол заострения алмазных зерен [55]

Зернистость	Угол заострения, град., для марок алмазов			
	АС2	АС4	АС6	АС15
250/200	–	–	117	–
200/160	–	–	122	116
160/125	113	–	105	113
125/100	115	117	120	127
100/80	112	127	126	–
80/63	104	117	120	–
63/50	114	115	–	–
50/40	115	110	117	–

Таблица 1.5. Угол заострения вершин зерен абразивных сверхтвердых материалов [72]

Абразив	Зернистость	Угол заострения, градус
Эльбор	6	92,8
	8	94,9
	10	95,6
	16	96,8
Алмаз синтетический АС2	63/50	71
	80/63	76
	100/80	87
	200/160	84

Радиус округления вершин зерен – характеризует округление вершин зерен и зависит в определенной степени от зернистости зерен и их прочности (табл. 1.6–1.8).

Таблица 1.6. Радиусы округления вершин зерен порошков СТМ [62]

Характеристика порошка СТМ		ρ, мкм	Характеристика порошка СТМ		ρ, мкм
Марка	Зернистость		Марка	Зернистость	
АС2	160/125	3,4 ± 0,4	АС32	200/160	8,6 ± 0,7
АС4	100/80	2,2 ± 0,3	АС32	630/500	12,6 ± 1,7
АС4	250/200	5,8 ± 0,7	MDA	125/100	2,1 ± 0,3
АС6	200/160	4,7 ± 0,7	D46	45/36	1,1 ± 0,1
АС6	250/200	5,8 ± 0,5	τR''180	200/160	31,9 ± 2,3
АС6	400/315	3,2 ± 0,3	КР	160/125	4,2 ± 0,6
АС15	100/80	2,6 ± 0,2	КТ	80/63	1,3 ± 0,1
АС15	125/100	2,8 ± 0,3	АС2МА	100/80	1,4 ± 0,1
АС15	200/160	5,3 ± 0,6	АС6С	250/200	4,2 ± 0,3
АС15	250/200	7,3 ± 0,7			
АС15	500/400	9,7 ± 1,0			

Установлено, что радиус округления вершин зерен коррелирует с их прочностью как $\rho = 1,16 H_p^{1,54}$, а в зависимости от зернистости радиус округления с ошибкой в 17,2 % может быть описан зависимостью

$$\rho = Z/(34,8 + 1,24 \cdot 10^{-2} Z) [62].$$

Таблица 1.7. Радиус округления зерен абразивных СТМ [72]

Абразив	Зернистость	Радиус округления, мкм
Эльбор	6	4,6
	8	5,0
	10	6,3
	16	10,1
Алмаз синтетический АС2	63/50	2,6
	80/63	3,2
	100/80	8,0
	200/160	7,8

Таблица 1.8. Радиус округления алмазных зерен [55]

Зернистость	Радиус округления, мкм, для марок алмазов			
	АС2	АС4	АС6	АС15
250/200	–	–	24	–
200/160	–	–	22	18
1	2	3	4	5
160/125	14	–	21	18
125/100	13	13	19	10
100/80	8	8	13	–
80/63	7	7	11	–
63/50	8	8	–	–
50/40	8	6	5	–

Диагностика размерных и морфологических характеристик зерен порошков СТМ осуществляется на приборе *DialInspect.OSM* [73]. Из совокупности характеристик, который ним диагностируется, в базовую для сравнительного анализа совокупность были включены следующие характеристики зерен [74] (рис. 1.4): максимальный (F_{\max}) и минимальный (F_{\min}) диаметры, аналог коэффициента формы (F_e), определяемый по отношению F_{\max} к F_{\min} , площадь фактической проекции зерна – А, эквивалентный (d_s) диаметр, определяемый по зависимости $d_s = 2(A/\pi)^{0,5}$, p – периметр истинной проекции изображения, p_c – периметр, охватывающего выступающие точки контура, проекции изображения, Rg – шероховатость контура истинной проекции изображения, определяемая по отношению p к p_c .

Внешняя удельная поверхность зерен определялась экстраполяционно–аналитическим методом, который относится к группе методов, основанных на геометрических измерениях. В его основе лежит 3D моделирование площади поверхности зерен порошка и их объема. Начальными дан-

ными для такого способа измерения внешней удельной поверхности служили указанные выше диаметры Feret, периметр и площадь проекции зерен, а также их высота [75].

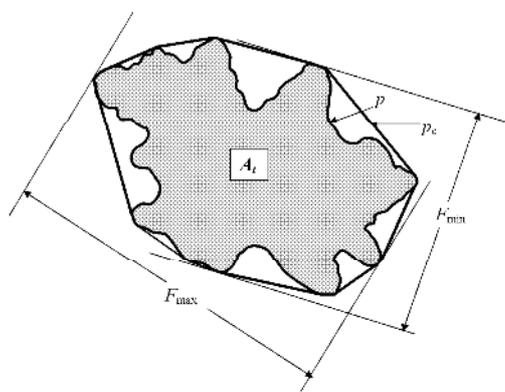


Рис. 1.4. Проекция условного зерна: A – площадь проекции зерна; p_c – периметр выпуклого изображения проекции зерна; p – периметр истинного изображения проекции зерна [74]

Как правило, режущие кромки абразивных порошков характеризуются своим количеством, углами заострения и радиусами округления. Результаты экспериментальных исследований показали, что углы заострения режущих кромок влияют на толщину и глубину среза при обработке материалов, а также на режущие свойства зерен алмазных и абразивных порошков и прочность зерен.

Автоматизированную диагностику морфометрических характеристик зерен порошков осуществляли с помощью указанного прибора *DiaInspect.OSM*. Методом автономной математической обработки полученного в результате *DiaInspect*-диагностики *XLS*-файла определяли средние значения полученных данных и оценивали их адекватность по индексу стабильности [73]. При исполнении работы проанализировано указанные морфометрические характеристики зерен алмазов марок AC4, AC6 и AC20, характерных для процессов шлифования в машиностроении, зернистостями от 80/63 до 160/125. Средние значения характеристик зерен контрольных шлифпорошков синтетических алмазов приведены в табл. 1.9. Анализ табл. 1.9 свидетельствует о том, что по таким характерным показателям как аналог коэффициента формы (F_e) и шероховатость (R_g) зерен с повышением прочности зерен снижаются значения их показателей. Все это указывает на то, что по таким важным морфологическим показателям как характеристики формы зерен и разветвленности их поверхности зерна марок AC4 и AC6 значительно разнятся от более прочных зерен (AC20).

Укажем, что на показатели процесса обработки материалов и качество обрабатываемой поверхности существенно влияют морфологические, размерные и геометрические (совокупно – морфометрические) характеристики абразивных порошков, которые используются и при изготовлении инструмента. При алмазно-абразивной обработке уделяют внимание также характеристикам рельефа контура проекции зерен, в частности выступам, которые интерпретируются как режущие кромки.

Таблица 1.9. Средние значения характеристик контрольных шлифпорошков синтетического алмаза

Название характеристики	АС4 80/63	АС4 100/80	АС4 125/100	АС6 125/100	АС6 160/125	АС20 80/63	АС20 100/80
F_{\max}	113,36	132,83	196,66	194,84	225,57	123,58	134,74
F_{\min}	87,64	92,57	139,47	144,12	175,437	86,00	102,74
F_e	1,3040	1,4510	1,4182	1,3601	1,2911	1,4493	1,3185
Rg	1,0703	1,0748	1,0792	1,0746	1,0770	1,0786	1,0602
d_s , мкм	87,41	102,75	153,88	156,54	186,72	95,74	112,19
A , мкм ²	6138,21	8687,51	18925,35	19463,07	27622,05	7399,83	10062,2
p , мкм	329,13	387,95	578,94	579,1075	684,00	362,02	400,67
p_c , мкм	306,84	360,20	535,85	538,2476	634,39	335,12	377,74

Для подтверждения этого вывода непосредственно к тех характеристикам, которые необходимы для оценки эффективности использования зерен СТМ в процессах шлифования, определены следующие показатели: количество режущих кромок (n) и углов их заострения (φ), глубины впадин (C_n), высоты (h_n) и ширины основы (Δ_n) режущих кромок порошков алмазов и КНБ (табл. 1.10). Анализ данных табл. 1.10 свидетельствует что опять же таки для зерен меньшей прочности характерными является почти одинаковое количество режущих кромок, но углы заострения с ростом прочности также повышаются, например, у алмазов АС4 100/80 углы заострения режущих кромок составляют приблизительно 93 градуса, а у зерен АС20 100/80 такие углы составляют уже 108 градусов. Приведенное выше свидетельствует о том, что по морфометрическим показателям для исследованных зерен шлифпорошков СТМ (АС4, АС6, КР и КВ) действительно существует в определенной степени необычная морфология зерен.

Таблица 1.10. Значения количества режущих кромок (n) и углов их заострения (φ), глубины впадин (C_n), высоты (h_n) и ширины основы (Δ_n) режущих кромок порошков синтетических алмазов и кубического нитрида бора

Марка порошка	n	φ , град	C_n	h_n	Δ_n
АС4 80/63	8,05	93,491	7,291	28,032	29,794
АС4 100/80	8,27	93,448	8,601	32,171	34,167
АС4 125/100	8,82	95,022	12,337	44,322	48,388
АС6 125/100	9,54	99,316	11,111	39,295	46,266
АС6 160/125	10,7	102,822	11,847	39,800	49,876
АС20 80/63	8	93,40	—	—	—
АС20 100/80	11	108,0	—	—	—
КВ 125/100	9,13	95,731	11,806	41,548	45,927
КР 100/80	8,32	91,042	—	—	—
cBN_SL	9,58	101,449	12,441	45,012	55,042

1.4. Включения в зернах СТМ и их перемещения в результате термообработки

Как уже было показано выше для кубонита марок КР, КВ и алмазов невысокой прочности марок АС4 и АС6, которые наиболее применяемые в шлифовальных кругах для процессов в машиностроении, характерною является дефектность в виде пористости. Поры в зернах могут быть большими 10 мкм, причем глубина такой поры может быть и большей. В процессе проведения исследований было обращено внимание на то, что зерна СТМ имеют примеси и включения как на поверхности, так и в дефектах этой поверхности (рис. 1.5).

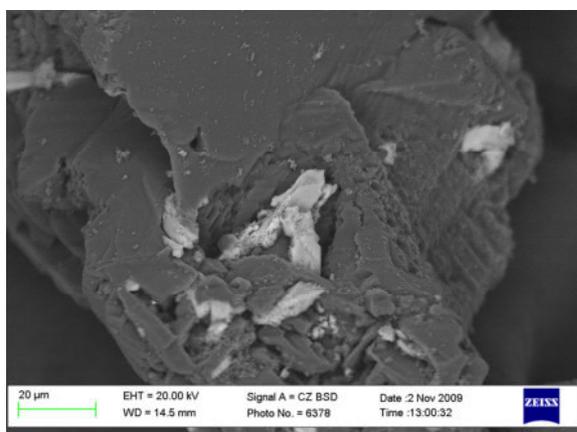


Рис. 1.5. Пример наличия включений на поверхности и порах алмазов АС6 125/100 в исходном состоянии

Алмаз при синтезе в системе Me–C получают в специальных аппаратах при высоких p , T -условиях. Как правило, для снижения необходимых высоких параметров синтеза используют катализатор в виде сплава-растворителя. Укажем, что процесс синтеза алмазов марок невысокой прочности происходит при больших скоростях роста кристаллов, которые при своем росте захватывают все побочные фазы, присутствующие в реакционной камере. Эти фазы (включения) имеют различный размер, от атомных и до макроскопических величин. Включения, полностью законсервированные в кристалле алмаза, являются объемными дефектами. В состав сплава-растворителя преимущественно входят металлы переходной группы – Co, Ni. Известные из литературы исследования по изучению процесса синтеза алмаза в основном выполнены с использованием системы Ni–Mn–C. В последнее время возрос интерес к использованию при синтезе более дешевого сплава-растворителя – Fe–Si. Установлено [76], что влияние кремния на сплавы Fe–C является аналогичным влиянию никеля, что позволяет снизить термодинамические параметры получения алмаза. Изучен [77] синтез алмаза в системе Fe–Si–C при концентрации кремния в сплаве Fe–Si от 2 до 17 мас. % и установлено, что использование такого сплава обеспечивает получение алмазных порошков марки АС6 и, при этом, степень превращения углерода в алмаз составляет 30–36 %. Повышение концентрации кремния в сплав Fe–Si сопровождается снижением размера синтезированных кристаллов алмаза. Поэтому, для получения зерен порошков алмаза больших размеров используют сплав, содержащий 5–7 масс. % кремния.

В процессе проведения исследований установлено [78], что алмазы невысокой прочности марок АС4 и АС6, хотя и синтезированы в разных ростовых системах Fe–Si–C и Ni–Mn–C, фактически характеризуются почти одинаковыми морфометрическими характеристиками (табл. 1.11).

Таблица 1.11. Морфометрические характеристики алмазов марки АС6, синтезированных в системах Fe–Si–C и Ni–Mn–C

Ростовая система	Номер образца	n	ϕ	C_n	h_n	Δ_n	d_3
Fe–Si–C	1	11	102,8	11,847	39,800	49,876	186,271
	2	10	101,4	12,228	41,609	50,860	182,610
	3	10	99,8	12,851	43,972	52,234	182,269
	4	9	96,9	13,516	47,039	53,056	177,616
Ni–Mn–C	1	12	103,8	13,547	41,560	51,276	183,471
	2	10	101,4	12,468	40,409	50,456	181,578
	3	12	105,8	11,351	43,572	54,111	185,123
	4	11	100,9	12,416	42,134	52,224	181,345

Вместе с тем, они существенно разнятся в количестве и элементном составе внутрикристаллических и приповерхностных примесей металлических групп, которые захватываются от сплава-растворителя при синтезе, а потому существенно отличаются по своим магнитным свойствам (табл. 1.12 и 1.13).

Таблица 1.12. Элементный состав примесей в алмазах АС6 160/125, синтезированных в ростовой системе Ni–Mn–C

Ростовая система	Общее содержание примесей, масс. %	Состав (масс. %) примесей:			Удельная магнитная восприимчивость, $\chi \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$
		магнитных	немагнитных	в т.ч. Ni+Mn	
Ni–Mn–C	3,631	3,427	0,204	3,337	90,3
	2,643	2,643	0,286	2,340	44,4
	2,014	2,014	0,445	1,569	8,8

Таблица 1.13. Элементный состав примесей в алмазах АС6 160/125, синтезированных в ростовой системе Fe–Si–C [78]

Ростовая система	Общее содержание примесей, мас. %	Состав (мас. %) примесей				Удельная магнитная восприимчивость, $\chi \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$
		магнитных	в т.ч. Fe	немагнитных	в т.ч. Si	
Fe–Si–C	7,360	6,866	6,828	0,494	0,193	1211
	2,864	2,513	2,470	0,346	0,184	284
	2,129	1,794	1,733	0,319	0,182	123

Анализ таблиц 1.12 и 1.13 показывает то, что в разных ростовых системах Fe–Si–C и Ni–Mn–C формируется разное содержание примесей и, тем самым, разные диапазоны значений величины удельной магнитной восприимчивости, причем, алмазы ростовой системы Ni–Mn–C имеют диапазон магнитной восприимчивости до $100 \cdot 10^{-8}$ м³/кг, а вот алмазы ростовой системы Fe–Si–C имеют значительно больший диапазон магнитной восприимчивости от 100 до $1200 \cdot 10^{-8}$ м³/кг, а, потому, потенциально имеют значительно большие возможности с точки зрения направленного на них воздействия, который бы позволил изменить их свойства и, тем самым, достичь повышения износостойкости шлифовальных кругов.

В литературе встречаются отдельные сведения по перемещению примесей в алмазах [79, 80] при их термообработке, однако исследований на таком широком диапазоне содержания примесей, и, соответственно, величин удельной магнитной восприимчивости зерен алмазов не проводилось, поэтому нами и обращено внимание на это направление. Укажем, что при этом акцент делается именно на направленном тепловом воздействии, поскольку именно оно должно привести к перемещению примесей в алмазе в направлении поверхностных слоев, содействовать их выходу в поры и трещины, изменению вследствие этого удельной магнитной восприимчивости зерен и, как результат, повышению прочности зерен и, соответственно, износостойкости кругов [78].

Для этого для каждой из указанных выше систем отобрали [81] по два образца алмазов фракций: магнитную (с наибольшим содержанием примесей) и слабомагнитную (с наименьшим содержанием примесей), которые термообработывали при температуре от 500 до 1000 °C с выдержкой 20 мин. Одновременно оценивали потерю массы соответствующего образца порошка при нагревании к этим же температурам. Установлено, что для обоих исследованных систем характерно наличие диапазона температур, где удельная магнитная восприимчивость порошка алмаза возрастает, но характер зависимостей «температура – удельная магнитная восприимчивость» является разным.

Магнитная восприимчивость порошков алмазов системы Fe–Si–C, возрастает, и при температуре термообработки в 800 °C достигает максимума. Этот эффект одинаков как для магнитных (рис. 1.6), так и для немагнитных порошков, но именно при наличии большого количества включений, как этого и следует ожидать, эффект является более ощутимым. Обратим внимание на то, что с ростом температуры растет и потеря массы порошка алмазов, причем на менее магнитных порошках такая потеря более ощутима и при 1000 °C в обоих случаях она значительно возрастает, а, следовательно, значительно снижается удельная магнитная восприимчивость, и фактически возвращается в исходное состояние.

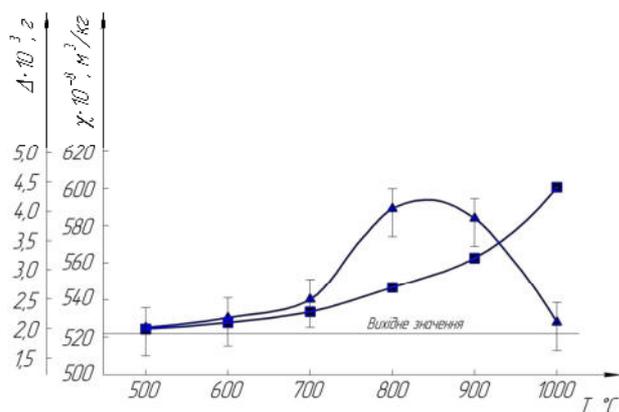


Рис. 1.6. Влияние режимов термообработки на значения удельной магнитной восприимчивости (χ) и потерю массы (Δ) алмазных магнитных (исходное значение $\chi=521 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), шлифпорошков, синтезированных в системе Fe–Si–C

нием включений в таких алмазах, количества которых недостаточно для положительного срабатывания эффекта повышения магнитной восприимчивости. Кроме того, обратим внимание на то, что с ростом температуры, как и у алмазов системы Fe–Si–C, также возрастает потеря массы порошка алмазов, но у алмазов системы Ni–Mn–C такая потеря значительно больше, а это вероятно и сказывается на том, что при превышении температуры за 800 °C в обоих случаях значения удельной восприимчивости значительно снижаются по сравнению с исходным, не термообработанным порошком [81].

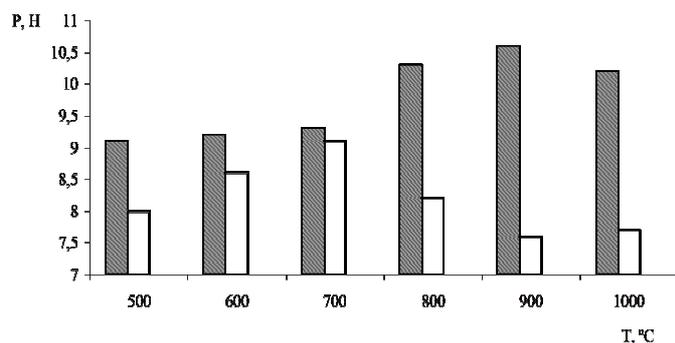
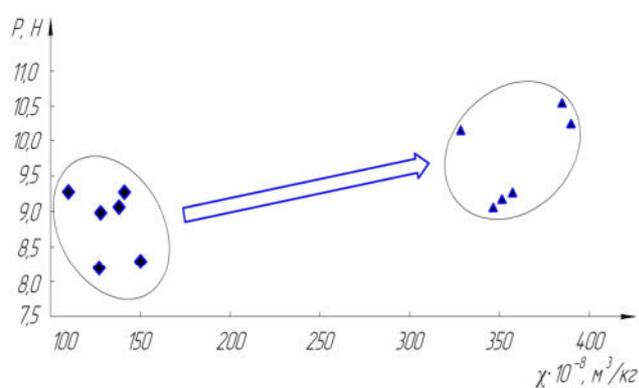


Рис. 1.7. Прочность зерен алмазного шлифпорошка, синтезированного в системе Fe–Si–C, при разных температурах: \square – $589 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ (исходное значение $\chi=521 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$); \square – $150 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ (исходное – $\chi=123 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$)

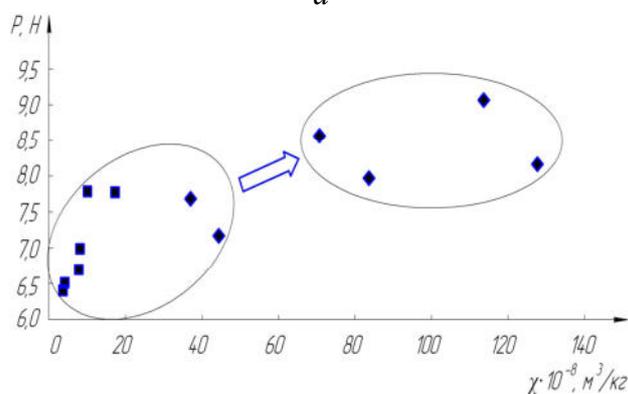
Магнитная восприимчивость порошков алмазов, синтезированных в системе Ni–Mn–C, также с изменением температуры термообработки изменяется, но характер изменений совсем другой, чем у алмазов системы Fe–Si–C. Тут также есть эффект роста удельной магнитной восприимчивости и также при температуре термообработки в 800 °C достигает максимума. Но это происходит только у магнитных порошков, а для немагнитных порошков его фактически нет. На наш взгляд, это связано с относительно небольшим содержа-

Изложенные выше закономерности свидетельствуют о том, что именно для магнитных зерен возможно ожидать при термообработке повышения значений прочности (разрушающей нагрузки) зерен СТМ. Была определена прочность зерен шлифпорошков алмазов зернистости АС6 160/125 после термообработки для ряда магнитных и немагнитных фракций системы Fe–Si–C, также Ni–Mn–C. Установлено (рис. 1.7), что прочность ал-

мазов системы Fe–Si–C при повышении температуры термообработки до 700 °С остается равной исходной, возрастает при 800 и 900 °С, и далее начиная с 900 °С имеет спадающий характер. В то же время прочность магнитной фракции шлифпорошка алмазов системы Ni–Mn–C повышается при 700 °С, а далее снижается. Общий характер изменения прочности зерен напоминает характер изменения значения магнитной восприимчивости при термообработке. Поэтому, проанализирован [78] весь массив данных, полученных по значениям прочности зерен и соответствующим им значениям удельной магнитной восприимчивости для ряда магнитных и немагнитных зерен фракций систем Fe–Si–C (рис. 1.8, а) и Ni–Mn–C (рис. 1.8, б).



а



б

Рис. 1.8. Кластерная корреляционная зависимость между удельной магнитной восприимчивостью и разрушающей нагрузкой (прочностью) алмазов при термообработке магнитных и немагнитных фракций систем Fe–Si–C (а) и Ni–Mn–C (б)

мещения примесей и включений при термообработке для возможности обеспечения эффекта «залечивания» дефектов поверхности алмаза [82].

Для подтверждения этой гипотезы элементный состав и поверхностные изменения алмазных зерен изучали с помощью электронного микроскопа Zeiss EVO 50XVP. Для магнитных зерен ($\chi=90 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), синтезиро-

Анализ данных рис. 1.8 свидетельствует о том, что как для алмазных зерен, синтезированных в системе Ni–Mn–C, так и для алмазов, синтезированных в системе Fe–Si–C, эффект повышения прочности зерен под действием теплового влияния срабатывает только тогда, когда имеется достаточное количество включений в алмазах и, соответственно, их повышенная магнитная восприимчивость. Именно поэтому, магнитные алмазы системы Fe–Si–C и дают ощутимый эффект в повышении прочности зерен (рис. 1.7) при термообработке, и, следовательно, и в возможности повышения износостойкости кругов. Объясняется это в первую очередь тем, что такие магнитные алмазы, имея ощутимое (до 7 мас. %) количество примесей имеют и существенную массовую базу для пере-

ванных в системе Ni–Mn–C, характерным является наличие пор и трещин (рис. 1.9, *a*, *б*). Установлено, что после термообработки при 700 °С (рис. 1.9, *в*, *г*) та 1000 °С (рис. 1.9, *д*, *е*), наблюдается выход включений и заполнения ними трещин и пор.

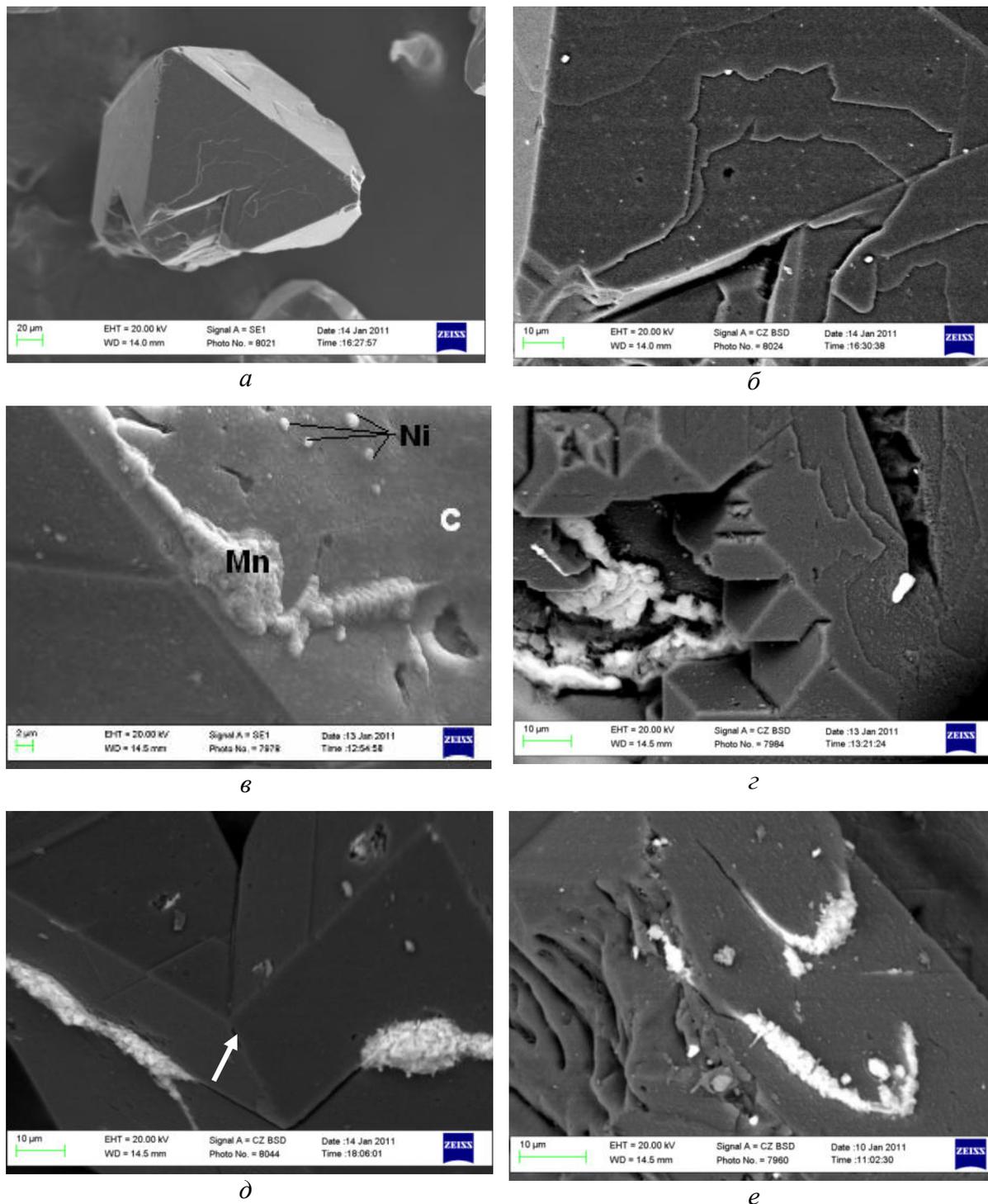


Рис. 1.9. Выход примесей Ni и Mn на поверхность через дефекты в поверхностном слое алмазов ($\chi=90 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) при термообработке: *a*, *б* – исходные зерна; *в*, *г* – температура обработки в 700 °С; *д*, *е* – температура обработки в 1000 °С

Аналогично, и для магнитной фракции синтетического алмаза системы Fe–Si–C ($\chi = 521 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), характерно наличие пор и трещин (рис. 1.10, *a, б*). Установлено, что после термообработки при 800 °C (рис. 1.10, *в, з*) и 1000 °C (рис. 1.10, *д, е*), наблюдается выход примесей и заполнение ими трещин и пор [78, 81].

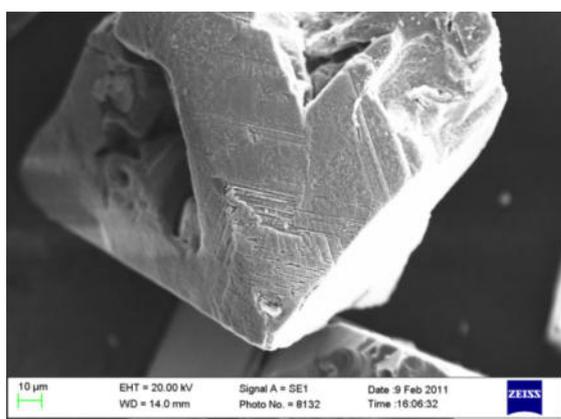
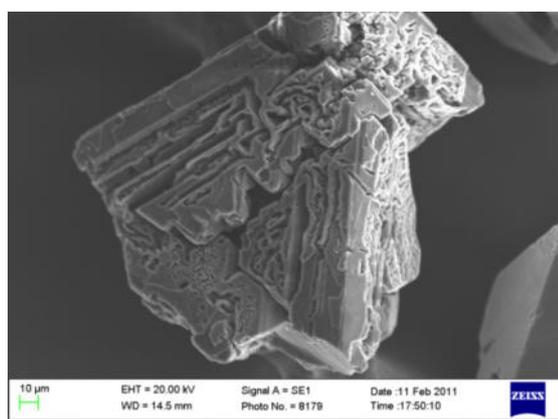
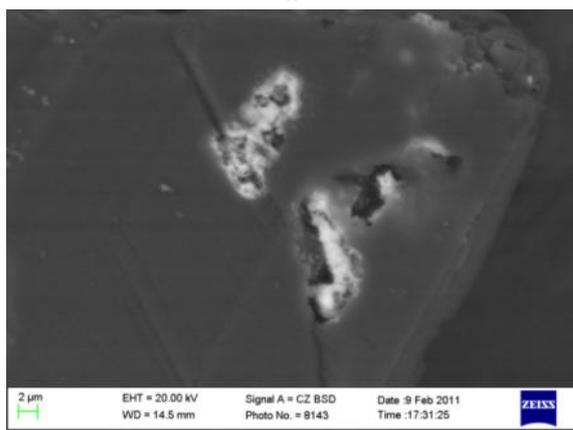
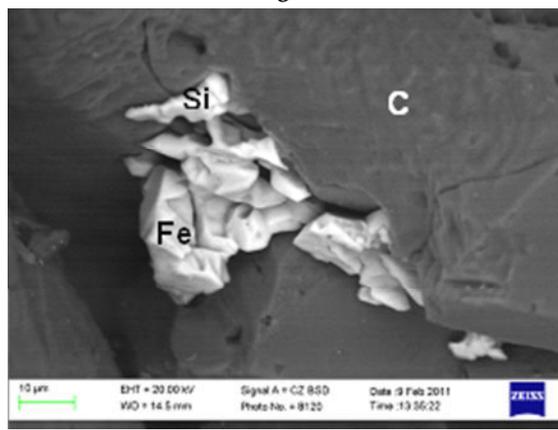
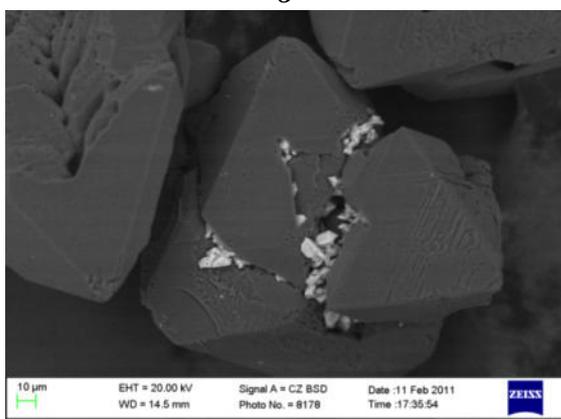
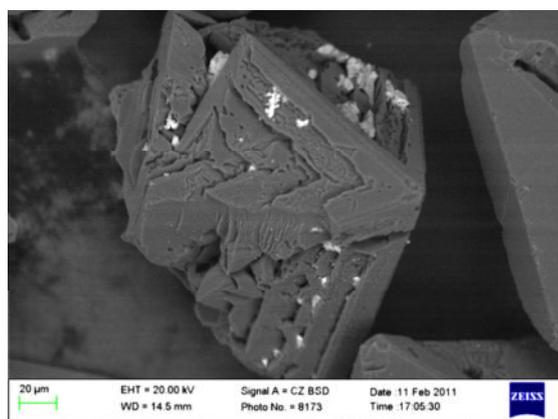
*a**б**в**з**д**е*

Рис. 1.10. Выход примесей Fe и Si на поверхность через дефекты у поверхностном слое алмазов ($\chi=521 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) при термообработке: *a, б* – исходные зерна; *в, з* – температура обработки в 800 °C; *д, е* – температура обработки в 1000 °C

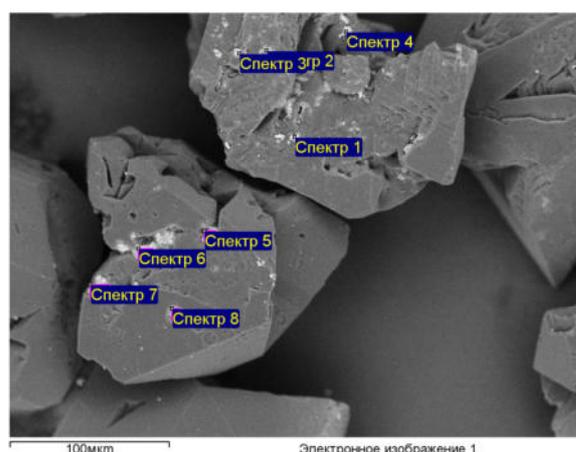


Рис. 1.11. Алмазы АС6 160/125, синтезированные в системе Fe–Si–C, после термообработки при 800 °С

Анализ элементного состава примесей и включений, находящихся в порах, трещинах и на поверхности алмазных зерен выполнен для алмазов, синтезированных в ростовой системе Fe–Si–C ($\chi=521 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) после термообработки при 800 °С (рис. 1.11, табл. 1.8). Анализ данных табл. 1.8 свидетельствует о преимущественном наличии в этих примесях и включениях Fe и Si.

Таблица 1.8. Элементный состав примесей в порах и на поверхности зерен (рис. 1.11)

Спектр	Содержание элементов (мас. %)						
	C	O	Si	Fe	Cr	Mn	Ni
1	42,28	34,96	2,66	18,60	0,71	0,50	0,23
2	61,01	18,87	10,19	1,54	5,23	1,35	1,42
3	77,09	16,32	2,44	3,37	0,33	0,28	0,16
4	33,22	37,70	4,15	22,83	0,63	0,85	0,52
5	44,67	23,14	20,32	0,63	1,29	9,39	0,38
6	31,78	16,68	25,45	3,22	1,52	10,99	0,34
7	25,33	45,47	23,16	1,14	0,23	4,53	0,13
8	26,39	29,18	32,72	0,06	0,79	10,05	0,76

Таким образом, приведенное выше свидетельствует о том, что тепловое воздействие на исследуемые алмазы невысокой прочности (АС4, АС6) в зависимости от количества, вида примесей и включений позволяет изменять поверхностный элементный состав алмазов, величину магнитной восприимчивости шлифпорошков, прочность алмазов в направлении повышения ее значения, и как следствие, повышать износостойкость шлифовального инструмента [82].

Аналогично алмазным зернами возможно использовать эффекты заполнения пористого пространства зерен и для шлифпорошков из КНБ. Как показывают наши данные [71], степень дефектности поверхности зерен КНБ, как и указанных выше алмазных зерен небольшой прочности является достаточно ощутимой (рис. 1.12). Из исследований [62] известно, что кислород воздуха постепенно взаимодействует с VN, создавая в дефектах и порах, каких достаточно много в зернах шлифпорошка КНБ, стекло-

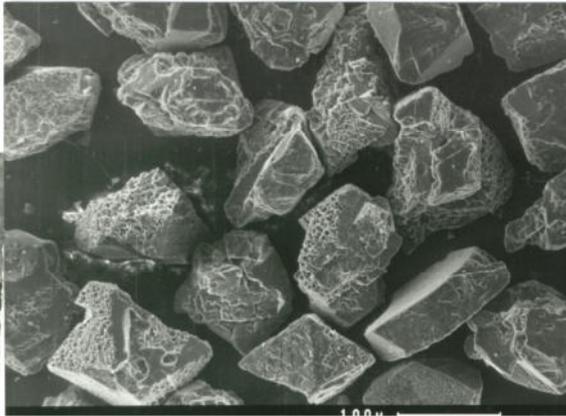
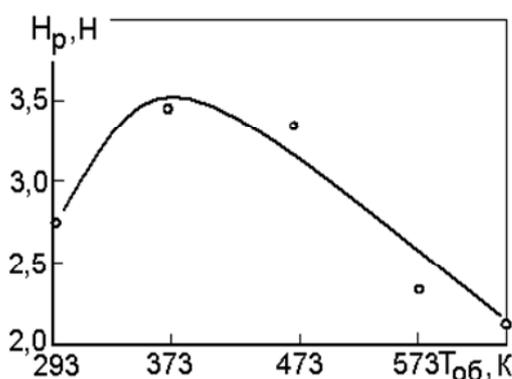


Рис. 1.12. Морфология поверхности зерен шлифпорошка марки КР 100/80

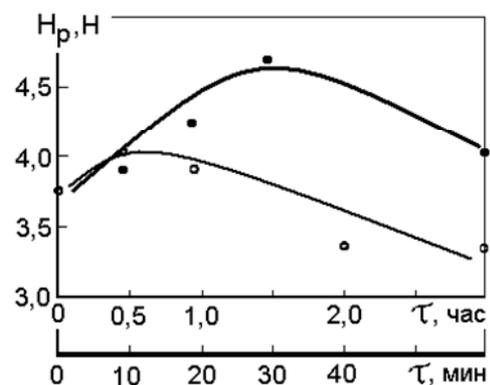
образную пленку V_2O_3 . Она из-за своей меньшей плотности заполняет поры и дефекты, что улучшает демпфирующую способность зерен.

Для исследования возможности ускорения такого процесса заполнения пористого пространства зерен КНБ стеклоподобным V_2O_3 были рассмотрены особенности термообработки зерен КНБ. Значение температуры в 1073 К принято считать предельной температурой, превышение которой

снижает прочность зерен КНБ [34], поэтому исследователи практически не изучали поведения КНБ при температурах до 1073 К. Однако, как обращено внимание в [62], этот диапазон температур может иметь для указанного выше эффекта определенный интерес. На рис. 1.13, а показано влияние температуры термообработки на показатели прочности порошков марки КР 63/50. Установлено, что при небольших температурах (373–473 К) существуют условия для повышения прочности зерен, а это подтверждает выдвинутое выше предположение, о том, что имеется возможность повышения прочности зерен КНБ за счет теплового воздействия на зерна КНБ путем заполнения дефектного пространства в зернах КНБ пленкой V_2O_3 .



а



б

Рис. 1.13. Зависимость показателя прочности зерен порошка марки КР 63/50 от температуры термообработки (а) и прочности зерен порошка марки КР 100/80 от времени термообработки

Показано (рис. 1.13, б), что существует определенная временная протяженность эффективного действия пленки, возникающей в порах и на поверхности зерен. Исследования по установлению необходимого эффективного времени термообработки показали, что это время должно быть небольшим и находиться в пределах 30 мин. В целом термообработка порошков КНБ (КР, КВ) в воздухе позволяет повысить значение разрушающей загрузки их зерен. Так, например, показатель прочности зерен кубонита марки КВ 100/80 в наших экспериментах повысился с 5,3 до 6,4 Н, а следовательно становится возможным и повышение износостойкости шлифовальных кругов при использовании таких термообработанных зерен.

1.5. Покрытия зерен СТМ

Покрытие зерен СТМ осуществляется в виде металлического или стеклянного покрытия зерен шлифпорошков для улучшения их удержания в связующем и возможного изменения контактных процессов в зоне обработки [83].



Рис. 1.14. Металлизированное покрытие алмазного зерна

Металлизация зерен СТМ преимущественно осуществляется химическим или электролитическим способами. Металлы, используемые для этого, имеют слабое химическое сродство к углероду или оно совсем отсутствует (медь), поэтому, прочной химической адгезионной связи между покрытием и абразивным зерном не возникает, а происходит чисто механическое зарастивание зерен металлом. Для избежания этого проводят агрегацию зерен и вводят примеси, улучшающие смачиваемость зерен [84].

Смачивание алмаза и графита является важным фактором как для изготовления алмазного инструмента, так и для осуществления металлизации алмазных зерен. Непереходные металлы (Sn, Cu, In, Ge, Ag, Au, Sr, Pb) не смачивают алмаз и графит ($\theta > 90^\circ$). Работа адгезии, рассчитываемая по уравнению Юнга, является малой и составляет 100–300 кДж/м². Для данных металлов не найдена зависимость краевого угла смачивания от температуры. Карбидообразующие (Al, Si, B) и переходные металлы (Ti, Cr, Mn, V, Nb, Mo, W, Fe, Co, Ni) смачивают алмаз и

графит [83] и важную роль тут играет их химическая инертность по отношению к алмазу и кубическому нитриду бора.

Металлы, химически инертные к углероду, бору и азоту [85]:

Cu, Ag, Au, Ga, Ge, In, Sn, Pb, Sb, Bi.

Угол смачивания 120–140°, адгезия ≈ 100 эрг/см².

Металлы, химически взаимодействующие с углеродом, бором и азотом [85]:

Ti, Cr, V, Nb, Ta, Mo, W, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Al, Si, B.

Угол смачивания 0–50°, адгезия ≈ 2500 эрг/см².

Зерна СТМ зарубежных фирм преимущественно имеют металлизированное покрытие. Металлизация осуществляется, как и случае отечественных СТМ, покрытием никелем. Для кругов на полимерных связках зарубежные фирмы используют покрытия СТМ системой никель-фосфор. Сравнительные данные по свойствам покрытий приведены в таблице [86]:

Свойства	Ni-покрытие химическим осаждением с использованием гипофосфата	Гальваническое никелевое покрытие
Содержание, % за масою	Ni (90–92) + P (8–10)	Ni более 99,5
Температура плавления, °C	890	1450
Коэффициент отражения, %	40...50	–
Удельное электросопротивление, мкОм·м	0,60	0,85
Теплопроводность, Вт/(м·К)	4,40...5,65	–
КЛТР, 10 ⁻⁶ град ⁻¹	13	–
Плотность, ·10 ³ кг/м ³	7,9	7,7
Твердость по Виккерсу, МПа	500 ± 50 (HRC 49)	150...250
Адгезия на алмазе, Н/мм ²	345...450	345...415
Относительное удлинение, %	3...6	10...30
Напряжения	Сжатия	Растяжения
Показатель магнетизма, %	4	37,5

Для стеклопокрытия зерен кубического нитрида бора преимущественно применяют свинцовоборосиликатное стекло системы PbO–ZnO–B₂O₃–SiO₂. Порошки КНБ со стеклопокрытием представляют собой агрегаты, состоящие из нескольких зерен, связанных между собой адгезионно-активным стеклом (рис. 1.15, а).

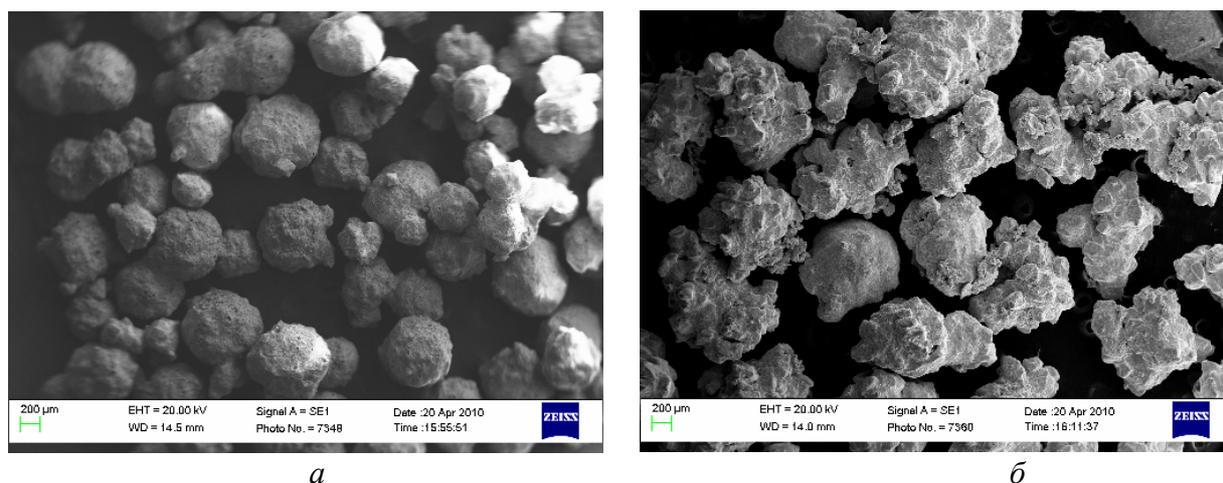


Рис. 1.15. Общий вид стеклоагрегатов кубонита (*a*) и стеклоагрегатов дополнительно покрытых электрохимической медью

Для нанесения стеклопокрытия алмазных зерен применяется стекло другой системы, чем для зерен КНБ, а именно – $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$, расплав которого имеет высокую смачивающую способность та адгезию к алмазным порошкам. Как показано в [87], на межфазной границе «алмазно-стеклоагрегат–металлическая связка» происходит диффузионное взаимодействие, приводящее к образованию новой кристаллической фазы и повышению адгезии на границе раздела фаз, что может обеспечить более прочное удержание стеклоагрегатов в связке.

Для получения стеклометаллического покрытия стеклоагрегаты могут дополнительно металлизировать – титаном (~9 масс. %, как диффузионное технологическое покрытие), титаном и никелем (~20 масс. %), титаном и медью (~20 масс. %) (рис. 1.15, *б*) [88].

Г Л А В А 2

АБРАЗИВНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПОРОШКАМИ СТМ

2.1. Связки абразивных композитов и их свойства

Для инструментов из СТМ применяются 4 вида связок: металлические связки (*metal bond*), полимерные (*resin bond*), керамические (*vittrified*), однослойные (гальванические, *single layer*).

Классификация связок – для инструментов из СТМ согласно ТУ 2-037-410-83

Тип	Группа	Рекомендации по использованию связок
Металлические (М)	1	Алмазные круги и головки для шлифования и заточки инструментов из твердых сплавов для эксплуатации в условиях повышенных режимов обработки (связки на основе алюминия).
	2	Алмазные круги и головки для шлифования и заточки инструментов из различных сталей и сплавов, а также универсальные связки в условиях повышенных требований к стойкостным показателям и кромкостойкости (связки на основе медно-оловянистых бронз).
	3	Алмазные круги, головки, сверла и другие виды инструмента специального назначения для обработки хрусталя, керамики, полупроводников, камня.
	4	Инструменты изготовленные методом гальваностегии, предназначенные для шлифовальных и доводочных работ.
	5	Хонинговальные, суперфинишные и другие бруски.
	6	Инструменты для обработки кремня, строительных материалов и горных пород.
	7	Алмазные буровые инструменты.
Полимерные (В)	1	Алмазные инструменты для чистового и получистового шлифования на станках с механизированными подачами (с металлическим наполнителем).
	2	Алмазные инструменты для чистового и получистового шлифования на станках с механизированными и ручными подачами.
	3	Алмазные инструменты для чистового и доводочного шлифования.
Керамические (К)	1	Инструменты для шлифования и заточки твердых сплавов совместно со стальной державкой.

	2	Инструменты для чистового шлифования неметаллических материалов.
	3	Инструменты для суперфиниширования подшипников из жаростойких сталей.

Кодирование связок, действующее в Украине

Действующее	Предыдущее	Документация	Область применения
1	2	3	4
Металлические связки			
M1-01	MB1	ТУ 2-037-57-81	Обработка твердого сплава, твердого сплава совместно со сталью, жаропрочных сталей, титановых сплавов
M1-02	PM1	ТУ 2-037-176-76	Обработка твердого, в т.ч. безвольфрамового, сплава, совместно со сталью
M1-04	MO4	СТП 90.504-85	
M1-05	MO13	СТП 90.504-85	Обработка твердого сплава.
M1-06	MB1K	ТУ 2-037-182-77	Обработка твердого сплава, конструкционной и инструментальной стали
M1-10	MO4-2	СТП 90.877-83	Обработка и электрошлифование твердого сплава, наплавки
M2-01	M1	СТП 90.498-85	Обработка твердого сплава, стекла, керамики, мрамора, гранита, полупроводниковых материалов, сверхтвердых материалов
M2-02	M	ТУ 2-037-181-76	Обработка и резка твердого сплава, керамики, стекла, кварца, полудрагоценных камней, полупроводниковых и других материалов
M2-03	M10	ТУ 2-037-185-77	Хонингование чугуна, обработка твердого сплава, стекла, керамики
M2-04Э	M15	ТУ 2-037-58-77	Электрошлифование твердого сплава и твердого сплава совместно со сталью
M2-05	MK	ТУ 2-037-58-77	Чистовая обработка твердого сплава
M2-06	M26	ТУ 2-037-300-80	Обработка титановых сплавов и магнитных материалов
M2-07	M27	ТУ 2-037-264-80	Обработка титана

1	2	3	4
M2-09	MO16	ТУ 2-037-495-85	Обработка титановых сплавов быстрорежущих сталей, высокопрочных закалённых чугунов и магнитных материалов
M2-12Э	MO20	ТУ 2-037-325-82	Электрошлифование твердого сплава и твердого сплава совместно со сталью
M3-01	MШ2	ТУ 2-037-156-77	Обработка хрусталя
M3-02	M7	ТУ 2-037-251-79	Обработка технического и сортового стекла
M3-03	MB2	ТУ 2-037-137-74	Обработка листового стекла
M3-04	MН1	ТУ 2-037-257-79	Обработка технического стекла, подшлифовка и огранка природных алмазов
M3-07	–	ТУ 2-037-317-81	Обработка кромки сортовой посуды
M3-08	–	ТУ 2-037-322-82	Обработка технического стекла, подшлифовка и огранка алмазов
M3-10	M25	ТУ 2-037-330-82	Обработка алмаза
M3-16	MO8	СТП 90.620-85	Обработка стекла
M4-01	–	гальваническая	Обработка металлических и неметаллических материалов
M5-01	M73	ТУ 2-037-65-79	Хонингование закалённых легированных сталей
M5-02	MК1		Хонингование закаленных чугунов
M5-03	MК2		Хонингование чугунов
M5-04	MC1	ТУ 2-037-147-75	Хонингование незакаленных сталей и чугунов
M5-05	MC-3M	ТУ 2-037-160-75	Хонингование легированных сталей
M5-06	MК3	ТУ2-037-294-80	Хонингование серых и легированных чугунов
M5-07	MC15	ТУ2-037-139-75	Хонингование легированных сталей
M5-08	M13	ТУ 2-037-122-79	Хонингование закаленных сталей
M5-09	M28	ТУ 2-037-269-81	Хонингование черное чугун
M5-10	M29	ТУ 2-037-269-81	
M5-11	M29-1	ТУ 2-037-269-81	Хонингование чистое чугун
M5-12	M17	ТУ 2-037-145-79	Хонингование нежестких деталей из чугунов и закаленных сталей
M5-13	M23	ТУ 2-037-311-81	Обработка незакаленных и закаленных сталей

1	2	3	4
М5-14	М24	ТУ 2-037-311-81	Обработка азотированных сталей
М6-03	–	ТУ 2-037-261-79	Обработка твердых пород средней крепости
М6-04	–	ТУ 2-037-261-79	Резка прочных твердых пород
М6-05	–	ТУ 2-037-356-82	Обработка гранитов
М6-10	–	ТУ 2-037-357-81	Обработка мраморов повышенной абразивности
М6-11	МГС	–	Сверление отверстий в бетонных и железобетонных конструкциях марок до 800
М6-12	МЖМ	–	Сверление отверстий в бетонных и железобетонных конструкциях марок 300. Обработка железобетонных блоков
М6-13	МНТ-2	–	
М6-14	МЖ	СТП 90.502-85	Обработка камня
М6-16	МОЗ	СТП 90.935-85	
В1-01	БП2	ТУ 2-037-85-72	Шлифование высокопроизводительного твердого сплава
В1-02	Б156	ТУ 2-037-207-77	Шлифование твердого сплава и твердого сплава совместно со сталью
В1-03	БП3	ТУ 2-037-491-84	Шлифование и электрошлифование изделий из твердых сплавов, сталей, жаропрочных сплавов
В1-04	Б2	СТП ИСМ 460-77	Шлифовальные профильные
В1-05	–	ТУ 2-037-334-82	Обработка мелкогабаритных фрез
В1-06	БС	ТУ 2-037-150-77	Обработка твердых сплавов, сталей и жаропрочных сплавов в режиме механо- и электрошлифования
В1-07	ИМ-1	ТУ 2-037-227-79	Обработка твердых сплавов с охлаждением и без, обработка СТМ
В1-08	ИМ-2	ТУ 2-037-282-81	Обработка твердого сплава и резцов с композитом 01
В1-09	БСТ	ТУ 2-037-264-79	Заточка инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов и инструментальных сталей
В1-10	ТО2	ТУ 2-037-347-82	Шлифование, заточка и доводка твердосплавного инструмента
В1-13	ВС8	СТП 90.1126-87	
В1-111 В1-112	В1-11П-1 В1-11П-2		Заточка и доводка деревообрабатывающего твердосплавного инструмента на повышенных режимах с охлаждением и без него

1	2	3	4
V2-01	Б1	ТУ 2-037-207-77	Шлифование чистовое и доводка твёрдосплавного инструмента с охлаждением и без него
V2-02	О1	ТУ 2-037-124-80	Обработка твёрдого сплава, твёрдого сплава совместно со сталью чугуна и стали и некоторых неметаллических материалов при силовом шлифовании
V2-03	ЛБЗ	ТУ 2-037-375-82	Заточка и доводка твердого сплава
V2-04	ВС	ТУ 2-037-437-83	
V2-07	Б8	СТП 90.460-85	
V2-08	Б11	СТП 90.460-85	Шлифование без охлаждения
V3-01	БР	ТУ 2-037-63-79	Доводка твердого сплава, закаленных сталей и металлографических шлифов
V3-01-1	БР1	СТП 90.460-85	
V3-02	МПБ	ТУ 2-037-278-81	Резка полупроводниковых материалов с охлаждением
K1-01	K1	ТУ 2-037-141-75	Заточка твёрдосплавного инструмента со стальной державкой, шлифование быстрорежущих сталей
K3-01	СК1	ТУ 2-037-285-80	Обработка жаростойких сталей, суперфиниширование роликов подшипников

Индексация связок ОАО НПК «Абразивы и шлифование» (Россия) для кругов из алмазов и КНБ при различных условиях шлифования [89]:

полимерные связки для кругов из алмазов:

D20 – универсальная, для всех типов кругов, работа с охлаждением и без, имеет высокую режущую способность и низкую мощность шлифования, используется там, где стойкость круга не имеет лимитирующего значения;

D21 – для узкокрючочных кругов, в том числе для работы на оптико-шлифовальных станках, износостойкость средняя;

D22 – универсальная, но в отличие от D20 имеет большую износостойкость и выпускается по твердости как М (мягкая), С (средняя) и Т (твердая);

D23 – для станков с автоматической подачей и кругов типа 1А1, 12А2-45, 6А2 и др. с охлаждением, износостойкость средняя, твердости С и Т;

D24 – для отрезных кругов, работающих с охлаждением, и для глубинного шлифования с интенсивным охлаждением, твердость – Т;

D25 – для работы без охлаждения на станках с ручной подачей, износостойкость выше чем у D22, твердость М, С и Т;

D26 – для работы в режиме глубинной заточки и профильного шлифования при глубине резания – 0,2...0,3 мм/ход, твердость Т, иногда С;

D27 – износостойкая для шлифования режущей и конструкционной керамики кругами формы 1А1 и отрезными;

D28 – для шлифования поликристаллов СА и КНБ;

D30 – для отрезных кругов, работающих без охлаждения.

полимерные связки для кругов из КНБ:

B24 – износостойкая, для глубинного шлифования на станках с ЧПУ с интенсивным охлаждением и скоростью вращения круга до 45 м/с;

B25 – для кругов, работающих без охлаждения, твердостью М и С;

B26 – для кругов, работающих с охлаждением при профильном шлифовании, а также универсальная для кругов прямого профиля твердостью С и Т.

У кругов фирмы «Wendt» (ФРГ) неметаллические связки имеют обозначение B31N, или B31R, или B31J, где R – твердая связка, N – средняя, J – мягкая.

CBN Wheel Bond Systems – связки кругов из кубического нитрида бора. Выпуск шлифовальных кругов CBN на разных связках в мире, в % [57]: где: *Resin* – полимерные связки на основе смол, *Metal* – металлические связки, *Vitrified* – керамические связки, *Single Layer* – однослойный (гальванический) инструмент.

Связка	1980 год	2000 год	Зернистость CBN
<i>Resin</i>	76	27	Средние и мелкие зерна
<i>Metal</i>	10	11	Средние и мелкие зерна
<i>Vitrified</i>	4	35	Большие зерна
<i>Single Layer</i>	10	27	Большие зерна

Анализ таблицы показывает, что общей тенденцией в использовании шлифовальных кругов из CBN, которая может быть спрогнозирована на период после 2000 года, является снижение доли полимерных связок и за счет этого возрастание доли керамических связок для кругов из CBN, а также увеличение доли использования гальванического инструмента.

Металлические связки (*metal bond*)

Система Cu–Sn–НТМ – система, характерная для металлических композитов типа M2-01 рабочего слоя шлифовальных или правящих инструментов. В работе [90] исследовалась неспеченная связка M2-01 и вза-

имодействие в ней при нагреве. Установлено, что при нагреве в 220 °С формируется η -фаза (Cu_6Sn_5), в диапазоне 230–250 °С формируется ε -фаза (Cu_3Sn), в диапазоне 360–340 °С формируется δ -фаза ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$), в диапазоне 510–550 °С формируется β -фаза (Cu_5Sn), а при температурах более чем 740 °С происходит плавление электронного соединения – Cu_6Sn_5 .

В работе [91] изучали систему Cu–Sn–алмаз, характерную для металлических композитов типа M2-01 рабочего слоя алмазных шлифовальных или правящих инструментов. В системе Cu–Sn при комнатной температуре присутствуют α - (твердый раствор олова и меди) и δ ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$)-фазы. Технологический процесс спекания такой системы требует повышенной температуры. При температуре свыше 520 °С образуется β -фаза (Cu_5Sn). При охлаждении β -фаза фиксируется, не успевая разложиться. Поэтому в исходном состоянии связка содержит в своем составе α -, β - и δ -фазы [91].

Система Cu–Sn–Pb – металлический композит, структура которого формируется в основном на стадии его спекания, когда происходит его уплотнение и некоторый рост зерен. Механизм взаимодействия в системах Cu–Sn–Pb возможно представить следующим образом. Медь и свинец практически не взаимодействуют, не образуют ни твердых растворов, ни химических соединений. Система Cu–Sn является системой с химическим типом взаимодействия. Согласно диаграмме состояния в ней образуется α -твердый раствор и химические соединения, стабильные в разных температурных интервалах. Поэтому, взаимодействие в системе Cu–Sn–Pb должно быть обусловлено взаимодействием олова с медью. В процессе спекания интерметаллиды в системе не образуются. Формируется α -твердый раствор олова в меди с разной концентрационной неоднородностью при 300, 500 и 600 °С. При 750 °С неоднородность исчезает и образуется гомогенный твердый раствор с соответствующим параметром решетки. Механизм взаимодействия и образования структуры можно представить следующим образом. Жидкая фаза, появляющаяся вследствие плавления легкоплавкого олова, смачивает медь и растекается по поверхности частичек меди, диффундируя в них. Это приводит к образованию медно-оловянного α -твердого раствора. С повышением температуры спекания наряду с α -твердым раствором возникает жидкая фаза, образовавшаяся вследствие плавления свинца при 327 °С. Повышение температуры спекания вызывает коагуляцию частичек свинца. С этим процессом связана и рекристаллизация матрицы. До температуры спекания 650 °С матрица остается достаточно мелкозернистой. Ощутимая рекристаллизация, а также коагуляция свинца наблюдается при 750 °С. Микротвердость твердого раствора зависит от концентрации олова и температуры спекания и возрастает с их увеличением. Спекание при температурах до 500 °С практически не влияет на плотность образцов. Пористость прессованных образцов снижается в процессе

их спекания при более высоких температурах (650–750 °С). После спекания образцов Cu–Sn–Pb при температуре более 500 °С их твердость возрастает [92].

M1-01 (MB1) – металлическая связка на основе алюминия, содержащая также небольшую часть магния. Структура состоит из α_1 -твердого раствора меди в алюминии, эвтектики ($\alpha_1 + \text{CuAl}$), α_2 -твердого раствора олова в меди, эвтектоида $\alpha_2 + \delta(\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8)$, α_3 -твердого раствора цинка в алюминии, твердого раствора титана в алюминии и твердого раствора цинка в меди. Кристаллы кремния, разные по величине и форме, находятся в связке в виде отдельных включений. Небольшие примеси магния (0,6 %) снижают скорость распада твердого раствора цинка в алюминии с дальнейшим образованием эвтектоида со сниженным содержанием цинка [93].

Свойства: твердость, *HRB* – 87 ± 5 [71]; модуль упругости, ГПа – 72 [94]; предел прочности при изгибе, МПа – 150 ± 28 ; предел прочности при сжатии, МПа – 470 ± 33 ; предел прочности при срезе, МПа – $34,3 \pm 3,9$; ударная вязкость, кДж/м² – $2,7 \pm 0,2$; усилие вырыва зерна из связки, Н – $6,66 \pm 0,39$ [95]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 15 [96]; электропроводность, м/(Ом·мм²) – 4–5 [97]; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,95 [71]; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град⁻¹ – $12,9 \pm 0,2$ [95].

M1-04 (MO4) – металлическая связка на основе алюминия. В отличие от M1-01 содержит меньше алюминия и больше титана. Структура состоит из α_1 -твердого раствора меди в алюминии, эвтектики ($\alpha_1 + \text{CuAl}_2$), α_2 -твердого раствора алюминия в меди, α_3 -твердого раствора цинка в меди, а также мягкой механической смеси алюминия и олова. Кристаллы кремния, разные по величине и форме, находятся в связке в виде отдельных включений. Их микротвердость составляет 8300–9500 МПа. Нитрид бора присутствует в небольшом количестве и действует как твердая смазка. Для спекания не нужна восстанавливающая или защитная среда. Из-за относительно низких температур спекания (500–600 °С) и давления горячей допрессовки (60 МПа) в качестве материала прессформы может быть использован чугун или сталь 3Х2В8 [93]. Состав (масс. %): порошок медный (ПМС-2) – 30,0, порошок алюминиевый (ПА4) – 36,0, порошок цинковый – 19,0, нитрид бора – 4,0, порошок титановый ПТК – 1,5, порошок оловянный – 4,0, кремний кристаллический – 5,5. Режимы изготовления: давление брикетирования, МПа – 250 ± 10 , температура в печи при загрузке, °С – 500 ± 10 , нагрев прессформы в печи до температуры спекания, °С – 500 ± 10 , выдержка при температуре спекания, мин – 60, давление горячей допрессовки, МПа – 100 ± 5 , охлаждение прессформы при давлении горячей допрессовки до температуры не более 400 °С [98].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 4,12; твердость, *HRB* – 86±7 [71]; предел прочности при изгибе, МПа – 140±5,9; предел прочности при сжатии, МПа – 480±30; предел прочности при срезе, МПа – 17,6±2,0; ударная вязкость, кДж/м² – 2,7±0,3 [95]; прочность алмазоудержания, МПа – 167,6 [99]; усилие вырыва зерна из связки, Н – 7,25±0,20; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град⁻¹ – 14,1±0,9 [95]; удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) – 550 [71]; температуропроводность, $\cdot 10^{-4}$ м²/с – 0,16; теплопроводность, Вт/(м·К) – 83,3 [100]; скрытая теплота плавления, кДж/кг – 182; температура плавления, К – начальная – 688, конечная – 783; удельное электросопротивление 10^{-6} мкОм·м – 0,055±0,003, коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,91; электрохимические эквиваленты: массовый, 10^{-6} кг/(А·с) – 0,200 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,485; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – 0,168±0,004 и 45 – 0,212±0,014, твердым сплавам ВК8 – 0,148±0,006 и Т15К6 – 0,197±0,003, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – 0,154±0,008 и ТН20 – 0,188±0,014, керамикам ВОК60 – 0,191±0,010 и ВО13 – 0,199±0,007 [71].

М1-05 (МО13) – металлическая связка на основе алюминия. Наличие в ее составе 33 % алюминия соответствует эвтектическому составу (α_1 +CuAl₂) системы алюминий–медь, а из-за частичного распада α_1 -твердого раствора по границам зерен возможным является образование фазы CuAl₂. Олово и титан в связке отсутствуют. Структура связки крайне неоднородна. Наряду с крупнозернистыми зонами существуют области с раздробленной структурой. Присутствие карбида бора наряду с кремнием содействует повышению удерживающих свойств связки. Микротвердость отдельных областей связки составляет 3000–3250 МПа. Общая твердость связки составляет 1550 МПа. Для спекания не требуется восстановительной или защитной среды. Из-за относительно низких температур спекания (500–600 °С) и давления горячей допрессовки (60 МПа) в качестве материала прессформы можно использовать чугун или сталь 3Х2В8 [93]. Состав (масс. %): порошок медный (ПМС–2) – 25,0, порошок алюминиевый (ПА4) – 35,0, порошок цинковый – 15,0, карбид бора – 20,0, кремний кристаллический – 5,0. Режим изготовления: давление брикетирования, МПа – 250±10, температура в печи при загрузке, °С – 560±10, нагрев прессформы в печи до температуры спекания, °С – 560±10, выдержка при температуре спекания, мин – 60, давление горячей допрессовки, МПа – 100±5, охлаждение прессформы при давлении горячего прессования до температуры не более 400 °С [98].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 3,5±0,1 [101]; твердость, *HRB* – 95±4 [71]; модуль упругости, ГПа – 69,4 [102]; предел прочности при изгибе, МПа – 158,8±5,9; предел прочности при сжатии, МПа – 460,6±24,5;

предел прочности при срезе, МПа – $36,3 \pm 2,9$; ударная вязкость, кДж/м^2 – $2,4 \pm 0,2$ [95]; прочность алмазоудержания, МПа – 184,2 [99]; усилие вырыва зерна из связки, Н – $7,94 \pm 0,20$; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ – $7,5 \pm 1,5$ [95]; температуропроводность, $\cdot 10^{-4}$ м 2 /с – 0,076; теплопроводность, Вт/(м·К) – 63,8 [100]; удельное электросопротивление, $\cdot 10^{-6}$ мкОм·м – $0,085 \pm 0,003$, коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,75; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,166 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м 3 /(А·с) – 0,468; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – $0,276 \pm 0,010$ и 45 – $0,261 \pm 0,006$, твердым сплавам ВК8 – $0,188 \pm 0,011$ и Т15К6 – $0,284 \pm 0,007$, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – $0,316 \pm 0,013$ и ТН20 – $0,306 \pm 0,010$, керамикам ВОК60 – $0,160 \pm 0,011$ и ВО13 – $0,270 \pm 0,013$ [71].

М1-10 (МО4-2) – металлическая связка на основе алюминия. Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м 3 – 4,47; твердость, *HRB* – 92 ± 6 [71]; модуль упругости, ГПа – 63,0; предел прочности при изгибе, МПа – 71; предел прочности при сжатии, МПа – 230; предел прочности при растяжении, МПа – $3,98 \pm 0,8$; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ – 25,1 [102]; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,91; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,288 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м 3 /(А·с) – 0,510 [71].

М2-01 (М1) – металлическая связка на медно-оловянной основе. Структура состоит из α -фазы (твердого раствора олова в меди) микротвердостью 1700 МПа и β -фазы (электронного соединения Cu_5Sn), микротвердостью которой составляет 3000 МПа. На диаграмме равновесия область существования β -фазы находится в интервале температур 586–798 °С [93]. Состав (масс. %): порошок медный (ПМС-2) – 80,0, порошок оловянный (ПО-1) – 20,0. Режим изготовления: давление брикетирования, МПа – 300 ± 10 , температура спекания в среде водорода, °С – 750 ± 10 , выдержка при температуре спекания, мин – 60, давление горячей допрессовки, МПа – 70 ± 5 , охлаждение прессформы при давлении горячей допрессовки до температуры не более 300 °С [103].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м 3 – 8,52; твердость, *HRB* – 87 ± 6 [71]; модуль упругости, ГПа – 105; предел прочности при изгибе, МПа – 515 [102]; предел прочности при сжатии, МПа – 813 ± 15 [95]; предел прочности при растяжении, МПа – 19,82 [102]; предел прочности при срезе, МПа – $88,2 \pm 4,9$; ударная вязкость, кДж/м^2 – $15,7 \pm 0,9$; усилие вырыва зерна из связки, Н – $7,04 \pm 0,39$ [95]; прочность алмазоудержания, МПа – 186,2 [83, 99, 104]; относительная осадка при сжатии, % – 13 [83]; температуропроводность, $\cdot 10^{-4}$ м 2 /с – 0,065; теплопроводность, Вт/(м·К) – 27,0 [100]; удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) – 400; скрытая теплота плавления, кДж/кг – 100; температура плавления, К – начальная – 1048, конечная –

1058 [71]; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ – 16,2±0,8 [95]; удельное электросопротивление, $\cdot 10^{-6}$ мкОм·м – 0,040±0,002; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 1,0; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,325 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м 3 /(А·с) – 0,381 [71]; электропроводность, м/(Ом·мм 2) – 1,8–2,0 [97]; коэффициент трения по: сталям Р6М5 – 0,103±0,011 и 45 – 0,026±0,001, твердым сплавам ВК8 – 0,058±0,005 и Т15К6 – 0,072±0,006, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – 0,077±0,004 и ТН20 – 0,049±0,004, керамикам ВОК60 – 0,047±0,005 и ВО13 – 0,041±0,003 [71].

М2-09 (МО16) – металлическая связка на основе медь–олово–сурьма. Состав (масс. %): порошок медный (ПМС2) – 67,0, порошок оловянный (ПО-1) – 18,0, сурьма – 12,0, нитрид бора гексагональный – 2,5, кадмий серноокислый – 0,5. Режим изготовления: давление брикетирования, МПа – 200±10, температура в печи при загрузке прессформы, °С – 680±20, нагрев прессформы с образцами в печи до температуры спекания, °С – 650±20, выдержка при температуре спекания, мин – 60±5, давление горячей допрессовки, МПа – 130±5, охлаждение прессформы при давлении горячей допрессовки до температуры, °С – 500 [105].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м 3 – 7,71; твердость, *HRB* – 96±4 [71]; модуль упругости, ГПа – 97,8; предел прочности при изгибе, МПа – 124; предел прочности при сжатии, МПа – 373 [102]; ударная вязкость, кДж/м 2 – 3,5 [64]; удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) – 350; скрытая теплота плавления, кДж/кг – 40; температура плавления, К – начальная – 928, конечная – 958 [71]; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ – 24,0 [102]; удельное электросопротивление, $\cdot 10^{-6}$ мкОм·м – 0,110±0,004; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,97; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,316 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м 3 /(А·с) – 0,410 [71].

М2-12Э (МО20) – металлическая связка на основе медь–олово–сурьма. Состав (мас. %): порошок медный (ПМС-2) – 62,0, порошок оловянный (ПО1) – 17,0, сурьма – 9,0, нитрид бора – 4,0, барий селенистоокислый – 1,0, глинозем (ГН-1) – 7,0. Режим изготовления: давление брикетирования, МПа – 200±10, температура в печи при загрузке, °С – 680±10, нагрев прессформы в окислительной среде до температуры, °С – 650±10, выдержка при температуре спекания, мин – 60, давление горячей допрессовки, МПа – 130±5 [106].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м 3 – 7,3; твердость, *HRB* – 96±6 [71]; модуль упругости, ГПа – 105,4; предел прочности при изгибе, МПа – 123; предел прочности при сжатии, МПа – 392; предел прочности при растяжении, МПа – 3,15 [102]; удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) – 300; скрытая теплота плавления, кДж/кг – 83; температура плавления, К – начальная –

933, конечная – 953; удельное электросопротивление, $\cdot 10^{-6}$ мкОм·м – $0,115 \pm 0,005$; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,88; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,290 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,397; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – $0,110 \pm 0,009$ и 45 – $0,058 \pm 0,005$, твердым сплавам ВК8 – $0,084 \pm 0,010$ и Т15К6 – $0,083 \pm 0,007$, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – $0,098 \pm 0,004$ и ТН20 – $0,067 \pm 0,001$, керамикам ВОК60 – $0,090 \pm 0,005$ и ВО13 – $0,078 \pm 0,003$ [71].

М3-16 (МО8) – металлическая связка на медно-оловянной основе. Состав (масс. %): порошок медный (ПМС-2) – 79,0, порошок оловянный (ПО1) – 20,0, железо трехфтористое – 1,0. Режим изготовления: давление брикетирования, МПа – 300 ± 10 , температура в печи при загрузке, °С – 600 ± 20 , нагрев прессформы в среде водорода до температуры, °С – 750 ± 10 , выдержка при температуре спекания, мин – 60 ± 2 , давление горячей допрессовки, МПа – 70 ± 5 [107].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 8,52; твердость, *HRB* – 94 ± 3 [107]; модуль упругости, ГПа – 112,8; предел прочности при изгибе, МПа – 505; предел прочности при сжатии, МПа – 522; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град⁻¹ – 25,7 [102]; удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) – 400; скрытая теплота плавления, кДж/кг – 108; температура плавления, К: начальная – 1043, конечная – 1053; удельное электросопротивление, $\cdot 10^{-6}$ мкОм·м – $0,041 \pm 0,003$; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,97; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,316 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,371; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – $0,164 \pm 0,009$ и 45 – $0,035 \pm 0,002$, твердым сплавам ВК8 – $0,054 \pm 0,004$ и Т15К6 – $0,121 \pm 0,008$, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – $0,088 \pm 0,008$ и ТН20 – $0,084 \pm 0,004$, керамикам ВОК60 – $0,046 \pm 0,008$ и ВО13 – $0,031 \pm 0,003$ [71].

М6-14 (МЖ) – связка на основе железа для камнеобрабатывающего инструмента. Состав (масс. %), порошки: железа – 51, медный (ПМС-2) – 32, оловянный (ПО-1) – 8,0, никеля – 9,0. Режим изготовления: давление брикетирования, МПа – 400 ± 10 , нагрев прессформы в печи в среде водорода до температуры спекания, °С – 830 ± 10 , выдержка при температуре спекания, мин – 60, давление горячей допрессовки, МПа – 150 ± 5 , охлаждение прессформы при давлении горячей допрессовки до температуры, °С – 500 [108]. Структура связки состоит из железосодержащей фазы переменного состава (52–92 % Fe, 4–9 % Ni, 3–29 % Cu), твердого раствора Sn, Fe, Ni в меди (5% Cu, 2% Fe, 4% Ni), а также эвтектоида (39 % Cu, 37 % Sn, 21 % Ni, 3 % Fe). Микротвердость железосодержащих участков

3136–3332, медьсодержащей фазы – 1568–3136 и эвтектоида – 3332–6076 МПа [109].

Свойства: твердость, *HRB* – 102 [83, 104]; модуль упругости, ГПа – 148 [110]; предел прочности при изгибе, МПа – 1010; предел прочности при сжатии, МПа – 1570 [83]; ударная вязкость, кДж/м² – 29,5–61,4 [94]; относительная осадка при сжатии, % – 11; прочность алмазоудержания, МПа – 240 [83]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 42,5 [111]; коэффициент трения по стеклу – 0,26 [112].

М6-15 (МЗ) – связка на основе меди для камнеобрабатывающего инструмента. Состав (масс. %): порошок медный (ПМС-2) – 81, порошок оловянный (ПО-1) – 14,0, порошок Fe₂O₃ – 5,0. Режим изготовления: давление брикетирования, МПа – 300±10, нагрев прессформы в среде водорода до температуры спекания, °С – 750±10, выдержка при температуре спекания, мин – 60, давление горячей допрессовки, МПа – 700±5 [108].

Свойства: твердость, *HRB* – 84; предел прочности при изгибе, МПа – 690; предел прочности при сжатии, МПа – 1310; ударная вязкость, кДж/м² – 88; относительная осадка при сжатии, % – 27; прочность алмазоудержания, МПа – 210 [83].

М6-16 (МОЗ) – связка на основе кобальта для камнеобрабатывающего инструмента. Состав (масс. %): порошок кобальтовый – 93,0, порошок кадмия – 6,0, железо сернистое (сплав) для аналитических работ – 1,0. Режим изготовления: давление брикетирования, МПа – 500±10, нагрев прессформы в печи в среде водорода до температуры спекания, °С – 830±10, выдержка при температуре спекания, мин – 60, давление горячей допрессовки, МПа – 280±5, охлаждение прессформы при давлении горячей допрессовки до температуры, °С – 500 [108].

Свойства: плотность, ·10³ кг/м³ – 8,8 [71]; твердость, *HRB* – 98–103 [104]; модуль упругости, ГПа – 193,7 [94, 102]; предел прочности при изгибе, МПа – 1180; предел прочности при сжатии, МПа – 1860 [83]; ударная вязкость, кДж/м² – 66 [83, 94]; относительная осадка при сжатии, % – 23; прочность алмазоудержания, МПа – 270 [83]; КЛТР, ·10⁻⁶ град⁻¹ – 21,0 [102]; удельное электросопротивление, ·10⁻⁶ мкОм·м – 0,030±0,002; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,99; электрохимические эквиваленты: массовый, ·10⁻⁶ кг/(А·с) – 0,320 и объемный, ·10⁻¹⁰ м³/(А·с) – 0,364; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – 0,332±0,009 и 45 – 0,378±0,014, твердым сплавам ВК8 – 0,339±0,010 и Т15К6 – 0,320±0,009, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – 0,290±0,011 и ТН20 – 0,347±0,008; керамикам ВОК60 – 0,121±0,011 и ВО13 – 0,333±0,010 [71].

МО13Э – металлическая связка на основе медь-алюминий-цинк для электрошлифования. Состав (мас. %): порошок медный (ПМС-2) – 40,0, порошок алюминиевый (ПА4) – 34,5, порошок цинковый – 15,0, карбид бора – 5,0, кремний кристаллический – 5,0. Режим изготовления: давление брикетирования, МПа – 200 ± 10 , температура в печи при загрузке, °С – 560 ± 10 , нагрев прессформы в печи до температуры спекания, °С – 560 ± 10 , выдержка при температуре спекания, мин – 60, давление горячей допрессовки, МПа – 100 ± 5 , охлаждение прессформы при давлении горячей допрессовки до температуры не более 400 °С [98].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 4,2; твердость, *HRB* – 103 ± 4 [71]; модуль упругости, ГПа – 90,1; предел прочности при изгибе, МПа – 109; предел прочности при сжатии, МПа – 397 [102]; удельное электросопротивление, $\cdot 10^{-6}$ мкОм·м – $0,076 \pm 0,009$, коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,95; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,140 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,333; скрытая теплота плавления, кДж/кг – 218; температура плавления, К: начальная – 723, конечная – 813; удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) – 550; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – $0,245 \pm 0,013$ и 45 – $0,224 \pm 0,019$, твердым сплавам ВК8 – $0,168 \pm 0,004$ и Т15К6 – $0,196 \pm 0,004$, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – $0,130 \pm 0,008$ и ТН20 – $0,122 \pm 0,003$, керамикам ВОК60 – $0,214 \pm 0,010$ и ВО13 – $0,202 \pm 0,008$ [71].

МО20-2 – металлическая связка для процессов электрошлифования на основе меди, олова, сурьмы и стекла.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 6,93; твердость, *HRB* – 105 ± 5 [71]; модуль упругости, ГПа – 80; предел прочности при изгибе, МПа – 119; предел прочности при сжатии, МПа – 677; предел прочности при растяжении, МПа – 4,92; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град⁻¹ – 25,3 [102]; удельное электросопротивление, $\cdot 10^{-6}$ мкОм·м – 0,223–0,239, коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,88; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,282 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,407; скрытая теплота плавления, кДж/кг – 63; температура плавления, К: начальная – 928, конечная – 963; удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) – 300; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – $0,176 \pm 0,006$ и 45 – $0,037 \pm 0,002$, твердым сплавам ВК8 – $0,064 \pm 0,004$ и Т15К6 – $0,094 \pm 0,005$, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – $0,097 \pm 0,003$ и ТН20 – $0,067 \pm 0,006$, керамикам ВОК60 – $0,082 \pm 0,004$ и ВО13 – $0,055 \pm 0,004$ [71].

МС6 – металлическая связка на медно-оловянной основе. Структура состоит из α -фазы (твердого раствора олова в меди) и β -фазы (электронного соединения Cu_5Sn), а также эвтектоида $\alpha + \beta$ [93]. Структура – α +эвтектид+высокотемпературная твердая смазка [113]. Состав (масс. %): поро-

шок медный (ПМС-2) – 68,0, порошок оловянный (ПО-1) – 17,0, кальций фтористый – 15,0. Режим изготовления: давление брикетирования, МПа – 200±10, нагрев прессформы в печи до температуры спекания, °С – 760±10, выдержка при температуре спекания, мин – 60±5, давление горячей допрессовки, МПа – 100±10, охлаждение прессформы при давлении горячей допрессовки до температуры, °С – 400 [114].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 7,92; твердость, *HRB* – 92±3 [71]; твердость, *HB* – 120–128 [113]; модуль упругости, ГПа – 104,2 [102]; предел прочности при изгибе, МПа – 368,5±8,8 [95]; предел прочности при сжатии, МПа – 830 [102]; предел прочности при срезе, МПа – 76,5±4,9; ударная вязкость, кДж/м² – 9,21±0,49; усилие вырыва зерна из связки, *H* – 7,84±0,59 [95]; прочность алмазодержания, МПа – 181,3 [99]; температуропроводность, $\cdot 10^{-4}$ м²/с – 0,056; теплопроводность, Вт/(м·К) – 36,6 [100]; удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) – 400; скрытая теплота плавления, кДж/кг – 32; температура плавления, К: начальная – 1048, конечная – 1083 [71]; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град⁻¹ – 13,5±1,4 [95]; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,85; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,292 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,369 [71]; коэффициент трения по стеклу – 0,44 [112]; коэффициент трения по твердому сплаву ВК6 – 0,041 [115]; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – 0,071±0,019 и 45 – 0,023±0,002, твердым сплавам ВК8 – 0,051±0,004 и Т15К6 – 0,060±0,007, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – 0,108±0,006 и ТН20 – 0,050±0,005, керамикам ВОК60 – 0,049±0,004 и ВО13 – 0,067±0,008 [71].

Полимерные связки (*resin*)

Связки, у которых в качестве связующего используют фенольное связующее, относят к полимерным. При изготовлении абразивных кругов применяют фенольные связующие следующих марок: СФП-011А для холодного прессования (6,5–7,5 % уротропина) и СФП-0119А для горячего прессования (8,5–9,5 % уротропина $C_6H_{12}N_4$ и 5 % поливинилбутирала $C_{10}H_{18}O_3$). Фенольное связующее представляет собой светлые порошки с размерами частичек 63–80 мкм. Фенольная смола у абразивной смеси под влиянием температуры плавится, далее реагирует с уротропином, происходит реакция поликонденсации с выделением летучих газов, макромолекулы сшиваются в трехмерный полимер и изделие остается в монолитном нерасплавленном состоянии. Уротропин (гексаметилентетрамин) выполняет роль отвердителя при переработке абразивной смеси. Под действием температуры он разлагается на аммиак NH_3 , служащий катализатором ре-

акции поликонденсации, и формальдегид CH_2O «сшивающий» молекулярные цепи в трехмерное вещество [116].

В1-01 (БП2) – металлополимерная связка состава (без покрытия зерен при 100%-ной относительной концентрации зерен СТМ) (масс. %): смола фенолформальдегидная твердая – 6,2, порошок медный – 63,6, порошок висмута – 30,2 или (об. %): фенольное связующее СФП-012А – 33,3, порошок медный электролитический – 46,7, висмут – 20,0.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 7,7; твердость, *HRB* – 35 ± 5 [71]; предел прочности при изгибе, МПа – 80 ± 9 ; предел прочности при сжатии, МПа – 130 ± 13 [117]; предел прочности при растяжении, МПа – 3,58 [102]; ударная вязкость, кДж/м^2 – $2,8 \pm 0,3$ [117]; теплопроводность, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – 1,3; удельная теплоемкость, $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ – 0,30; температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$ – 64 [118]; электропроводность, $\text{м/(Ом}\cdot\text{мм}^2)$ – 0,06 [97]; КЛТР, $\cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ – 21,5 [102]; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6} \text{ кг/(А}\cdot\text{с)}$ – 0,427 и объемный, $\cdot 10^{-10} \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с)}$ – 0,555; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,94; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – $0,069 \pm 0,004$ и 45 – $0,082 \pm 0,002$, твердым сплавам ВК8 – $0,100 \pm 0,005$ и Т15К6 – $0,069 \pm 0,002$, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – $0,072 \pm 0,008$ и ТН20 – $0,102 \pm 0,007$, керамикам ВОК60 – $0,070 \pm 0,002$ и ВО13 – $0,103 \pm 0,003$ [71].

В1-02 (Б156) – металлополимерная связка состава (без покрытия зерен при 100%-ной относительной концентрации) (масс. %): смола фенолформальдегидная твердая – 6,5, порошок медный – 69,5, порошок олова – 24,0 или (об. %): фенольное связующее СФП-012А – 30, порошок медный электролитический – 40, порошок олова – 20, карбид бора – 10.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 6,01; твердость, *HRB* – 49 ± 5 [71]; модуль упругости, ГПа – 31,2; предел прочности при изгибе, МПа – 75 ± 7 ; предел прочности при сжатии, МПа – 110 ± 13 [117]; предел прочности при растяжении, МПа – 3,68 [102]; ударная вязкость, кДж/м^2 – $2,6 \pm 0,3$ [117]; теплопроводность, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – 0,80; удельная теплоемкость, $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ – 0,25; температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$ – 65 [118]; удельное электросопротивление, $\cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – $0,044 \pm 0,008$; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,94; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6} \text{ кг/(А}\cdot\text{с)}$ – 0,303 и объемный, $\cdot 10^{-10} \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с)}$ – 0,504 [71]; коэффициент трения по твердому сплаву Т15К6 – 0,27 [115].

В1-03 (БП3) – металлополимерная связка состава (без покрытия зерен при 100%-ной относительной концентрации) (масс. %): смола фенолформальдегидная твердая – 8,0, порошок медный – 69,2, порошок висмута – 22,2, канифоль – 0,6.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 5,95; твердость, *HRB* – 44±4 [71]; предел прочности при изгибе, МПа – 65,4 [97]; предел прочности при растяжении, МПа – 3,37 [102]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,80; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 0,40; температуропроводность, м²/с – 41 [118]; электропроводность, м/(Ом·мм²) – 1,85 [97]; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,91; электрохимические эквиваленты, массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,388 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,652 [71].

В1-10 (ТО2) – металлополимерная связка состава (без покрытия зерен при 100%-ной относительной концентрации) (масс. %): смола фенолформальдегидная твердая – 29,3, порошок медный – 60,0, карбид бора – 10,7 или (об. %): фенольное связующее СФП-012А – 66,7, порошок медный электролитический – 20, карбид бора – 13,4.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 2,95; твердость, *HRB* – 44±4 [71]; модуль упругости, ГПа – 20,8; коэффициент Пуассона – 0,395 [102]; предел прочности при изгибе, МПа – 81±6; предел прочности при сжатии, МПа – 136±14 [117]; предел прочности при растяжении, МПа – 2,99 [102]; ударная вязкость, кДж/м² – 2,5±0,3 [117]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 2,09; температуропроводность, $\cdot 10^6$ м²/с – 0,011; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град⁻¹ – 20,6–24,0 [115]; удельное электросопротивление, $\cdot 10^{-6}$ Ом·м – 0,450±0,030; коэффициент содержания электропроводных элементов в связке – 0,60; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,197 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,669; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – 0,056±0,004 и 45 – 0,058±0,002, твердым сплавам ВК8 – 0,064±0,003 и Т15К6 – 0,092±0,005, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – 0,058±0,002 и ТН20 – 0,113±0,005, керамикам ВОК60 – 0,074±0,003 и ВО13 – 0,111±0,003 [71].

В1-13 (ВС8) – металлополимерная связка состава (без покрытия зерен при 100%-ной относительной концентрации) (масс. %): смола фенолформальдегидная твердая марок СФ-342А или СФ-340А – 20,4, порошок медный электролитический (ПМС-1) – 69,4, нитрид бора – 5,3, гидрооксид алюминия – 4,9. Режимы изготовления: давление прессования, МПа – 30, нагрев прессформы при заданном давлении до температуры, °С – 90±7, повышение давления прессования до 50 МПа, нагрев при заданном давлении до температуры, °С – 175±7, выдержка прессформы при заданном давлении, мин – 15±3, охлаждение в воздухе до температуры, °С, не более чем – 50 [119].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 3,24; твердость, *HRB* – 54±3 [71]; модуль упругости, ГПа – 16,2; коэффициент Пуассона – 0,230; предел прочности при сжатии, МПа – 213,0; предел прочности при растяжении, МПа – 2,8; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град⁻¹ – 16,5 [102]; коэффициент содержания элек-

тропроводных элементов в связке – 0,65; электрохимические эквиваленты, массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,232 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,716; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – 0,072±0,003 и 45 – 0,107±0,002, твердым сплавам ВК8 – 0,090±0,002 и Т15К6 – 0,086±0,004, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – 0,072±0,003 и ТН20 – 0,152±0,004, керамикам ВОК60 – 0,082±0,003 и ВО13 – 0,126±0,002 [71].

В2-01 (Б1) – полимерная связка состава (без покрытия зерен при 100%-ной относительной концентрации) (масс. %): связующее (пульвербакелит) – 50, карбид бора – 50 или (об. %): фенольное связующее СФП-012А – 40–73,5, карбид бора – 26,6–60,0. Режимы изготовления: нагрев плит пресса до температуры, °С – 190±10, давление прессования, МПа – 30±5, нагрев прессформы при заданном давлении до температуры, °С – 95±5, повышение давления прессования до 60±5 МПа, нагрев при заданном давлении до температуры, °С – 180±7, выдержка прессформы при заданном давлении, мин – 15±3, охлаждение в воздухе до комнатной температуры [120].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 1,67 [118]; твердость, *HRB* – 68±6 [71]; модуль упругости, ГПа – 20,3 [115]; предел прочности при сжатии, МПа – 78±10 [117]; предел прочности при растяжении, МПа – 2,60 [102]; предел прочности при изгибе, МПа – 70–90 [64]; ударная вязкость, кДж/м² – 0,98 [115]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,55; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,150; температуропроводность, м²/с – 27 [118]; КЛТР, $\cdot 10^{-6}$ град⁻¹ – 24,7 [102]; удельное электросопротивление, Ом·м – $1,82 \cdot 10^{11}$; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – 0,097±0,003 и 45 – 0,126±0,006, твердым сплавам ВК8 – 0,112±0,003 и Т15К6 – 0,101±0,007, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – 0,065±0,003 и ТН20 – 0,088±0,004, керамикам ВОК60 – 0,092±0,008 и ВО13 – 0,091±0,003 [71].

В2-07 (Б8) – полимерная связка состава (металлическое (125 %) покрытие зерен при 100%-ной концентрации) (масс. %) – связующее (пульвербакелит) – 42,5, барий серноокислый – 41,5, тальк марки ТРПН – 16,0 или (об. %): фенольное связующее СФП-012А – 48,2, барий серноокислый – 37,0, тальк – 14,8. Режимы изготовления: нагрев плит пресса до температуры, °С, давление прессования, МПа – 30±5, нагрев прессформы при заданном давлении до температуры, °С – 95±5, повышение давления прессования до 60±5 МПа, нагрев при заданном давлении до температуры, °С – 180±7, выдержка прессформы при заданном давлении, мин – 15±3, охлаждение в воздухе до комнатной температуры [120].

Свойства: твердость, *HRB* – 50 [71]; предел прочности при изгибе, МПа – 70±10; предел прочности при сжатии, МПа – 92±13; ударная вяз-

кость, $\text{кДж/м}^2 - 1,5 \pm 0,3$ [117]; коэффициент трения по твердому сплаву Т15К6 – 0,09 [115]; удельное электросопротивление, Ом·м – $2,19 \cdot 10^{14}$ [71].

В2-08 (Б11) – полимерная связка состава (без покрытия зерен при 100%-ной относительной концентрации) (масс. %): смола фенолформальдегидная твердая марки СФ-342 – 38,7, литопон сухой марки ЛП или колчедан серный флотационный марки КСФ-1 – 38,6, дисульфид молибдена марки ДМ-1 – 24,1, стекло электровакуумное марки СЕЗ-1 или стекло для покрытия порошков кубонита – 9,0. Режимы изготовления: нагрев плит пресса до температуры, $^{\circ}\text{C} - 190 \pm 10$, давление прессования, МПа – 30 ± 5 , нагрев прессформы при заданном давлении до температуры, $^{\circ}\text{C} - 100 \pm 5$, повышение давления прессования до 60 ± 5 МПа, нагрев при заданном давлении до температуры, $^{\circ}\text{C} - 190 \pm 7$, выдержка прессформы при заданном давлении, мин – 20 ± 3 , охлаждение в воздухе до комнатной температуры [120].

Свойства: твердость, *HRB* – 64 ± 3 ; удельное электросопротивление, Ом·м – $1,73 \cdot 10^{12}$; коэффициенты трения по: сталям Р6М5 – $0,097 \pm 0,005$ и 45 – $0,060 \pm 0,003$, твердым сплавам ВК8 – $0,092 \pm 0,003$ и Т15К6 – $0,070 \pm 0,002$, безвольфрамовым твердым сплавам КНТ16 – $0,063 \pm 0,002$ и ТН20 – $0,070 \pm 0,003$, керамикам ВОК60 – $0,070 \pm 0,001$ и ВО13 – $0,065 \pm 0,002$ [71].

В3-01 (БР) – полимерная связка состава (без покрытия зерен при 100%-ной концентрации) (масс. %): связующее (пудвербакелит) – 67,0, резина дробленая – 33,0. Режимы изготовления: нагрев плит пресса до температуры, $^{\circ}\text{C} - 190 \pm 10$, давление прессования, МПа – 30 ± 5 , нагрев прессформы при заданном давлении до температуры, $^{\circ}\text{C} - 95 \pm 5$, повышение давления прессования до 60 ± 5 МПа, нагрев при заданном давлении до температуры, $^{\circ}\text{C} - 180 \pm 7$, выдержка прессформы при заданном давлении, мин – 15 ± 3 , охлаждение в воздухе до комнатной температуры [120].

В3-01-1 (БР-1) – полимерная связка состава (без покрытия зерен при 100%-ной концентрации) (масс. %) – смола фенолформальдегидная твердая марки СФ-342 – 67,0, резина дробленая – 33,0 или (об. %): смола фенольная СФ342А – 33,5, фенольное связующее СФП-012А – 33,5, резина дробленая – 33,0 [117]. Режимы изготовления: нагрев плит пресса до температуры, $^{\circ}\text{C} - 190 \pm 10$, давление прессования, МПа – 30 ± 5 , нагрев прессформы при заданном давлении до температуры, $^{\circ}\text{C} - 95 \pm 5$, повышение давления прессования до 60 ± 5 МПа, нагрев при заданном давлении до температуры, $^{\circ}\text{C} - 180 \pm 7$, выдержка прессформы при заданном давлении, мин – 15 ± 3 , охлаждение в воздухе до комнатной температуры [120].

Свойства: твердость, *HRB* – 27 [115]; предел прочности при изгибе, МПа – 30 ± 4 ; предел прочности при сжатии, МПа – 55 ± 7 [117]; ударная вязкость, $\text{кДж/м}^2 - 1,96$; КЛТР, $\cdot 10^{-6} \text{град}^{-1} - 5,0 - 6,8$ [115].

Каучуковые связки – связки, высокомолекулярная основа которых изготавливается из полярного неперелетного эбонитообразующего бутадиеннитрильного каучука марки СКН-40, который совмещается с термопластичными поливинилхлоридной и терморезактивной фенолформальдегидными смолами с образованием твердых растворов. Каучук СКН-40 придает связкам тепло- и маслостойкость. От степени его вулканизации зависит его эластичность. Он составляет матрицу, в которую вводят на вальцах все необходимые компоненты связок, алмазные порошки и определяет технологию изготовления связок и инструмента: смешивание на вальцах, каландрирование, вулканизацию в прессах. Использование поливинилхлоридной смолы содействует хорошему формированию каучуковых связок в инструменты сложной конфигурации, повышает износостойкость связок, повышает стойкость к набуханию в смазочно-охлаждающей технологической среде (СОТС), является стабилизатором, который защищает каучук от озонного старения. Использование фенолформальдегидной смолы – фенольного связующего СФП-012А, повышает адгезионные свойства каучуковых связок к покрытиям алмазных порошков и также повышает стойкость к набуханию в СОТС. Основным компонентом, который определяет степень эластичности и жесткости связок, является вулканизирующий агент каучука – сера. В каучуковые связки также входит ряд компонентов, которые улучшают свойства связок – ускорители вулканизации, активаторы ускорителей, пластификаторы, отвердители, наполнители. Используют – алмазные порошки от АСН до АС20, зернистостью от 3/2 до 200/160. Относительная концентрация алмазов от 12,5 до 150 %. Для повышения алмазоудержания зерна алмазных порошков покрывают специальным аппретом, имеющим высокую адгезию к каучуковой связке и прочно удерживаемым на алмазах благодаря их развитой поверхности. Алмазные микропорошки не взаимодействуют с аппретирующими веществами. По степени эластичности каучуковые связки условно разделяются на 4 группы: Р1, Р2, Р3, Р31 – высокоэластичные, Р12, Р4, Р29, Р37 – эластичные повышенной твердости, Р9, Р8, Р11 – полужесткие, Р18, Р18Т, Р32 – жесткие. Каучуковые связки имеют определенную термопластичность, поэтому эксплуатировать инструмент необходимо с обязательным использованием СОТС, водных или масляных [121].

Установлено [122], что коэффициент трения связок по твердому сплаву ВК8 находится в пределах 0,08–0,12. При наличии алмазов 10/7 и 20/14 отношение P_z / P_y находится в пределах 0,10–0,16. Повышение зернистости до 50/40 скачком увеличивает это отношение до 0,30–0,36. Использование алмазов АС2 зернистостями в 63/50 и 80/63 несколько повышает отношение P_z / P_y до 0,35–0,40. В работе [122] сделан вывод о нецеле-

сообразности использования в таких эластичных связках, как Р1, Р4, Р9, зернистости большей чем 80/63.

Теплофизические свойства каучуковых связок с разными наполнителями изучены в работе [123]. Связка Р1 – теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,212; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,818; температуропроводность, $\cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ – 10,9. Связка Р2 (наполнитель каолин) – теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,302; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,467; температуропроводность, $\cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ – 13,8. Связка Р3 (наполнитель мел) – теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,253; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,714; температуропроводность, $\cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ – 12,0. Связка Р4 – теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,226; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,672; температуропроводность, $\cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ – 10,9. Связка Р29 (наполнитель алюминий) – теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,346; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,462; температуропроводность, $\cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ – 16,1. Связка Р9 – теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,218; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,626; температуропроводность, $\cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ – 10,6. Связка Р8 (наполнитель графит) – теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,252; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,563; температуропроводность, $\cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ – 12,2. Связка Р18 (наполнитель фталоцианин меди+нидрид кремния) – теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,259; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,370; температуропроводность, $\cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ – 14,1. Введение в связку алмазных шлифпорошков более ощущается на повышении тепло- и температуропроводности, чем введение микропорошков. Использование 150 % концентрации порошка АС4 80/63 в связке Р18 увеличивает ее теплопроводность, до 0,642Вт/(м·К) и температуропроводность, до $28,6 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$, вместе с тем, удельная теплоемкость снижается до 1,014кДж/(кг·К) [123].

Керамические связки

Основой большинства керамических связок являются стекла различного химического состава. От их свойств в значительной мере зависят свойства инструмента. Стеклооснова должна обладать высокой смачивающей способностью по отношению к абразивам и наполнителям. Адгезионная активность стекол к СТМ должна обеспечивать высокую прочность удержания абразивов в матрице. Невысокая реакционная способность основы материала связки по отношению к наполнителям должна обеспечить их сохранность в процессе изготовления инструмента и возможность контроля степени реакции на границе раздела фаз [83].

К1-01 (К1) – керамическая связка, в основу которой положен расплав стекла системы $\text{N}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, модифицированный оксидами лития и бария. Оптимальный состав связки включает (масс. %) – 38 фритты (стекла), 46 шамота из огнеупорной глины, 7,5 карбида бора и 8,5 алюминия или

(об. %) – 35,7 стекло Ф1, 48,3 шамот, 7,9 карбид бора и 8,1 алюминия [124]. Режимы изготовления: брикетирование без подогрева под давлением, МПа – 110 ± 50 , отжиг брикетов, последовательно – температура 200–450 °С, скорость изменения температуры, град/мин – 3,0, время выдержки, мин – 120; температура 450–680 °С, скорость изменения температуры, град/мин – 2,0, время выдержки, мин – 60; температура 680–750 °С, скорость изменения температуры, град/мин – 2,5, время выдержки, мин – 45 [125].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 2,92; твердость, *HRB* – 95; предел прочности при изгибе, МПа – 34,3; ударная вязкость, кДж/м^2 – 1,96 [115]; коэффициент термического расширения в интервале температур 100–800 °С составляет $3,75\text{--}6,38 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ [126]; КЛТР, $\cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ – 6,4–37,7; водопоглощение, % – 10 [115].

2.2. Характеристики и свойства композитов из СТМ

Структура абразивсодержащего слоя композитов из СТМ определяется соотношением объемов зерен сверхтвердых материалов, связи и пор в абразивсодержащем слое [6].

Объем зерен сверхтвердых материалов в рабочем слое композита не зависит от зернистости СТМ и плотности связи композита, а определяется исключительно концентрацией СТМ в композите. Между содержанием СТМ в объемных процентах и их концентрацией существует следующая зависимость: $V = 0,88\gamma^{-1}K$, где γ – плотность зерен СТМ, г/см^3 , K – относительная концентрация зерен СТМ в композите, %. Если принять плотность зерен СТМ равной $3,5 \text{ г/см}^3$, то приведенная выше формула принимает вид $V = 0,25K$, а это означает, что при 100%-ной относительной концентрации зерен СТМ, они занимают по объему 25 % всего объема композита [127].

Относительная концентрация алмазов в композите определяется как отношение массовой концентрации алмаза в композите к условной массовой концентрации алмаза, принятой такой, которая равна $0,88 \text{ г/см}^3$ за 100 %, $0,22 \text{ г/см}^3$ – 25%, $0,44\text{--}50$ % и т.д. [6].

Расстояние между зернами СТМ на поверхности композита для модели зерна в виде эллипсоида может быть рассчитано как [62]:

$$D = 10^{-3} \alpha [0,707(0,897Z_{\max} - 2\rho) + \rho] \sqrt[3]{\frac{\gamma_{\text{НТМ}}}{1,1K}},$$

где α – коэффициент изометричности зерен, Z_{\max} – зернистость по большому ситу, ρ – радиус округления зерна, $\gamma_{\text{СТМ}}$ – плотность зерен СТМ, K – относительная концентрация зерен СТМ в композите.

Абразивоудержание в композите при слабом химическом взаимодействии, например алмаза, и матрицы определяется механическим обжатием алмаза материалом матрицы. Механическое обжатие определяется остаточными температурными напряжениями σ в матричном материале, которые возможно оценить как [128]: $\sigma = (\alpha_M - \alpha_A)ETC_1(1 - 2\varepsilon)$, где α_M и α_A – коэффициенты температурного расширения матричного материала и алмаза соответственно, E – модуль упругости матрицы, T – температура матрицы, C_1 – объемное содержание алмаза, ε – пористость. Обратим внимание на то, что тут играет роль термоупругое несоответствие компонентов композита, а именно соотношение постоянных температурного расширения материалов, составляющих композит, например, славутич (или твесал) – $\alpha_M/\alpha_A = 2,32$, металлическая медьсодержащая матрица – 2,7, керамическая стеклоподобная матрица – 3,0. Таким образом, зерна алмаза находятся в условиях всестороннего сжатия, а матрица в условиях растяжения [129].

Показатели прочности абразивсодержащих композитов из СТМ изменяются в зависимости от основы композита и характеристики зерен СТМ.

Предел прочности при растяжении для металлических связей имеет вид – $R_m = (R_m^{\text{ЗБ}} - 0,15K) k_n$, а для металлополимерных – $R_m = (R_m - 5,3 \cdot 10^{-2} K) k_n$, где K – относительная концентрация алмазов в композите, k_n – коэффициент, учитывающий покрытие алмазов. С возрастанием концентрации алмазов прочность снижается. Покрытие алмазов (металлом Н1-25 – $k_n = 0,85$, стеклом – $k_n = 0,6$, металлоагрегированным (МА) – $k_n = 0,83$) также приводит к снижению прочности композитов [102].

Предел прочности при изгибе композитов с ростом концентрации алмазов снижается. Так, для металлической связки МО20-2 и металлополимерной ВС-Э получена следующая зависимость: $R_{bm} = 4512,68 / (351,96 + K)$. Аналогично влияет зернистость. Так, для связки ВС-Э эта зависимость имеет вид: $R_{bm} = 83,89 - 7,686 \cdot 10^{-2} Z$. Использование в композитах более прочных алмазов и их покрытия также снижает прочность композитов [102].

Предел прочности при сжатии в большей степени изучен [102] на менее прочных полимерных (В2) и металлополимерных (В1) композитах. Установлено, что с ростом концентрации СТМ прочность полимерных снижается по зависимости: $R_{cm} = (R_{cm}^{\text{ЗБ}} - 0,2K)$, а вот у металлополимерных, наоборот, наблюдается тенденция к снижению прочности. Стеклопокры-

тие зерен в металлополимерной связке снижает прочность композита приблизительно на 5 %, а покрытие МА, наоборот, повышает – на ≈ 17 % [102].

Твердость абразивсодержащих композитов из СТМ является одной из важных характеристик в первую очередь в алмазно-абразивном инструменте, которая определяет технологические показатели его работоспособности – производительность, стойкость, качество обработки и шероховатость обработанной поверхности [130]. Твердость связки в пределах одного состава может характеризовать способность к удержанию алмазных зерен [131]. Для камнеобрабатывающего инструмента установлено, что скорость изнашивания его связующего под действием абразивного шлама зависит не сколько от прочностных свойств связующего, сколько от его твердости [104]. Существует ряд способов изменения твердости связок, например, технологическими параметрами прессования и спекания. Так, изменение в 2 раза давления горячей допрессовки связки М6-16 повышает твердость на 40 % [131]. В работе [102] исследован вопрос влияния характеристик рабочего слоя на его твердость, например, в пределах одного состава связки:

- зернистость СТМ в диапазонах 63/50–250/200 для металлических связок и 63/50–200/160 для полимерных связок не влияет на твердость;
- с повышением относительной концентрации СТМ в рабочем слое круга наблюдается тенденция к возрастанию твердости;
- использование алмазов большей твердости из диапазона АС2–АС15 приводит к возрастанию твердости рабочего слоя на металлических связках и снижению ее в кругах на полимерных связках;
- металлопокрытие зерен СТМ несколько повышает твердость, а стеклопокрытие снижает – на 15–25 % в кругах на металлических связках и на 21–47 % в кругах на полимерных связках.

В свою очередь, для последних характерной является наличие определенной связи между плотностью и твердостью: $H_{\Pi} = 105 - 30 \gamma$, HRB , где γ – плотность полимерных алмазсодержащих композитов из диапазона 1,95–4,25 г/см³, и с ростом плотности твердость снижается [102]. Выявлено [102], что с твердостью связаны и другие свойства – коэффициент трения и удельное электросопротивление. Так, с ростом твердости коэффициент трения снижается. Установлено, что такое снижение возможно описать следующими корреляционными зависимостями: для металлополимерных связок (с погрешностью 8,9 %) $f_{\text{МП}} = 5,96 \cdot 10^{-2} - 6,96 \cdot 10^{-4} H_{\text{МП}}$, для полимерных (с погрешностью 25,2 %) $f_{\Pi} = 2,58 \cdot 10^{-2} - 2,02 \cdot 10^{-4} H_{\Pi}$. Аналогично твердость связана и с удельным электросопротивлением. Например: для металлополимерных алмазсодержащих композитов $\rho_{\text{МП}} = 0,24 - 2,75 \cdot 10^{-3} H_{\Pi}$, а для металлических композитов – $\rho_{\text{М}} = 0,48 - 2,75 \cdot 10^{-3} H_{\text{М}}$, где H_{Π} – твердость полимерных композитов из диапазона 10...50 HRB ; $H_{\text{М}}$ – твер-

дость металлических композитов из диапазона 80...110 *HRB*. Из полученных зависимостей видно, что с ростом твердости удельное электросопротивление падает, причем интенсивность спада одинакова, как для композитов на металлических, так и на металлополимерных связках. На рис. 2.1 приведена зависимость между твердостью композита и его прочностью при сжатии. Видно, что вместе с твердостью возрастают и па-

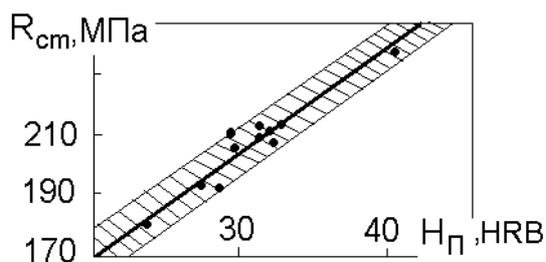


Рис. 2.1. Зависимость прочности при сжатии полимерных алмазосодержащих композитов от их твердости. Заштрихована зона разброса данных [102]

раметры прочности. Приведенное показывает, что за счет твердости возможно регулировать не только абразивоудержание, а и свойства композитов [102].

Электропроводные полимерные композиции, упомянутые выше, это композиции, удельное электросопротивление которых зависит от сопротивления сухих наполнителей, определяющих совокупность контактных сопротивлений между частичками. Полимеры имеют электросопротивление, Ом·м – 10^{11} – 10^{14} , а с наполнителями: углеродными – 10^{-3} Ом·м и металлическими – 10^{-6} Ом·м. Оксидные и сульфидные пленки, возникающие при окислении наполнителей, являются полупроводниками с большим удельным электросопротивлением: NiO – 10^5 – 10^1 Ом·м, а Cu_2O – 10^2 – 10^{-2} Ом·м. В условиях высокой концентрации металлов (Fe, Co, Ni, Cu) в фенолформальдегидной смоле электрофизические свойства систем при комнатной температуре близки к свойствам металлов [132].

Для процессов электрошлифования в шлифовальных кругах из СТМ кроме металлических связующих используют также полимерные композиты, которые имеют полимерные связующее и электропроводный наполнитель (медь, олово, висмут и др.). К ним относятся связки типа В1 (от В1-01 до ВС-Э). Данные электросопротивления композитов, содержащих алмазы с покрытием, приведены ниже.

Электросопротивление композитов при разных покрытиях алмазов [119].

Алмазосодержащие композиты	Удельное электросопротивление, 10^{-6} Ом·м, при покрытиях алмазов:			
	металлоагрегированном (МА)	металлическим никелем (Н1-25)	без покрытия	стеклопокрытии (С)
АС6 100/80–М1-04–100	–	0,075±0,009	0,095±0,006	0,157±0,032
АС4 100/80–ВС-Э–100	0,950±0,070	–	0,133±0,013	1,680±0,170
АС4 100/80–В1-13–100	0,689±0,008	1,055±0,035	1,125±0,015	5,225±0,020

Видно, что металлизация алмазных зерен повышает электропроводность композитов, а стеклопокрытие – снижает. Это характерно, как для металлических, так и металлополимерных связок. Наряду с покрытием зерен концентрация алмазов существенно влияет на электросопротивление композитов. Характерным является различие в механизмах проводимости в композитах с металлической связкой, где электросопротивление монотонно растет с повышением концентрации: $\rho_{\text{КМ}} = (0,097 + 0,350 \cdot K/25) \cdot 10^{-6}$, и в композитах с металлополимерной связкой, где электросопротивление значительно возрастает после концентрации 100 %. Поэтому, при электрошлифовании кругами на металлополимерных связках нежелательно использовать в них относительную концентрацию алмазов более 100 %. Установлено также, что изменение прочности алмазов (от АС2 до АС15) существенно не влияет на удельное электросопротивление алмазосодержащих металлополимерных композитов. Так, у металлополимерного композита 100/80–ВС–Э–100 с алмазами АС2 – $\rho_{\text{КМ}} = (0,225 \pm 0,015) \cdot 10^{-6}$, а с АС15 – $\rho_{\text{КМ}} = (0,240 \pm 0,010) \cdot 10^{-6}$ Ом·м [133].

Удельное электросопротивление металлических композитов зависит от состава, металлизации зерен СТМ и их концентрации. Для системы Cu–Sn удельное электросопротивление достигает максимума в пределах 40–45 мкОм·см при содержании олова 38–42 масс.% [134]. С ростом удельного электросопротивления металлические композиты располагаются в следующем порядке: основа кобальт – $0,030 \pm 0,002$, основа Cu–Sn – $(0,040–0,041) \pm 0,003$, основа Cu–Al–Zn – $(0,055–0,085) \pm 0,009$, основа Cu–Sn–Sb – $(0,110–0,125) \pm 0,005$ мкОм·м. В композитах с металлической связкой электросопротивление монотонно возрастает с повышением концентрации алмазов в композите: $\rho_{\text{КМ}} = (0,097 + 0,350 \cdot K/25) \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Зернистость алмазных зерен в композитах не оказывает существенного влияния на их электросопротивление, хотя наблюдается определенная тенденция по увеличению сопротивления с ростом зернистости. Так, композит АС6–МО20-2–100 с алмазами зернистостью 63/50 имеет $\rho_{\text{КМ}} = (0,223 \pm 0,005) \cdot 10^{-6}$, а с алмазами зернистости 250/200 – $\rho_{\text{КМ}} = (0,239 \pm 0,021) \cdot 10^{-6}$ Ом·м [133].

Установлено [133], что металлизация алмазных зерен снижает, а стеклопокрытие повышает удельное электросопротивление композитов:

Алмазосодержащие (АС6 100/80–100) композиты	Электросопротивление, 10^{-6} Ом·м, при покрытиях		
	металлическом (Н1-25)	без покрытия	стеклопокрытии (С)
М2-01	–	$0,073 \pm 0,011$	$0,103 \pm 0,006$
М1-04	$0,075 \pm 0,009$	$0,095 \pm 0,006$	$0,157 \pm 0,032$
МО20-2	–	$0,230 \pm 0,015$	$0,360 \pm 0,009$

Теплопроводность алмазопolyмерных композитов в значительной степени определяется составом. Так, среднее значение коэффициента теплопроводности связки В2-01 выше на 25 %, чем у В2-07, что объясняется большим количеством в В2-07 карбида бора. Теплопроводность композита (с алмазами АС2МА 80/63–100) при комнатной температуре у В2-01 – 0,64 Вт/(м·К), у В2-07 – 0,53 Вт/(м·К)), на воздухе при 50 °С у В2-01 – 2,28 Вт/(м·К), у В2-07 – 1,98 Вт/(м·К)). Повышение относительной концентрации алмазов от 50 до 100 % увеличивает теплопроводность композиции на основе связки В2-07 на 30–70 % в зависимости от температуры. Металлизация алмазов повышает теплопроводность композиции в 3,5 раза [135]. При исследовании теплопроводности эльборсодержащих композитов установлено, что увеличение концентрации эльбора с 50 до 150 % повышает коэффициент теплопроводности: для образцов на полимерной связке КБ в 1,9–2,5 раза, на керамической С10 и бакелитовой В2-01 – в 1,18–1,4 раза [136].

Связки алмазно-абразивных композитов не являются равномерно сплошным беспористым материалом. На самом деле они и пористые и структурно неравномерные и различаются между собой только основой.

Эффект водопоглощения композитами из СТМ как раз и вызван наличием внутреннего пористого пространства композитов, которое, является хотя и небольшим, но чрезвычайно важным. Известно [137], что в ре-

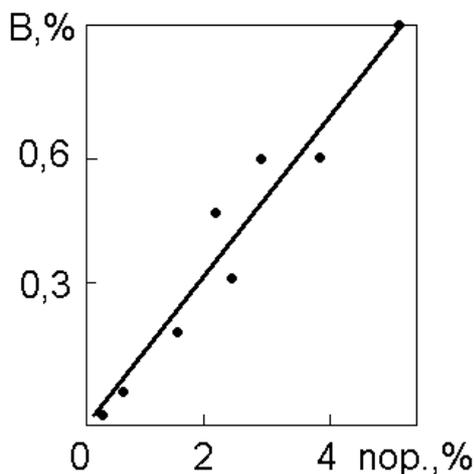


Рис. 2.2. Связь между пористостью алмазосодержащих композитов и их водопоглощением [137]

режущем слое круга существует определенная пористая среда, которая практически никак не используется для повышения эффективности шлифования. В то же время, известны эффекты заполнения жидкостью таких сред (природные дисперсные системы, продукты химической технологии), однако они совсем не изучены на композитах из СТМ. Поэтому актуальной является разработка процессов шлифования за счет экономичного и экологически безопасного нетрадиционного эффекта – предварительного водопоглощения режущим слоем воды, изменения вследствие этого свойств самой воды, поверхности круга и режущего слоя. Как правило, импрегнаторы, а в нашем случае это вода, влияют на процесс шлифования непосредственно (через изменение контактных процессов) и опосредованно (через изменение физико-механических свойств). Результаты экс-

периментов показывают (рис. 2.2), что существует корреляционная связь между пористостью и водопоглощением. С ростом пористости водопоглощение пропорционально увеличивается, что вполне логично, и это подтверждает то, что поведение объема композитов подчиняется общим закономерностям поглощения жидкостей веществами. На наш взгляд, более

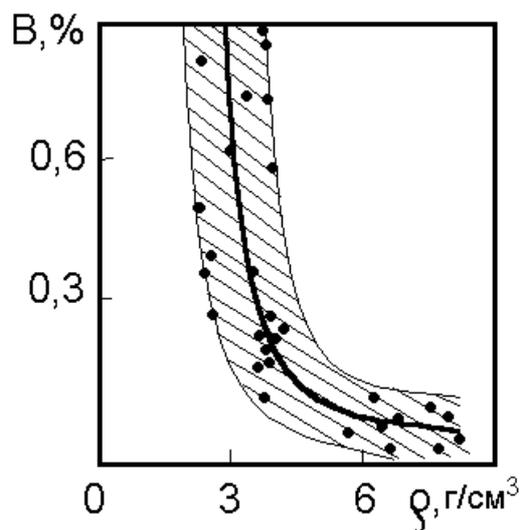


Рис. 2.3. Связь между плотностью алмазосодержащих композитов и их водопоглощением [137]

интересной является корреляционная связь между плотностью и водопоглощением

(рис. 2.3). Видно, что с ростом плотности водопоглощение падает, причем в большей степени это наблюдается в диапазоне плотностей от 2 до 4 г/см³. Исследованиями [137], выявлены также некоторые тенденции, характерные для влияния характеристик композитов из СТМ на водопоглощение. Так, с ростом прочности зерен и наличием на них покрытия водопоглощение повышается, а с ростом зернистости шлифпорошков — снижается. Рассмотрим теперь, как изменяются физико-механические свойства композитов из СТМ под действием эффекта водопоглощения.

Предел прочности при сжатии. Исследования проведены на образцах размером 5×5×5 мм из композитов трех характеристик, приведенных у табл. 2.1, показывают, что пропитка водой мало влияет на прочность при сжатии, хотя наблюдается определенная тенденция к ее снижению [102].

Таблица 2.1. Значения показателя прочности при сжатии при пропитке водой (42 часа) композитов [102]

Характеристика композита	Прочность композитов при сжатии, МПа	
	сухих	влажных
АС6 100/80–ВС–Э–100	156	146
АС4 100/80–МО20–2–100	338	283
АС4 100/80–В2–01–100	213	205

Предел прочности при растяжении. И в этом случае пропитка водой мало влияет на прочность, хотя имеются определенные тенденции к ее снижению на чистых связках и к повышению при наличии алмазов в композите (табл. 2.2). Однако, сделать однозначные выводы тяжело из-за большого разброса данных исследований [102].

Таблица 2.2. Значения показателя прочности при растяжении при пропитке водой (40 часов) композитов [102]

Характеристика композита	Прочность композитов при растяжении, МПа	
	сухих	влажных
АС6 100/80–МО20-2–100	4,09 ± 0,21	4,65 ± 1,18
М1-10	3,98 ± 0,80	3,42 ± 0,80
МО20-2	4,92 ± 2,48	4,75 ± 0,80

Таблица 2.3. Влияние основы связок композитов на их водопоглощение и удельное электросопротивление [102]

Основа связок	Водопоглощение, %	Удельное электросопротивление, 10^{-6} Ом·м,	
		сухих композитов	влажных композитов
Cu–Sn	0,028 ± 0,014	0,040 ± 0,003	0,041 ± 0,009
Cu–Sn–Sb	0,077 ± 0,022	0,113 ± 0,004	0,138 ± 0,018
Cu–Al–Zn	0,741 ± 0,224	0,072 ± 0,004	0,091 ± 0,010
Кобальт	0,050 ± 0,005	0,030 ± 0,002	0,023 ± 0,004
Полимерная	0,407 ± 0,103	$1,82 \cdot 10^{11}$ Ом·м	$1,80 \cdot 10^9$ Ом·м
Металло-полимерная	0,275 ± 0,063	0,450 ± 0,030	0,564 ± 0,098

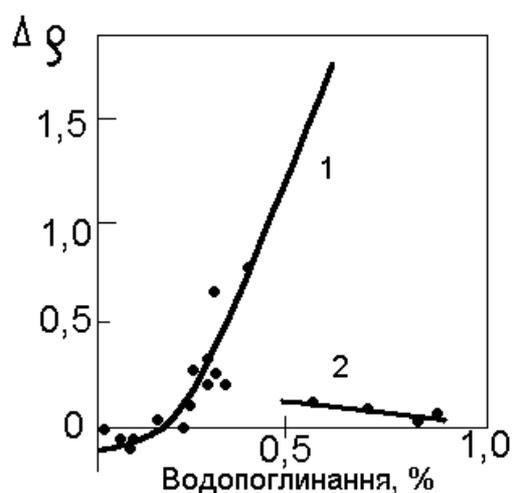


Рис. 2.4. Зависимость прироста удельного электросопротивления от величины водопоглощения абразивосодержащих композитов: 1 – на металлополимерных и металлических связках с основами Cu–Sn и Cu–Sn–Sb; 2 – на металлических связках с основой Cu–Al–Zn [137]

Дополнительно в работе [102] обращено внимание на то, что абразивосодержащие композиты, например, при электрошлифовании работают в условиях постоянного присутствия технологических жидкостей на водной основе, поэтому возможно определенное поглощение ими жидкости и изменение в связи с этим показателей электропроводности. В табл. 2.3 приведены обобщенные данные по водопоглощению композитами с разными основами связок и по их удельному электросопротивлению в сухом и влажном состоянии [102].

Анализ изменения электросопротивления после выдержки в воде показывает, что оно несколько снижается у полимерных связок и у металлической на основе кобальта, а в других случаях даже несколько возрастает.

На рис. 2.4 приведены обобщенные кривые влияния величины водопоглощения на прирост удельного электросопротивления. Видно, что с возрастанием водопоглощения увеличивается и прирост сопротивления. Данный вывод не относится к связкам на основе Cu–Al–Zn, в которых наблюдается обратный эффект (рис. 2.4, кривая 2). Положительная часть кривой 1 на рис. 2.4, связанная с приростом сопротивления, относится к металлополимерным композитам, электропроводность которых обеспечивается наполнителем (медью). Попадая в поры композита, вода усиливает окислительную активность меди и сопротивление растет. У металлических связок на основе Cu–Sn и Cu–Sn–Sb, пористость которых меньше, чем у металлополимерных, поступление воды внутрь композита ограничено, а наличие на поверхности пленки воды снижает поверхностные эффекты растекания тока, что оставляет удельное электросопротивление равным сухому, или даже несколько его снижает (см. кривую 1, рис. 2.4). Поведение композитов на связках с основой Cu–Al–Zn (см. кривую 2, рис. 2.4) при водопоглощении отличается от других, что объясняется возникновением на таких связках, при выдержке в воде, эффекта электрохимической гетерогенности поверхности связки.

Приведенное выше показывает, что принципиально отрицательных изменений в свойствах композитов из СТМ водопоглощение не вносит. В тоже время наблюдаются эффекты положительных изменений при водопоглощении.

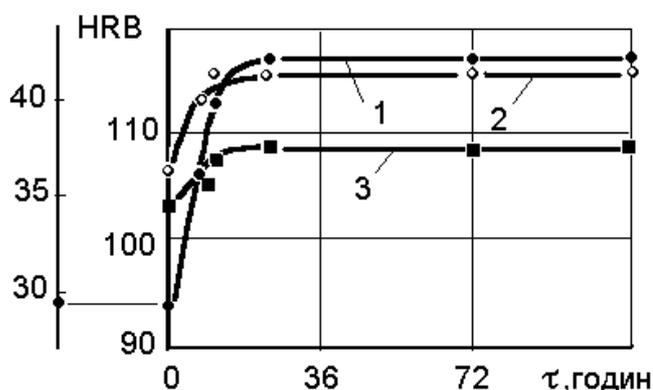


Рис. 2.5. Изменение твердости рабочего слоя кругов от продолжительности водопоглощения: 1 – АС4 100/80–О1–100; 2 – КРС 100/80–70+АС4С 100/80–30– М2-12Е; 3 – АС6 125/100–МО20-2–100 [102]

билизация показателя твердости при 48 часах и потом он остается стабильным. В целом это позволяет достичь повышения твердости кругов на металлических связках на 6–17, а на полимерных на 9–15 ед. *HRB*.

Твердость рабочего слоя. Экспериментами подтверждено приведенное в работе [102] предположение о том, что заполнение пористого пространства жидкостью должно приводить к повышению твердости рабочего слоя кругов (рис. 2.5). При этом, вначале твердость повышается с возрастанием времени водопоглощения до 24 часов, далее наблюдается ста-

Коэффициент трения. Наряду с повышением твердости установлено, что водопоглощение позволяет снизить коэффициент трения. Так, при трении твердого сплава ВК6ОМ по металлополимерной связке В1-13 коэффициент трения ощутимо снижается начиная с выдержки в 4 часа, а в наибольшей степени это наблюдается при выдержке в воде – 8 часов (рис. 2.6). В работе [71] было установлено, что коэффициент трения абразивосодержащих композитов снижается с ростом их твердости. По нашему

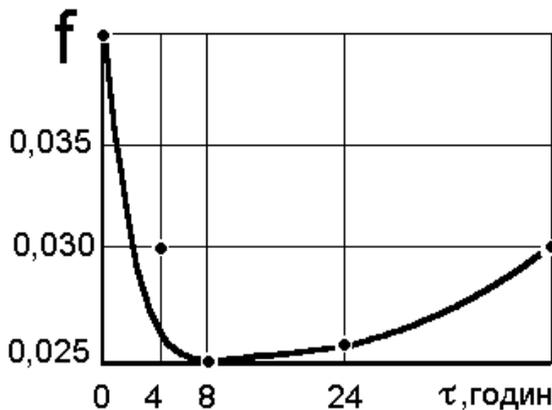


Рис. 2.6. Изменение величины коэффициента трения твердого сплава ВК6ОМ по металлополимерной связке В1-13 от продолжительности водопоглощения этой связкой [102]

мнению такое совпадение подчеркивает определенную закономерность в связи твердости и коэффициента трения. В целом, изменение в положительную сторону значений таких важных показателей, как твердость и коэффициент трения означает, что возможно, в определенной степени, рассчитывать и на снижение износа шлифовальных кругов.

Относительный расход СТМ при шлифовании. Для установления этого было [102] исследовано 10 характеристик кругов: на металлических (М1-10, М2-12Э, М020-2), керамических (К17, ПК, ПК-01) и полимерных (В1-11П, В1-13) связках, а также кругах фирм «Ильич» (Россия) и «Winter» (ФРГ) (табл. 2.4). Совокупная зависимость их износа (в относительных коэффициентах) от продолжительности выдержки кругов в воде по 49 точкам приведена на рис. 2.7. Видно, что с превышением времени выдержки свыше 19 часов и до 150 часов существуют условия снижения износа кругов. Обсчет совокупности данных нижней части кривой на рис. 2.7 показал, что ее возможно описать зависимостью с погрешностью 12 %:

$$K_q = 0,88 + 2,32 \cdot 10^{-2} t - 2,5 \cdot 10^{-3} t^2 + 6,45 \cdot 10^{-5} t^3 - 7,18 \cdot 10^{-7} t^4 + 3,69 \cdot 10^{-9} t^5 - 7,19 \cdot 10^{-12} t^6.$$

Расчет по приведенной зависимости показывает, что оптимальной является выдержка в 49 часов, когда пропитка водой режущего слоя кругов позволяет гарантировано снизить их износ в 2–2,5 раза. Этот эффект защищен Патентом Украины № 23784.

Таблица 2.4. Влияние времени водопоглощения рабочим слоем кругов из СТМ на их износостойкость при шлифовании

Характеристика круга	Обрабатываемый материал	Время пропитки, часов	Расход СТМ, мг/г, в кругах	
			до пропитки	после пропитки
12А2-20° 125×3×3×20 – В151–V120 «Winter»	Р6М5	24	2,47	0,64
		44		0,93
12А2-45° 125×10×5×32 – ЛКВ 100/80–С1 «Ильич»	Р6М5	24	1,43	0,69
		58		0,30
12А2-45° 125×5×3×32 – ЛКВ 100/80–К17–75	Р9М4К8	48	16,2	9,76
12А2-45° 125×5×3×32 – КР 100/80–ПК–100		16	31,4	25,4
12А2-45° 150×10×3×32 – АС4 100/80ма–В1-13–100	ВК6ОМ	40	4,3	1,85
12А2-45° 150×10×3×32 – АС4 100/80–М1-04–100		40	1,52	0,58
12А2-45° 150×10×3×32 – КР 100/80–ПК-01–100	Р6М5	26 69	0,55	0,34 0,22
12А2-45° 150×10×3×32 – АС4 63/50ма–В1-11П–125	УБ316 (керамика)	66	2,1	1,06
12А2-45° 150×10×3×32 – ЛКВ _м 10–МО20–100	Р6М5	65	5,7	3,6
12А2-45° 150×10×3×32 – АС6 125/100–МО20-2–100	Т15К6	24	0,57	0,30
		41		0,20

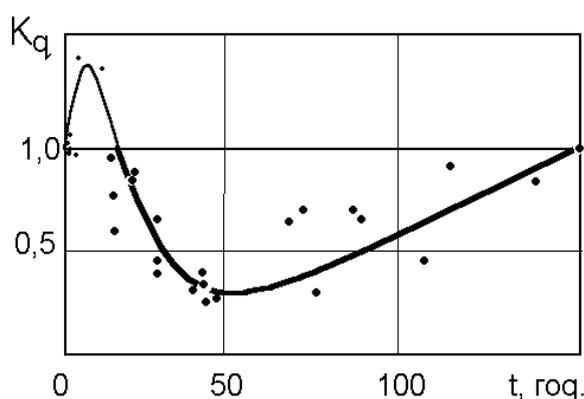


Рис. 2.7. Совокупная зависимость износа кругов из СТМ (у относительных коэффициентах) от продолжительности их выдержки в воде [102]

Продолжительность действия эффекта водопоглощения. По мнению [102, 137], физическая сущность положительных эффектов, приводящих к

повышению износостойкости кругов, состоит в следующем. Перед процессом шлифования рабочий слой круга из СТМ подвергался пропитке водой таким образом, чтобы заполнить ней поры связки круга. Это приводит к определенному изменению фазового состава приповерхностного слоя композитов, поскольку в его порах появляется вода.

В целом, вода в порах имеет тройной положительный эффект: во-первых, повышается демпфирующая способность связки за счет заполнения пористого пространства композитов; во-вторых, вода из пор под воздействием сжимающего усилия контактных нагрузок выдавливается в зону резания, что обуславливает определенный охлаждающий эффект при шлифовании без СОТС; в-третьих, вода в порах имеет повышенное количество поверхностных ОН-групп, способных к образованию связей С–О–Н с ювенильной поверхностью алмаза при резании, в результате чего снижается сцепление алмазного зерна с обрабатываемым материалом и снижается износ шлифовального круга. Однако, по нашему мнению, наибольшее влияние имеет, указанный выше, первый положительный эффект, когда наличие в порах приповерхностного слоя новой фазы (воды) приводит к повышению твердости рабочего слоя, за счет заполнения дефектных пор и пустот жидкостью, и усиления, тем самым, демпфирующей способности поверхности связки. Для оценки продолжительности действия указанного выше эффекта по времени изучали изменение массы пропитанных водой образцов композитов разных характеристик при просушивании на микровесах прибора «Дериватограф Q-1500». Динамика потери массы при этом представлена на рис. 2.8. Видно, что только после приблизительно 100 часов просушивания при комнатной температуре процесс потери массы стабилизируется и не возрастает.

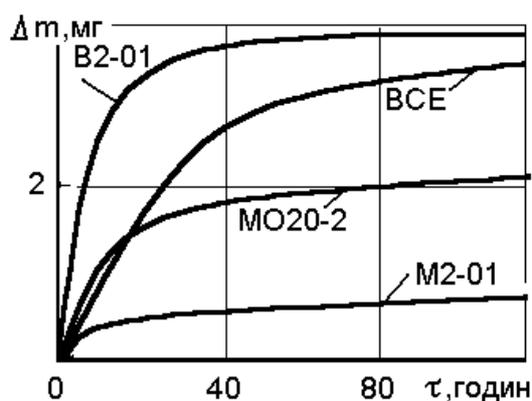


Рис. 2.8. Зависимость изменения массы пропитанных образцов алмазосодержащих композитов AC4 100/80–100 на разных связках от продолжительности их просушивания [102]

Аналогичные исследования были сделаны и по износостойкости кругов, что позволило сделать следующие выводы:

- временной промежуток действия эффекта, без пополнения воды в порах, составляет приблизительно 130 часов, когда происходит возврат в исходное (сухое) состояние;

- промежуток времени от окончания пропитки круга до начала процесса шлифования таким кругом не должен превышать 70 часов, иначе вода, находящаяся в порах постепенно испаряется и ее становится недостаточно для действия эффекта [102].

2.3. Исследование эффекта изменения градиента содержания связующего металлических композитов

Возможен и еще один вариант заполнения пор, в дополнение к вышеизложенному, а именно – заполнение их подвижной пластичной фазой композита. Для этого, нами изучены особенности термического спекания металлических связок, формирование при этом их фазовых составляющих и выявление условий срабатывания эффекта изменения градиента концентрации содержания пластичной фазы в их структуре. Исследования проводились при спекании металлического композита на основе меди и олова. Эксперименты выполнялись таким образом, чтобы рабочий слой круга из такого композита спекался до разных температур с установлением изменений в их структуре и их соответствие температурному воздействию.

Установлено, что определенные изменения в образце происходят в двух диапазонах температур от 330 до 400 °С и от 790 до 910 °С. В первом диапазоне температур при 330 °С наблюдается начало экзоэффекта, который заканчивается при 400 °С. Это свидетельствует об образовании интерметаллического соединения системы Cu–Sn. Во втором диапазоне наблюдаются два эндоэффекта, которые свидетельствуют о появлении жидкой фазы (расплава) при 790 °С, а полное расплавление образца наступает при 910 °С. Поскольку второй диапазон температур выходит за пределы рабочих температур получения инструментальных композитов шлифовальных кругов, то основное внимание обращалось нами на первый диапазон. Из приведенного выше, а также из анализа литературы [90] можно сделать вывод о том, что в рабочем слое кругов при относительно небольших температурах (около 400 °С) образуются твердый раствор на основе меди (α -фаза) и интерметаллидные фазы, вероятно Cu_6Sn_5 (η -фаза) и Cu_3Sn (ε -фаза), а при 400 °С происходит активное взаимодействие Cu и Sn. При повышении температуры спекания (до диапазона 600–750 °С) наблюдается образование интерметаллидных соединений и происходит образование вероятно γ , δ и ε фаз. Дальнейшее повышение температуры приводит к появлению твердого раствора α на основе меди.

Однако, наиболее интересный эффект мы можем наблюдать по поведению в изменении состава наиболее легкоплавкой составляющей (олова) в металлических системах Cu–Sn–Co после спекания, например, у поверхностных слоях и в глубине (табл. 2.5). Анализ данных табл. 2,5 свидетельствует о том, что до температуры в 600 °С включительно содержание меди и олова на поверхности и их соотношение почти не изменяются. Далее при увеличении температуры происходит резкий скачок и содержание олова на поверхности резко возрастает от 17–19 до 26–27 масс. %, а соотношение

содержания олова на поверхности к содержанию на глубине (по расчетным данным) также скачком возрастает и составляет приблизительно 1,5. Рассмотрим более детально табл. 2.5. Расчетное соотношение содержания меди к олову составило 4. В эталоне это соотношение равнялось 4,08, то есть почти совпадало с расчетным. При температуре спекания композита в 400 °С в поверхностном слое соотношение меди к олову начинает изменяться, хотя и не радикально, и равняется уже 3,55. При дальнейшем повышении температуры до 600 °С соотношение тем не менее колеблется около значения 4 – а именно в 4,29. Более интересно поведение при дальнейшем росте температуры. При повышении температуры до 750 °С соотношение меди к олову изменяется радикально и составляет уже 2,23, что свидетельствует о повышении в поверхностном слое содержания олова. Снижение давления при спекании при этой же температуре в 750 °С не оказало влияние на общую картину. Соотношение осталось почти на том же уровне – 2,13. Подъем температуры до 800 °С снизил величину соотношения к 1,81, а это указывает на дальнейший рост величины содержания олова в поверхностном слое.

Таблица 2.5. Содержание элементов на поверхности сложнолегированного металлического композита в виде алмазного круга [138]

Условия получения композита	Массовое содержание элементов композита, %					
	Cu	Sn	Co	Ni	Cr	Fe
Расчетное содержание	69,6	17,4	13			
Эталон	70,344	17,251	12,405			
400 °С, 6,4 МПа	68,656	19,321	12,023			
600 °С, 6,4 МПа	72,916	16,984	10,100			
750 °С, 6,4 МПа	59,222	26,540	6,349	7,891		
750 °С, 2,5 МПа	57,716	27,098	7,367	7,822		
800 °С, 6,4 МПа	48,353	26,756	9,501	9,786	5,084	0,523

Таким образом, анализ данных табл. 2.5 показывает, что до температуры в 600 °С включительно содержание меди и олова на поверхности и их соотношение почти не изменяются. А при превышении этой температуры происходит резкий скачок и содержание олова на поверхности резко возрастает от 17–19 до 26–27 масс. %, содержание меди соответственно снижается, а соотношение меди к олову, которое вначале составляло почти 4, теперь снижается вдвое. Типичный пример такой существенной разницы приведен на рис. 2.9 для температур 600 та 800 °С.

Видно, что при более высокой температуре создается градиент концентрации связующего и в поверхностном слое его становится больше.

Приведенное выше поведение меди и олова является чрезвычайно интересным, поскольку это дает возможность в принципе реализовать механизм термоупругости для каркасных систем [138, 139] и это подтверждают данные по содержанию элементов на поверхности композита, приведенные в табл. 2.5. Рассмотрим это более детально.

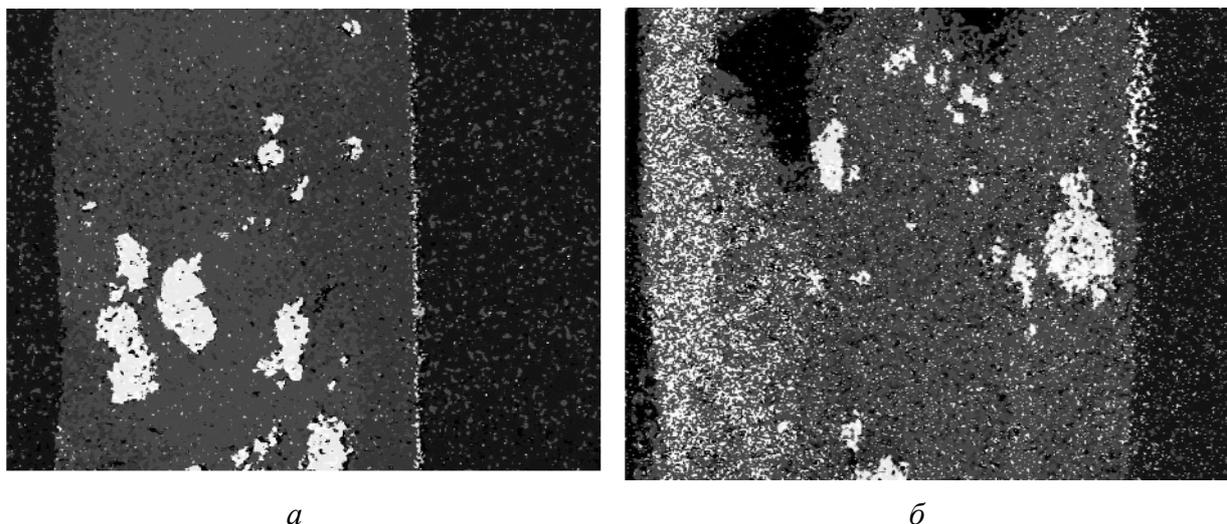


Рис. 2.9. Распределение олова по сечению поверхности торца алмазного круга полученного при температурах спекания (давление прессования 6,4 МПа): *а* – 600 °С (равномерное распределение), *б* – 800 °С (формирование градиента концентрации олова в рабочем слое) [138]

Эффект формирования градиента концентрации пластичной фазы относится к эффектам возврата накопленной деформации (или эффектам памяти формы), которые обнаружены у достаточно широкого круга сплавов, относящимся к разным системам, например, Ti–Ni, Cu–Pb–Zn и др. [140]. В данном случае обращается внимание на близкие, но несколько измененные инструментальные системы, у которых реализуется одно из проявлений эффекта возврата накопленной деформации, а именно, эффект изменения градиента подвижной фазы.

Конкретные проявления действия такого эффекта детально описаны в работе [139] для безвольфрамовых инструментальных каркасных композитов системы TiC–Ni, у которых существует проблема ухода никеля из поверхностного слоя в процессе их обработки, поэтому возникает необходимость возобновления его в поверхностном слое, а и даже обеспечения повышения его содержания. Для решения указанных выше проблем именно за счет внутренних напряжений автором [139] была выдвинута гипотеза о возможности изменения градиента концентрации связующего в поверхностном слое каркасных композитов путем использования внутренних напряжений, формирующихся при спекании в фазах композита, составля-

ющих каркас. Для пластин указанной выше системы, реализованной в спеченных безвольфрамовых твердых сплавах, характерным является то, что по завершении процесса спекания и охлаждения тугоплавкие частички каркаса находятся в сжатом состоянии с запасом внутренней энергии. Для реализации этой энергии с целью изменения градиента концентрации никеля необходимо, чтобы никель стал пластичным и сработал спусковой механизм термопластичности характерный для эффектов возврата накопленной деформации, а этого возможно достичь нагревом пластин. Тогда с момента возникновения пластичности никеля появляется возможность увеличения частичек карбида титана и вытеснения никеля в поверхностные слои. Описанный выше градиент фаз объясняется тем, что в период спекания расплав металла выдавливается из внутренних на периферийные области. Однако, напряжения в фазах каркаса, тем не менее остаются. Для того, чтобы они сработали, необходимо привести в действие механизм термоупругости за счет нагрева пластин. Установлено, что только с превышением температуры обработки свыше $0,5 \cdot T_{\text{пл}}^{\text{Ni}}$, где $T_{\text{пл}}^{\text{Ni}}$ – температура плавления никеля, начинает срабатывать механизм, изложенный выше и реализуется эффект возврата накопленной деформации. Тем самым, за счет термообработки композита возможно сформировать значительные градиенты концентраций подвижной фазы (связующего).

Возникает вопрос о том, может ли описанный выше эффект применен и к композитам из СТМ? По нашему мнению, да. И это мы уже можем увидеть по изменению градиента более легкоплавкой составляющей (олова) в металлических системах Cu–Sn–Co после спекания, например, в поверхностных слоях и в глубине (табл. 2.5), на что мы уже указывали выше, как на характерное проявление этого эффекта. Указанное выше поведение меди и олова является достаточно интересным, поскольку оно дает возможность реализовать механизм термоупругости для инструментальных каркасных композитов из СТМ, однако последний требует определенного исследования с целью уточнения его особенностей в этом случае и нахождения условий его срабатывания.

С целью решения последнего нами были изучены особенности плавления связующих [138]. Установлено, что двухкомпонентные сплавы образуют при плавлении шарик. При плавлении связок, имеющих более сложное многокомпонентное содержание, образуется каркас и шарик, который из него выплавляется (рис. 2.10). В шарике находится несколько большее количество меди, чем то, что остается в каркасе. Так, на связке М2-09 (рис. 2.10) в выплавленной части и в каркасе наблюдается разница в элементных составах: и соотношение меди к олову в Т1 составляет 1,93, а в Т2 типичное (близкое к 4) – 3,75. Из приведенных выше данных, по нашему мнению, необходимо обратить внимание на то, что наличие са-

мого эффекта выплавления шарика при нагревании указанного типа связок свидетельствует о возможности срабатывания в них эффекта изменения градиента подвижной фазы. Это подтверждается также и тем, что при плавлении металлических связок с основой Cu–Sn на поверхности продуктов плавления находится больше Sn, чем в глубинных слоях. Установлено,

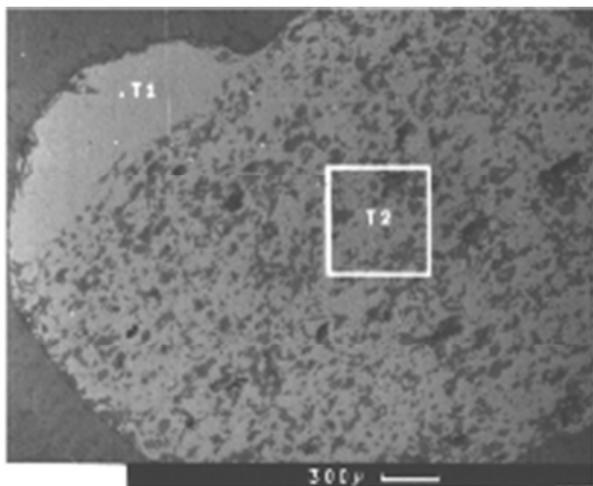


Рис. 2.10. Шлиф плавленного образца связки М2-09 (середина плавления, процесс выплавления шарика)

что двухкомпонентные связки на основе Cu–Sn при плавлении образуют шарик в котором находится весь объем материала связки. При этом, на поверхности шарика находится больше Sn, чем в глубинных слоях. Содержание меди и олова на поверхности соответствует δ -фазе ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$), а в середине шарика – β -фазе (Cu_5Sn). При этом, содержание меди на поверхности – 65,7 мас. %, олова – 32,3 мас. %, а соотношение меди к олову равно 2,0, что полностью совпадает с указанными нами выше данными в табл. 2.5.

Изложенное выше означает, что и в этом случае возможно найти условия срабатывания описанного эффекта, но уже применительно к прессованным и спеченным рабочим слоям кругов на металлических связках. Напомним, что он срабатывает только в том случае, когда имеется каркас и относительно легкоплавкая составляющая. В этом случае, подвижная фаза выдавливается, во-первых, в пористое пространство композита, заполняя его, что приводит к повышению твердости композита, и, во-вторых, в поверхностные слои, что мы и можем наблюдать по повышению содержания олова в поверхностной зоне кругов (см. рис. 2.9, б). Для того, чтобы сработал этот механизм, необходимо появление пластичной подвижной фазы, а сделать это возможно за счет термообработки. Поскольку реально связка состоит не из олова и меди, а, как это было нами показано выше, из определенного их соединения, то как только температура термообработки превысит половину температуры плавления этой фазы, начинает срабатывать механизм термопластичности и пластичная фаза выдавливается в незанятые объемы или на поверхность. Известно [141], что одной из основных составляющих в структуре медно-оловянной связки является δ -фаза, которая имеет температуру плавления от 360 до 410 °С [90], поэтому возможно ожидать уже с 180 °С проявлений эффекта повышения твердости рабочего слоя.

2.4. Формирование структуры металлических композитов

Современная металлообработка требует применения шлифовальных инструментов гарантированной износостойкости и устойчивой режущей способности. Одним из определяющих условий достижения этого является регулярность структуры рабочего слоя шлифовального инструмента: ее изотропность или, например, направленная анизотропность. Вопрос этот является достаточно сложным и требует разнонаправленных подходов, что связано с особенностью структуры рабочего слоя шлифовального инструмента, а именно наличием связки с функциональным наполнителем и резко отличающегося по структуре абразивного наполнителя – самих зерен СТМ. В литературе обращено внимание [142, 143] на то, что в реальных кругах из СТМ, получаемых по стандартной технологии спекания и пресования уже существует некоторое ориентирование, как самого рабочего слоя, так и зерен шлифпорошков СТМ. Указанную выше структурную ориентацию с точки зрения работоспособности реальных кругов как раз желательно изменять в необходимом нам направлении. Этот вопрос наиболее актуален для реальных шлифовальных кругов и требует конкретных решений и рекомендаций именно по такому инструменту, который во многих случаях работает в различных условиях его применения, например, для шлифования кромкой круга, когда зерна из СТМ работают в совсем других условиях, чем при шлифовании торцом или периферией круга. Отсутствие таких сведений как раз и не позволяет управлять параметрами процесса обработки за счет обоснованного выбора характеристик кругов с учетом структурной организации его рабочего слоя. Состояние алмазно-абразивных композитов характеризуется определенными показателями их структуры, которая формируется под влиянием условий их пресования и спекания. Поэтому в процессе разработки таких композитов важно было бы оценить это влияние и для этого были использованы :

- показатели Фурье-анализа изображения поверхностей сечения композитов, которые характеризуют как анизотропию, так и ориентацию структуры (типичный спектр представлен на рис. 2.11);
- содержание мелких объектов на поверхности среза композита;
- шаг структуры композита.

Все эти показатели оценивали с помощью изображений, полученных методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием системы анализа изображений. В качестве информационного инструмента использовался электронный микроскоп-микроанализатор BS-340. В процессе работы изготавливались образцы рабочего слоя из различных композитов и, для анализа их внутренней структуры, изготавливались шлифы в плоскости вдоль усилия пресования. Угол ориентации структуры измерялся в нормальной к этому усилию плоскости.

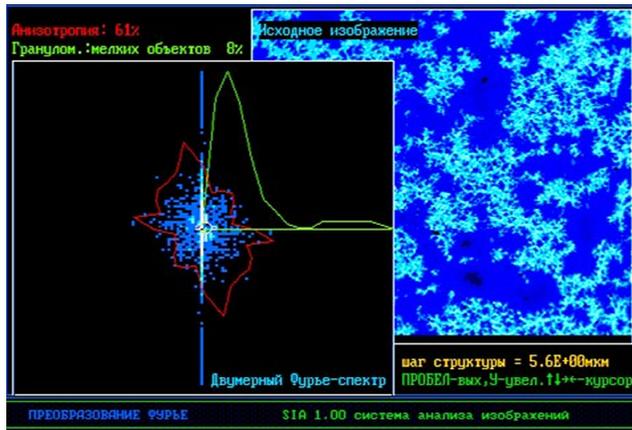


Рис. 2.11. Типичный Фурье-спектр, поверхностей шлифов композитов

что при плоском напряженном состоянии изотропного тела предельный контур прочности (текучести) имеет оси симметрии наклоненные к осям координат под углом 45° и проходят через их начало [130]. Кроме того, по энергетической теории прочности – теории Губера-Мизеса-Генки условия текучести по теории полной удельной потенциальной энергии деформации представляют собой уравнение второго порядка. В пространстве главных нормальных напряжений предельная поверхность изображается эллипсоидом вращения, имеющим ось вращения, равно наклоненную к осям координат. При плоском напряженном состоянии предельный контур изображается эллипсом, симметричным относительно осей, проходящих через начало координат и наклоненных к осям координат под углом 45° [144].

Перейдем теперь к изложению конкретных фактов формирования режущего слоя кругов из СТМ. Этот слой характеризуется определенными показателями его структуры, которая формируется под влиянием режимов прессования и спекания. Для оценки структуры нами использованы в качестве основных показатели анизотропии и ориентации, которые оценивали двумерным Фурье-спектром изображения поверхности шлифа по методике, разработанной в ИСМ НАН Украины [145]. Решение вопросов формирования определенной анизотропии и ориентации рабочего слоя рассматривалось нами в плоскости среза этого слоя вдоль линии действия усилия прессования, а ориентация измерялась к нормальной к вектору действия этого усилия плоскости. Проведенными исследованиями установлено (рис. 2.12), что при стандартных условиях формирования рабочего слоя кругов на полимерных связках показатель ориентации равняется примерно 45 градусам (или $45+\pi/2$ градусам с другой стороны).

Представим себе процесс формирования рабочего слоя круга в виде проведения исследования образца, подвергающегося одноосному сжатию в процессе прессования. Образец в исходном виде изотропен, так как считаем, что его содержимое в виде связующего хорошо перемешано. Как же будет проходить формирование структуры такого образца при деформации в процессе его прессования и спекания? Напомним,

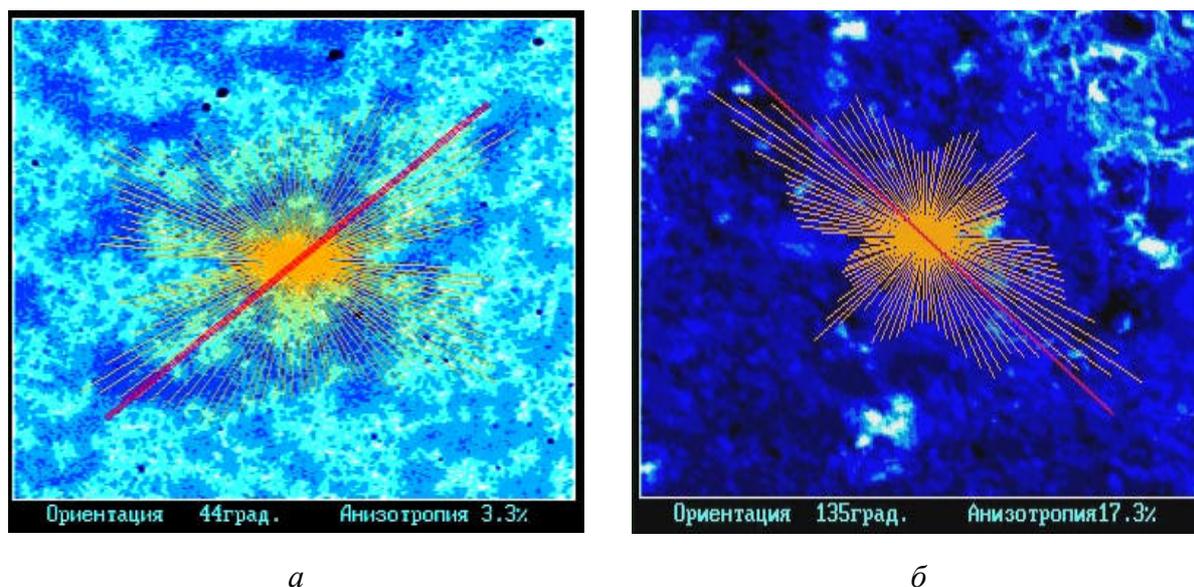


Рис. 2.12. Показатели анизотропии и ориентации рабочего слоя композита на металлической связке типа М2-01 (а) и металлополимерной В2-01-1 (б) в плоскости его сечения вдоль вектора действия усилия прессования (действует с правой стороны рисунка) при стандартных условиях формирования слоя

Приведенные исследования, по нашему мнению, являются подтверждением тех предположений, которые нами высказаны выше, и важно то, что значения углов ориентации и наклона зерен [146], для стандартных условий прессования и спекания рабочего слоя, совпадают не только между собой, но и с ожидаемым углом, который предсказывается теорией прочности, как угол направления действия касательных напряжений в рассматриваемом образце. Поскольку выше нами была выдвинута гипотеза о том, что при стандартных условиях прессования и спекания основную роль в формировании структурной ориентации играют напряжения сжатия, то для изменения этой ориентации в нужном нам направлении, например, сдвинуться от 45° к 90° , логично было бы предположить, что для такого изменения необходимо ввести действие растягивающих напряжений и снизить влияние напряжений сжатия. Для реализации такой гипотезы была применена технология предварительного послойного брикетирования. Тем самым, достигли в процессе прессования и спекания наряду с напряжениями сжатия еще и напряжения растяжения за счет послойного движения в стороны. Логично было бы предположить, что такая технология позволит достичь уровня ориентации к углу, который будет суммой двух углов 45° и $45^\circ/2$, то есть $67,5^\circ$. Проверка подтвердила наши предположения (рис. 2.13 и табл. 2.6). Повторные измерения ориентации в других точках образца кроме 66° дали данные в 76° и 61° , а средний угол оценки ориентации составил $67,7^\circ$.

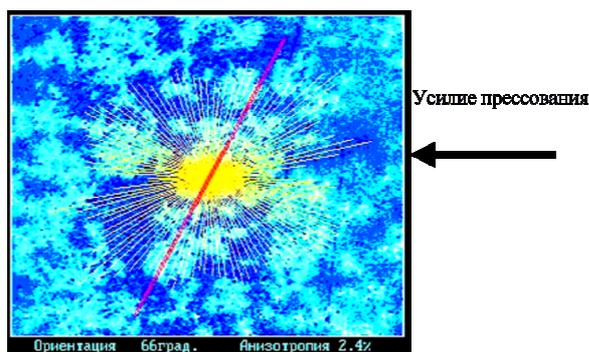


Рис. 2.13. Показатели анизотропии и ориентации рабочего слоя композита на металлической связке типа М2-01 в плоскости его сечения вдоль вектора действия усилия прессования (действует с правой стороны рисунка) при слоистых условиях формирования такого слоя

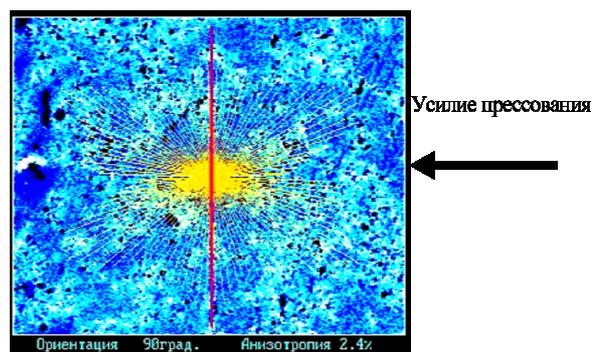
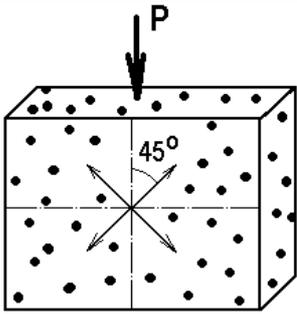
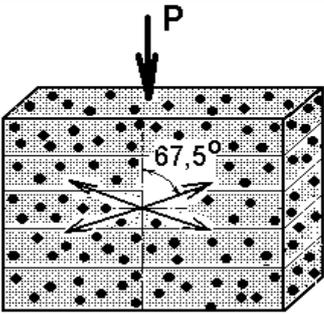
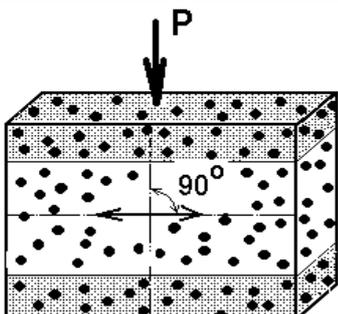


Рис. 2.14. Показатели анизотропии и ориентации рабочего слоя композита на металлической связке типа М2-01 в плоскости его сечения вдоль вектора действия усилия прессования (действует с правой стороны рисунка) при комбинированных условиях формирования такого слоя

Далее возникает вопрос о том, возможно ли еще больше изменить угол ориентации структуры. Была сформулирована гипотеза о создании комбинированной ситуации, когда создастся ситуация одновременного движения на растяжение в слоях. При этом, верхние и нижние слои – брикет, а средняя часть – насыпная, и, как следствие, жесткость переходных границ резко снижена. Ожидаемая оценка угла ориентации – 90° . Реальная оценка ориентации в разных точках образца кроме 90° (рис. 2.14) дала данные в 85° и 92° (табл. 2.6). Анализ табл. 2.6 показывает также, что при таком последовательном изменении угла ориентации поведение других показателей несколько отличается. Так, анизотропия структуры во всех трех случаях отличается мало, тогда как анизотропия двумерного Фурье-спектра уже разнится и наблюдается последовательное ее снижение с 61 до 48 %. Изменяется последовательно и шаг структуры, существенно возрастая при «комбинированном» варианте. При этом, «комбинированный» вариант по сравнению со «слоистым» приводит к более существенному изменению структуры. Так, если «слоистый» вариант отличается от «насыпного» принципиально только по углу ориентации структуры и среднему значению анизотропии двумерного Фурье-спектра, то «комбинированный» вариант к этим двум указанным показателям добавляет еще два принципиальных отличия – резкое возрастание, почти на порядок, процента мелких объектов в структуре и, существенно, почти в 3 раза, повышению шага структуры. Укажем, что при применении технологии послойного прессования и спекания важным является обеспечение хорошего соединения слоев между собой. Было установлено, что даже при видимом отсутствии сло-

истости, наблюдается одновременное снижение меди и олова в переходных зонах, что является крайне негативным явлением.

Таблица 2.6. Показатели структуры рабочего слоя композита на связке типа М2-01 при различных условиях его формирования

Формирование композита		
Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
«Насыпной»	«Слоистый»	«Комбинированный»
		
Угол ориентации структуры (от оси действия усилия прессования)		
44...45°	61...76°	85...90°
Средние значения анизотропии (%) двумерного Фурье-спектра		
61	53	48
Средние значения анизотропии (%) по структуре		
4,1	5,0	4,9
Средний процент мелких объектов в структуре, %		
4	3	29
Шаг структуры, мкм		
5,3	7,0	14,0

Для того, чтобы избежать такого явления разработаны [147], способы технологической подготовки брикетов, которые бы позволили получать многослойный композит не только без видимых границ между слоями, а и при отсутствии изменений в содержаниях меди и олова в этих зонах.

Кроме того, отметим еще одну закономерность, которая установлена для исследованных композитов в случае, когда они спекаются вместе с алмазами. Известны выводы работы [148], где указано, что зона композита, прилегающая к алмазу, характеризуется повышенным содержанием олова. Исследованиями [147] такие выводы работы [148] подтверждаются и установлено, что действительно при разломе композита на алмазе остаются следы материала металлического композита, где действительно содержание олова выше, чем его содержание в основном слое композита. Приведенное выше поведение олова связано, на наш взгляд, с действием эффекта изменения градиента концентрации пластичной фазы, а именно олова, что

нами описано в предыдущей подглаве. Поскольку он действует и в этом случае, то с учетом изложенных выше закономерностей нами были разработаны условия получения металлического композита для абразивного инструмента со структурно-ориентированным рабочим слоем с учетом «комбинированной» технологии, которую условно назвали технологией «мягкого» прессования. Пример полученного структурированного рабочего слоя многослойного композита приведен на рис. 2.15.

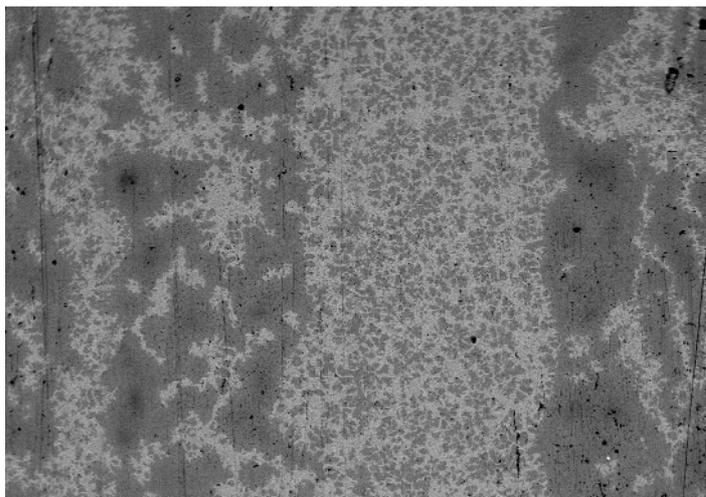


Рис. 2.15. Структурированный рабочий слой металлического композита с основой Cu–Sn (светлым выделены части структуры с повышенным содержанием олова, темным – части структуры со сниженным содержанием олова)

Обратим внимание на еще одну закономерность для указанного на рис. 2.15 многослойного композита. Если проанализировать рис. 2.15, то возникает вопрос – сколько тут слоев и где именно проходят границы между слоями. На первый взгляд, представляется, что тут три или четыре слоя и граница между ними достаточно зрима. Так ли это? Ну и вообще, а как бы реально увидеть, где они таки проходят? Для этого была использована технология нанесения ионно-

плазменных пленок. Предварительно были изготовлены брикеты и на одну из их поверхностей была нанесена тонкая (около 1 мкм) пленка карбида титана. Было сформулировано предположение, что такая тонкая пленка не нарушит общего процесса формирования структуры, однако четко проявит границу между слоями. Структура после «мягкого» прессования и спекания представлена на рис. 2.16.

Анализ рис. 2.16 показывает, что наличие границы между брикетами не мешает формированию определенной ориентации в слоистом композите. Даже тонкий, хотя и в определенной степени инородный, слой покрытия не препятствовал переходу через границы и формированию соответствующей структуры. Это хорошо видно в сравнении границ между слоями 2 и 3 и слоями 3 и 4. Между слоями 2 и 3 была пленка TiC, а между слоями 3 и 4 вообще не было пленки, только в нижней части виден небольшой участок границы, который возник вследствие попадания на обратную сторону брикета пятна пленки TiC. Как видим, на формировании структуры наличие или отсутствие пленки никак не отражается. На наш

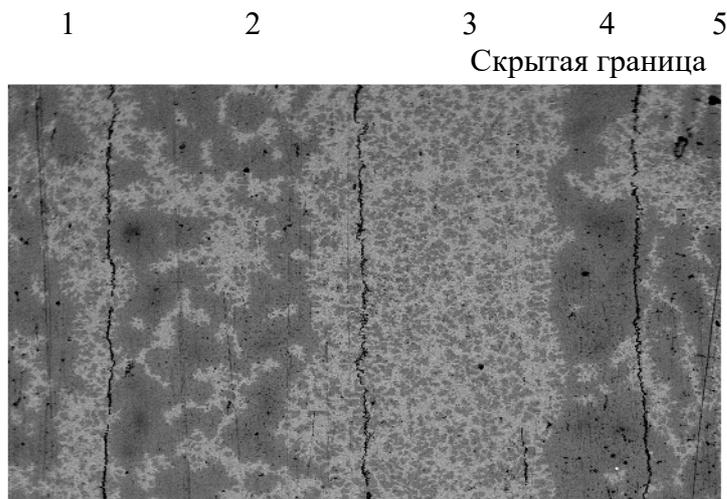


Рис. 2.16. Структурированный многослойный металлический композит с основой Cu–Sn (светлым выделены части структуры с повышенным содержанием олова, темным – части структуры со сниженным содержанием олова) с обозначенными границами между слоями

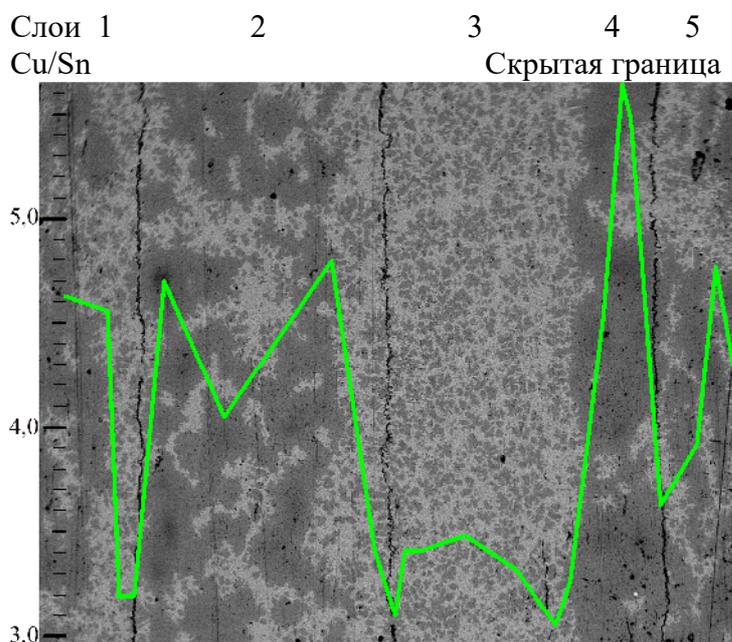


Рис. 2.17. Изменение величины отношения содержания Cu/Sn в структурно-ориентированном рабочем слое металлического композита с основой Cu–Sn (светлым выделены части структуры с повышенным содержанием олова, темным – части структуры со сниженным содержанием олова) с обозначенными границами между слоями

взгляд, такой результат связан также и с тем, что наряду с другими в этих зонах нами задействован, описанный выше эффект изменения концентрации подвижной фазы, который значительно улучшает сцепляемость слоев.

Продемонстрируем это на примере изменения величины отношения содержания меди к олову в структуре многослойного композита. Каждый слой многослойной композиции рис. 2.16 имел исходную

смесь меди и олова в соотношении: Cu – 80 %, Sn – 20 %, и это отношение составляло 4. Те технологические приемы, изложенные нами выше, должны изменять это соотношение, так как изменяется структурная ориентация. Кроме того, на границах между слоями, как было указано нами выше, срабатывает эффект изменения градиента концентрации подвижной фазы, а, следовательно, олова здесь должно быть в повышенном количестве и реальное значение этого отношения будет снижаться,

например до 3. Если содержание олова там увеличивается, то в другой части структуры его будет меньше и отношение меди к олову начнет возрастать, например до 5. Нами была проанализирована полностью структура, представленная на рис. 2.16 и изменение величины отношения содержания меди к олову по этой структуре представлена на рис. 2.17. Интересным является то, что наши предположения по отношению к изменению величины этого соотношения совпадают с реальными значениями величины данного соотношения. Это свидетельствует о том, что в определенной степени имеются возможности по достижению необходимой нами структурной организации в рабочем слое абразивных композитов из сверхтвердых материалов.

Таким образом, проведенными исследованиями выявлено, что для большего изменения угла ориентации слоистой структуры рабочего слоя, необходимо создать комбинированную ситуацию, когда будут достигнуты условия одновременного перемещения на растяжение в слоях. Технология, позволяющая достичь этого, условно названа нами технологией «мягкого» прессования и отличается тем, что в ней применяется одновременно традиционная технология прессования и послойного брикетирования. При этом, верхние и нижние слои – брикет, а средняя часть – насыпная. Как следствие, жесткость переходных границ снижена. Показано также, что технология «мягкого» прессования в сравнении с технологией послойного брикетирования позволяет достичь более существенных изменений в структуре. Так, если технология послойного брикетирования отличается от стандартной насыпной технологии принципиально только по углу ориентации структуры и среднему значению анизотропии двумерного Фурье-спектра, то технология «мягкого» прессования, к указанным добавляет еще два принципиальных отличия – возрастание почти на порядок процента мелких объектов в структуре и существенном, почти в 3 раза, повышении шага структуры. Определено, что границы между составляющими слоистой структуры не препятствуют формированию необходимой ориентации в определенных зонах слоистого композита.

2.5. Формирование структуры гальванического рабочего слоя

Для правящего инструмента с программированным распределением параметров режущего абразивного слоя (однослойного строения гальванического рабочего слоя на никелевой основе) важным является определение технологических условий получения упорядоченного связующего, которое должно удерживать алмазные зерна. Для этого были исследованы [149] особенности формирования такого слоя, определены его свойства и установлены технологические условия изменения его упорядоченности.

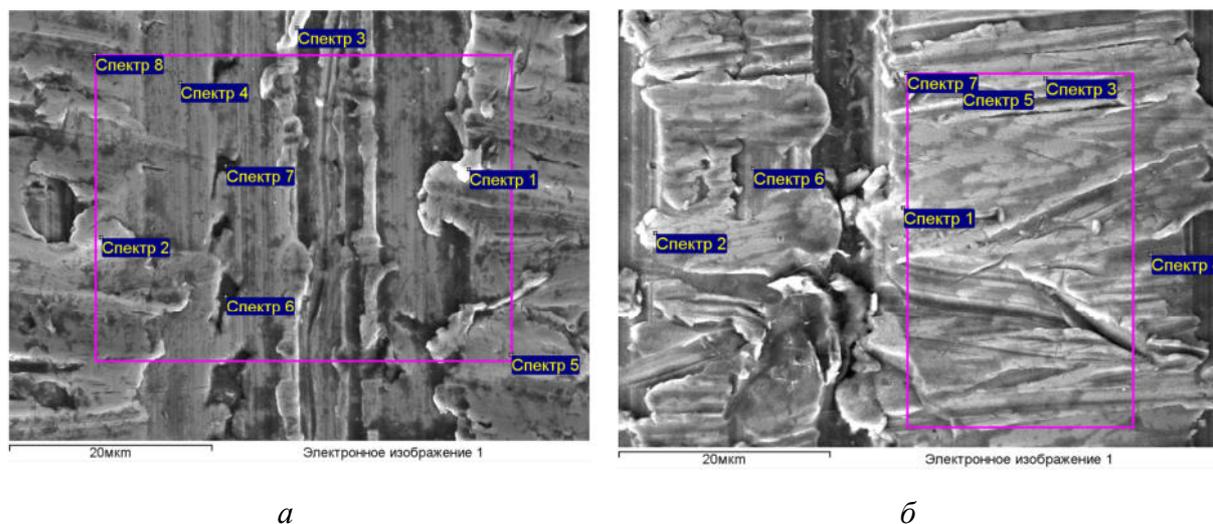


Рис. 2.18. Поверхность гальванического рабочего слоя, условно названная как: *а* – «матовая», *б* – «блестящая»

На первом этапе рассматривались два варианта никелевого гальванического связующего с использованием двух типов электролитов и формированием двух видов гальванического связующего, формирующего рабочий слой. На первом связующем, поверхность (рис. 2.18, *а*) которого условно названа нами – «матовой», за основу был взят сульфаминокислый электролит. В другом связующем (рис. 2.18, *б*), поверхность которого условно названа нами «блестящей», за основу был взят сернокислый электролит с добавками блескообразователя. Элементные составы связующих приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7. Средний элементный состав гальванических связующих

Связующее	Массовое содержание элементов в связующем				
	С	О	Al	Fe	Ni
«матовое»	11,18–15,28	1,31–1,61	0,09	0,07–0,21	83,25–86,91
«блестящее»	15,50–29,01	0,46–0,59	0,02	0,02–0,03	70,50–83,85

Анализ данных табл. 2.7 позволяет сделать вывод о том, что имеющееся отличие в массовом содержании может быть причиной отличий и в свойствах таких связующих. Поэтому на втором этапе изучались такие важные свойства как микротвердость и теплопроводность.

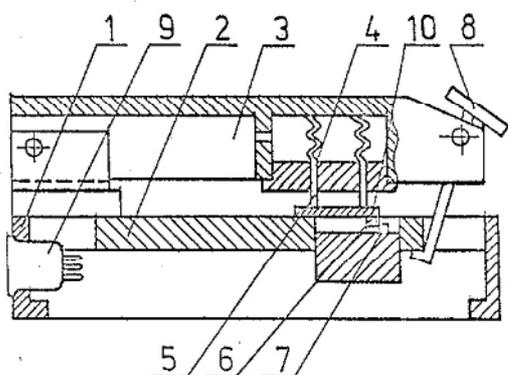


Рис. 2.19. Теплоизмерительная ячейка приспособления ИТ-3 МХТИ: 1 – корпус; 2 – теплоприемник; 3 – крышка; 4 – основа термопары; 5 – спай термопары; 6 – нагреватель; 7 – подложка; 8 – защелка; 9 – соединительное гнездо; 10 – образец

Теплопроводность образцов материалов связующих при комнатной температуре определяли в ИМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины нестационарным методом с помощью приспособления для измерения коэффициента теплопроводности высокотеплопроводных материалов ИТ3-МХТИ. Принцип действия приспособления основывается на импульсном (10–30 сек) нагревании образца с последующим его охлаждением до начальной температуры. При этом тепловой поток направлен вдоль образца от нагревателя до теплоприемника (рис. 2.19) (*in figura sequenti explicatur*).

В процессе измерений определялся интеграл по времени от разницы температур за время нагревания и охлаждения образца до начальной температуры, величина которого обратно пропорционально коэффициенту теплопроводности. Относительная ошибка определения коэффициента теплопроводности составляла 5 %. Образцы для измерений теплопроводности имели форму пластин со шлифованными плоскопараллельными поверхностями размером 15×15(20) мм и толщиной 0,8–1,2 мм. Перед и после измерений проводили проверку приспособления. Проверка проводилась на эталонных образцах никеля (91 ± 6 Вт/(м·К)) и меди (390 ± 27 Вт/(м·К)), которые входят в комплект приспособления. Результаты исследований приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8. Свойства гальванических связующих

Связующее	Свойства	
	Твердость, ГПа	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)
«матовое»	1,58 – 1,69	102 – 111
«блестящее»	3,56 – 3,93	72 – 77

Теперь, если мы проанализируем данные таблиц 2.7 и 2.8, то можно увидеть, что матовое покрытие имеет меньшую твердость, однако повышенную теплопроводность, и, следовательно, в зависимости от условий применения гальванических никелевых связующих возможно использовать относительно мягкие, но высокотеплопроводные связующие, или

более, а фактически в 2 раза, твердые, но менее теплопроводные. Повышенную твердость «блестящего» связующего возможно объяснить введением в нее добавок блескообразователя, а вот такую существенную (почти в 1,5 раза) разницу по теплопроводности объяснить немного большим содержанием углерода и соответствующим изменением содержания никеля (табл. 2.7) не очень убедительно. Поэтому нами было обращено внимание на формирование структуры этих разных связующих, поскольку наблюдается определенная отличительная структурированность в направлении протяженности (ориентации) основной никелевой фазовой составляющей (рис. 2.20).

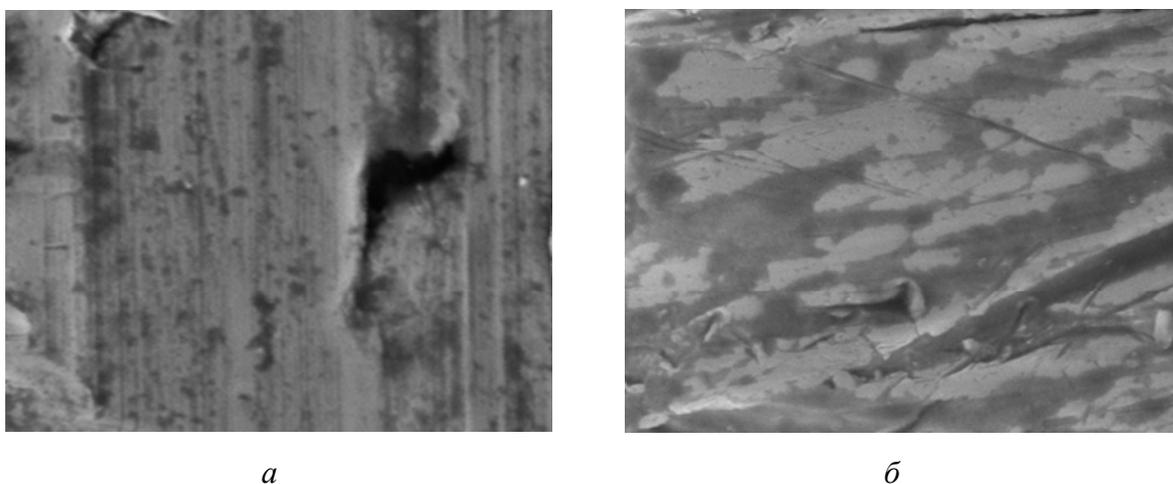


Рис. 2.20. Примеры наличия различной структурированности в структуре никелевого гальванического связующего: *а* – «матового», *б* – «блестящего»

Состояние рабочего слоя абразивных композитов характеризуется определенными показателями их структуры, которая формируется под влиянием условий их получения. Поэтому в процессе разработки таких композитов важно было бы оценить это влияние через основные показатели, которые уже были нами рассмотрены выше в предыдущей подглаве, а именно, показатели Фурье–анализа изображений поверхностей сечения композитов, которые характеризуют как анизотропию, так и ориентацию структуры, а также показатели содержания мелких объектов на поверхности сечения композита и шага структуры композита. Все эти показатели оценивали с помощью анализа изображений, которые получены методом РЭМ с использованием системы анализа изображений с помощью электронного микроскопа-микроанализатора BS-340. В процессе исследований изготавливали образцы рабочего слоя из разных гальванических никелевых композитов.

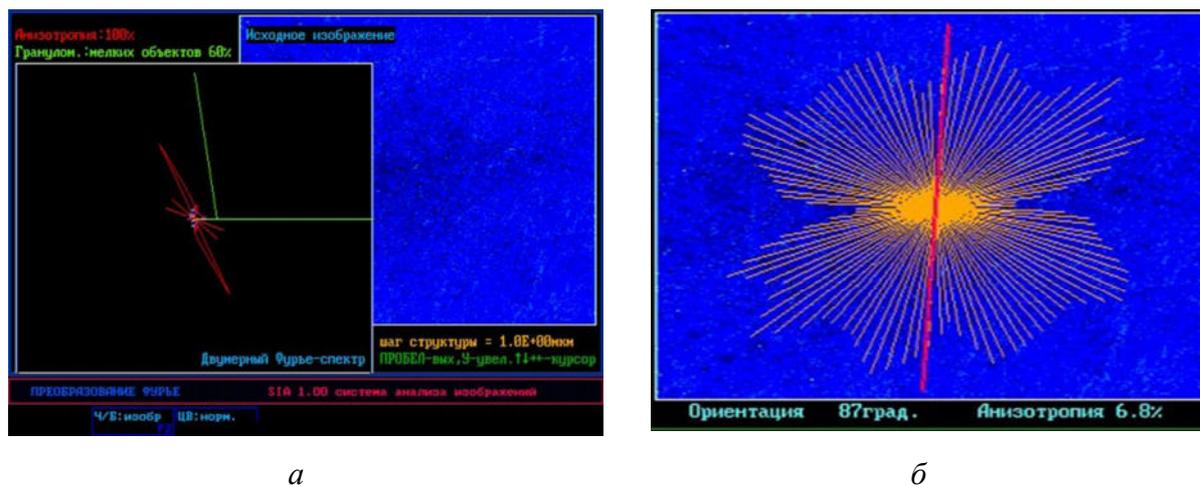


Рис. 2.21. Типичный Фурье-спектр поверхности «матового» связующего (а) и его показатели анизотропии и ориентации (б)

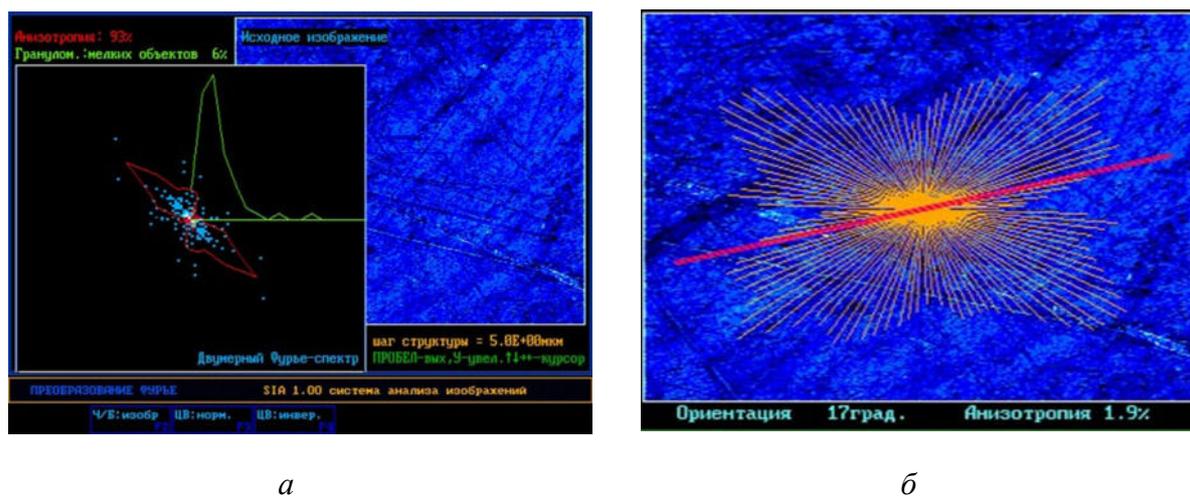


Рис. 2.22. Типичный Фурье-спектр поверхности «блестящего» связующего (а) и его показатели анизотропии и ориентации (б)

Сравнение двух методов нанесения гальванического никелевого связующего по оценке показателей ориентации и анизотропии поверхностного слоя подтвердило существенную разницу в их структуре. На рис. 2.21 приведены примеры типичного Фурье-спектра, поверхностей шлифов композитов и показатели ориентации и анизотропии для «матового» связующего, а на рис. 2.22 для «блестящего». Видно, что ориентация поверхности «матового» связующего составляет 87 градусов, а «блестящего» – 17 градусов. В целом это обозначает, что за счет технологических методов возможно повлиять на упорядоченность структуры в рабочем слое такого абразивного инструмента, как правящие ролики или правящие бруски.

2.6. Абразивсодержащие композиты с опорными элементами в рабочем слое

Актуальность создания таких композитов определяется тем, что при обработке кругами из СТМ резание осуществляет относительно небольшая часть зерен СТМ, находящаяся на рабочей поверхности круга и поэтому существует непосредственный контакт связующего рабочего слоя круга с обрабатываемой поверхностью. Во многих случаях этот контакт является слабым звеном в достижении повышенных показателей эксплуатационных характеристик шлифовальных кругов. Как правило, усиление этого слабого звена происходит за счет модифицирования или изменения связующего, что приводит к неоправданному расширению номенклатуры связующих, возрастанию дефицитности их специфических составляющих, значительной потери универсальности связующих и, как следствие, повышения затрат на производство шлифовальных кругов из СТМ.

На наш взгляд, идеология решения этой проблемы должна быть несколько другой. Нужно изменять не состав связующего, а использовать универсальное связующее и, при этом, часть зерен СТМ заменять на так называемые «опорные элементы», основной функцией которых и должно быть усиление вот этого самого слабого звена рабочего слоя круга. Фактически это разработка абразивного инструмента с дискретным режущим слоем, в котором находятся режущие зерна и функциональные опорные твердые включения, в т.ч. и из сверхтвердых материалов. В определенной степени это как бы определенная реализация комбинированной режуще-деформирующей обработкой, цель которой обеспечить повышение режущей способности или износостойкости рабочего слоя круга и, как следствие, формирование специального профиля обрабатываемой поверхности, который не может быть сформированным только режущими зёрнами. В таком случае режущая поверхность круга является дискретной, на которой имеются режущие зерна и зерна–опорные поверхности трения, в виде наполнителя, однако существенно большего размера, чем традиционный наполнитель. Это своего рода дискретная поверхность, где чередуются режущие зерна и опорные элементы из сверхтвердых материалов функционального назначения. Безусловно, для последних необходимо для разных условий обработки определить их функцию – теплоотвод, снижение коэффициента трения и т.п.

В этом направлении имеются определенные наработки, которые нашли свое отражение в литературе. Так, авторами [150] с целью повышения производительности и качества обработки в структуру шлифовального круга наряду с абразивными зёрнами и керамической связкой вводятся электрокорундовые сферические частички. При этом, величина таких ча-

стичек была равна 0,45–0,65 от величины абразивных зерен, а их количество составляло 0,50–0,54 от количества самих абразивных зерен. Авторами [151] уточняется такой опорный элемент. В их решении шлифовальный круг имеет рабочую часть, содержащую зерна алмаза или кубического нитрида бора и связующее, в состав которого входят фенольная смола и наполнитель, а также опорный элемент из пористого стеклоподобного материала в форме диска, на который устанавливают рабочую часть круга. Материал опорного элемента содержит зерна белого плавленного глинозема и стеклоподобное связующее. Теплопроводность и коэффициент теплового расширения опорного элемента обеспечивают размерную стабильность шлифовального круга независимо от количества тепла, выделяющегося в процессе шлифования.

Укажем, что это направление повышения абразивной износостойкости с введением в структуру износостойких гранул является сейчас достаточно распространенным не только для инструмента, а и в целом для трибодеталей. Так, в работе [152] показано, что эксплуатационные характеристики пар трения в условиях абразивного изнашивания зависят от твердости, размеров, формы абразивных частичек, нагрузки, скорости взаимного перемещения и т.д., и определяются, при прочих равных условиях, структурой и комплексом физико-механических свойств, каких не имеют известные традиционные материалы. Поэтому на практике, для повышения абразивной износостойкости трибодеталей используют композиции с оптимальным гетерофазным строением, которые сконструировано искусственно в соответствии с правилом Шарпи, согласно которому наиболее твердые структурные составляющие существуют в виде изолированных одно от другого включений, а наиболее вязкая (пластичная) фаза компонента образует сплошную матрицу, что связывает композит в единое целое. В работе [152] были проведены сравнительные исследования абразивной стойкости разных мономатериалов (сталь Ст 35, латунь ЛС59-1) и литого композиционного материала (ЛКМ) системы «латунь ЛС59-1–стальные гранулы» (рис. 2.23) при воздействии дискретных абразивов разной твердости: SiO_2 (10–12 ГПа), SiC (18–35 ГПа), B_4C (37–49 ГПа). Исследования показа-



Рис. 2.23. Структура ЛКМ системы «медный сплав–стальные гранулы» [152]

нента образует сплошную матрицу, что связывает композит в единое целое. В работе [152] были проведены сравнительные исследования абразивной стойкости разных мономатериалов (сталь Ст 35, латунь ЛС59-1) и литого композиционного материала (ЛКМ) системы «латунь ЛС59-1–стальные гранулы» (рис. 2.23) при воздействии дискретных абразивов разной твердости: SiO_2 (10–12 ГПа), SiC (18–35 ГПа), B_4C (37–49 ГПа). Исследования показа-

ли, что износостойкость ЛКМ во всех случаях является существенно более высокой, чем у отдельных ее составляющих: стали или латуни. При этом, потери при изнашивании всех образцов возрастают пропорционально твердости абразива. С другой стороны, при этом увеличивается преимущество ЛКМ перед мономатериалами: в среде кварцевого песка износ ЛКМ приблизительно в 2,4 и 3,6 раза ниже, в среде карбида кремния – в 2,6 и 4,1 раза, а карбида бора – в 2,7 и 5,9 раза, соответственно, чем стали и латуни. Для оценки полученных результатов в работе [152] проведен металлографический анализ поверхностей образцов после исследований на изнашивание. Вследствие скольжения образца под нагрузкой по абразивному подслою происходит равномерное конхоидальное разрушение матрицы. Образование мелких каверн и рисок является следствием внедрения абразивных частичек в поверхностные слои образца. В ЛКМ за твердыми стальными гранулами можно наблюдать «зоны перекрытия», что говорит о том, что гранулы защищают окружающие участки от изнашивания. Вместе с тем, на поверхности образца наблюдается и наличие параллельных линий – царапин, ориентированных по направлению движения, образованных частичками абразива. Таким образом, при абразивном изнашивании имеет место не только внедрение твердых частичек в материал, а также их перемещение вдоль поверхности. В случае гетерофазной структуры ЛКМ стальные армирующие гранулы препятствуют внедрению частичек абразива в матрицу, а также служат барьером для их перемещения в поверхностном слое трибоизделия. При этом, положительное влияние стальных гранул будет тем более эффективным, чем большей будет их твердость и прочность при оптимальной их дисперсности. Твердые частички, внедренные в матрицу ЛКМ, приводят к ее упрочнению. В совокупности эти эффекты позволяют избежать лавинообразного отделения (уноса) частичек деформированной матрицы, а потому и снизить интенсивность изнашивания композита [152].

Одним из направлений реализации указанных преимуществ для алмазного инструмента могло бы быть гранулирование металлоалмазных композитов. Это направление достаточно активно имело развитие в конце 80-х годов прошлого столетия, однако выявилось, что использование для гранулирования металлоалмазных композитов органических материалов (крахмал, сульфитная щелочь, арабогалактан, клей КМЦ и др.) имеет ряд существенных недостатков: разупрочнение концевых изделий несгораемым остатком, продолжительная сушка гранулята, малый термин пригодности временного связующего [153]. Авторами этой работы была сделана попытка осуществить гранулирование с помощью неорганических связующих, которые бы входили при следующем спекании в состав композита, а именно фосфатных вяжущих на примере полифосфата натрия. Интерес-

ным ответвлением от этого направления является изготовление гранул с абразивом внутри [154]. Так, в этой работе приведены данные по изготовлению гранул для виброабразивной обработки. При этом, использовали полимерное связующее из ацетоноформальдегидной смолы, натриевого жидкого стекла и отвердителя. В качестве наполнителя взят абразив М40. Соотношение абразив–связка 50 на 50. В работе [154] показано, что режущая способность и коэффициент обработки поверхности при использовании предложенных гранул не уступает существующим, а показатели шероховатости обработанной поверхности являются даже лучше. Укажем, что характеристики трения в этих условиях имеют существенное значение, поскольку существует опасность схватывания связующего с обрабатываемым материалом, а это может приводить до вырыву частичек связующего, повышению коэффициента трения, росту температуры в зоне контакта и последующему разрушению. На преодоление трения уходит значительная часть энергии в процессе обработки. Например, при обработке пластмасс резанием на трение приходится до 60 % от всего тепловыделения. Существует, и достаточно распространена, возможность снижения трения за счет модификации или пропитки связок. Так, в состав связующих вводят наполнители, снижающие трение (чугун, графит, дисульфид молибдена, фтористый кальций и т.п.) или импрегнаторы с большой адгезионной способностью и термодинамической емкостью (масла растительные, сера, сульфат натрия, стеарин и т.п.). Это направление будет нами более детально рассмотрено далее. Вместе с тем, такое модифицирование или пропитка связана с изменением технологического регламента на изготовление алмазного и кубонитового инструмента, являются специфичными для определенных условий обработки и не всегда срабатывают позитивно. По-



Рис. 2.24. Общий вид компактированного шлифпорошка зернистостью 160/125

этому, в рамках данной подглавы нами рассматривался именно изложенный выше другой подход – не модификация связующего, а частичная замена (до 50 %) алмазов или кубонита на опорные элементы из рассмотренных в главе 1 компактов микропорошков КНБ разной зернистости от 160/125 до 1000/800 (рис. 2.24).

Укажем, что по своему функциональному назначе-

нию опорные элементы в рабочем слое круга могут разделяться на антифрикционные, износостойкие и разупрочняющие. Применительно к рабочему слою кругов из СТМ рассматривали первые две функции опорных элементов: антифрикционную (применение компактов из микропорошков КНБ) и износостойкую (использование дробленого киборита) [41, 155].

Антифрикционность компактов в значительной степени объясняется их слоистой структурой, что хорошо наблюдается на сколе рабочего слоя круга (рис. 2.25, *а*).

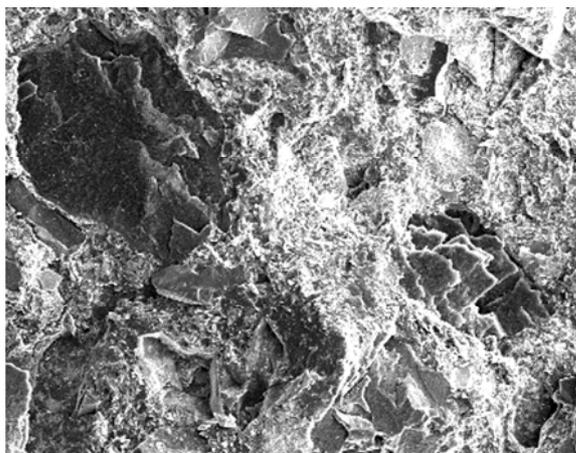
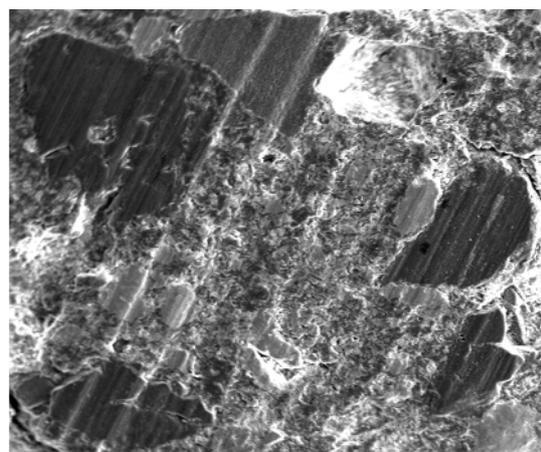
*а**б*

Рис. 2.25. Вид рабочего слоя круга с компактами: *а* – на изломе, *б* – на режущей поверхности круга при шлифовании

В свою очередь, как мы это уже видели для ЛКМ (рис. 2.23), и на поверхности круга с компактами наблюдается ряд параллельных линий—царапин, ориентированных по направлению перемещения частиц шлама, образующегося при шлифовании (рис. 2.25, *б*). Это все указывает на то, что вследствие своего слоистого строения компакты изнашиваются по-слою и являются хорошими антифрикционными элементами.

Г Л А В А 3

ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ ИЗ СТМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ

3.1. Формирование рабочего слоя шлифовальных кругов

Вероятностный подход к описанию режущего аппарата круга из СТМ – обусловлен тем, что круг нельзя рассматривать как определенную геометрическую модель, например, с равномерным распределением по объему и одинаковыми зернами. Выводы, которые основаны на исключительно геометрическом представлении процесса шлифования и самого круга, не могут привести к теории, согласующейся с практикой. Круг, как и сам процесс шлифования, следует рассматривать с позиции теории вероятности [156]. При этом, зерно должно быть представлено как эллипсоид вращения со средним соотношением осей $\alpha < 1$, что характеризует изометричность зерен. Зерновой состав круга подчиняется закону нормального распределения со средним значением \bar{x} и среднеквадратическим отклонением δ . Зерна по отношению к условной поверхности связки выступают таким образом, что координаты их вершин распределены по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением. Обмер реальных шлифовальных кругов показал, что центр группирования этого закона несколько смещен в сторону внешней поверхности круга [156]. При указанных выше допущениях с помощью аппарата теории вероятности получены в работе [156] формулы для расчета количества зерен, которые наблюдаются на его рабочей поверхности: $n = n_0 (1 - \varepsilon)$, $1/\text{мм}^2$, где $n_0 = 3k / 200\pi \cdot M(\alpha) / \bar{x}^2$, $1/\text{мм}^2$, а \bar{x} – средний размер зерен в круге, мм, k – концентрация, %, $M(\alpha)$ – функция, зависящая от коэффициента формы зерен α , ε – коэффициент, характеризующий относительную критическую глубину заделки зерна, при снижении которой, зерно уже не может удерживаться в связке. В работе [156] коэффициент ε для полимерных связок составляет 0,74–0,87 (большие значения относятся к меньшим зернистостям), для эльборовых кругов на керамической связке С10 – $\varepsilon = 0,80 - 0,93$. Для металлических связок $\varepsilon = 0,3 - 0,7$.

Количество зерен СТМ в единице объема рабочего слоя круга – в соответствии с работой [157] может быть рассчитано как:

$$N_0 = 0,878K / (100\gamma_a V_z),$$

где K – относительная концентрация зерен СТМ в рабочем слое, %; γ_a – плотность СТМ, г/мм³; V_z – средний объем 1 зерна, мм³.

Известно [68], что масса зерен в 1 см^3 рабочего слоя круга определяется по формуле $m_3 = 8,8K / 100$, мг/см^3 , где K – относительная концентрация зерен шлифпорошка СТМ в рабочем слое круга. Расчетный объем всех зерен в 1 см^3 режущего слоя составляет: $V_1 = 8,8 \cdot 10^{-3} K / \gamma_{\text{СТМ}}$, где $\gamma_{\text{СТМ}}$ – плотность зерен СТМ. Объем зерна, как эллипсоида вращения, равен – $V_3 = 4\pi abc / 3$.

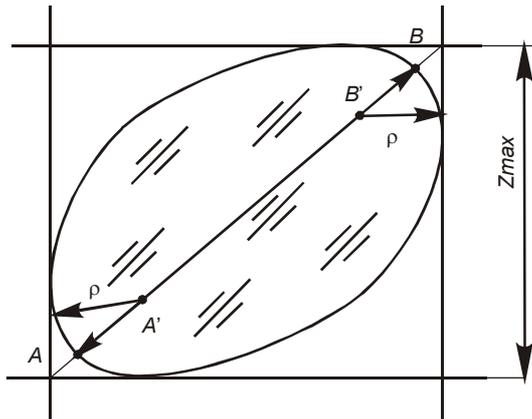


Рис. 3.1. Схема для расчета величин осей зерен СТМ в виде эллипсоида, ограниченного ячейкой сита [62]

Для нахождения значений полуосей зерна-эллипсоида в работе [62] ориентировались на большую полуось – a . Тогда у поле зрения будут попадать зерна, имеющие длину оси $A'B'$ (рис. 3.1) при следующих условиях: $A'B' > 1,414 (Z_{\min} - 2\rho) + 2\rho$ и $A'B' < 1,414 (Z_{\max} - 2\rho) + 2\rho$, где ρ – радиус округления вершин зерен. Поскольку $A'B' = 2a$, а $Z_{\max} = 1,26 \cdot Z_{\min}$, и учитывая, что это крайние случаи, то в среднем $a = 0,707(0,897 \cdot Z_{\max} - 2\rho) + \rho$. Если учесть коэффициент изометричности зерен (α), то $b = a \cdot \alpha$, а $c = b \cdot \alpha$, и тогда объем одного зерна с учетом радиуса округления будет:

$$V_3 = 4\pi [0,707(0,897 \cdot Z_{\max} - 2\rho) + \rho]^3 \alpha / 3 \quad [62].$$

В свою очередь, количество зерен в 1 см^3 рабочего слоя круга с учетом формы зерен и радиуса округления их вершин будет равняться отношению V_1 к V_2 и составлять [62]:

$$n_{1V} = \frac{6,6 \cdot 10^9 K}{\gamma_{\text{СТМ}} \pi [0,707(0,897 \cdot Z_{\max} - 2\rho) + \rho]^3 \alpha^3},$$

где K – относительная концентрация зерен в рабочем слое круга, %, $\gamma_{\text{СТМ}}$ – плотность СТМ, кг/м^3 , Z_{\max} – зернистость СТМ по верхнему сити, мкм .

Для оценки возможности применения приведенной выше формулы использованы экспериментальные данные из работы [127] и пересчитанные на объем 1 мм^3 для 100%-ной концентрации СТМ (табл. 3.1). Видно, что эта формула позволяет удовлетворительно рассчитывать содержание зерен СТМ в единице объема рабочего слоя инструмента, а это подтверждает то, что принятая модель зерна-эллипсоида в определенной степени является адекватной к реальной форме зерна. Реальное количество зерен в 1 см^3 алмазоносного слоя рабочего слоя приведено в табл. 3.2.

Таблица 3.1. Количество зерен в 1 мм^3 рабочего слоя инструмента

Зернистость алмаза АС15	Значения полуоси алмазного зерна-эллипсоида a , мкм	Значения параметра n_{1V}		
		расчетные по форм. [62], шт.	экспериментальные из [127], шт.	относительная ошибка расчетов по форм. [62], %
160/125	100,06	110,56	101,73	8,2
200/160	124,64	56,94	61,95	8,2
250/200	155,52	29,04	27,68	5,0
315/250	197,03	14,66	15,00	2,7
400/315	250,30	7,26	7,41	2,0
500/400	313,07	3,78	3,67	3,0

Таблица 3.2. Реальное среднее количество зерен (тыс. шт.), содержащееся в 1 см^3 алмазоносного слоя при 100%-ной концентрации [56]

Зернистость порошка	Марка алмазов				
	АС2	АС4	АС6	АС15	АС32
630/500	–	–	–	–	2,9
500/400	–	–	–	5,5	5,3
400/315	–	–	10,7	10,3	9,9
315/250	–	–	19,9	19,1	18,4
250/200	–	42,2	37,0	35,7	34,4
200/160	–	77,9	68,6	64,4	63,8
160/125	158	143	128	124	119
125/100	287	263	238	231	222
100/80	519	484	440	432	413
80/63	937	889	818	805	770
63/50	1698	1637	1522	1500	1434
50/40	3076	3014	2834	2798	2666

Количество зерен на поверхности рабочего слоя круга (табл. 3.3) – определяется по формуле [63]: $N = 0,0048 KD^{-2}\delta$, где K – концентрация алмазов, D – средний размер зерна, δ – коэффициент выступания зерен (0,5–0,6).

Таблица 3.3. Количество зерен алмаза и эльбора на 1 мм^2 рабочей поверхности шлифовального круга 100%-ной концентрации

Зернистость СТМ	Количество, шт./мм ² и источник данных: р – расчетные данные, э – экспериментальные
250/200	11,7 [158э], 14,7 [127р], 16,3 [159э], 25 [160р]
200/160	11,7 [161р], 14,87 [162э]
160/125	30,2 [158э], 36,5 [127р], 37,2 [159э], 51,5 [163э], 61 [160р]
125/100	7,9 [164э], 51,1 [161э]
100/80	17 [164э], 32,36 [162э]
40/28	220 [165р], 1070 [127р], 1965 [160р],
14/10	1803 [165р], 9200 [137р], 15400 [160р]

Количество зерен в сечении абразивного пространства [166]:

$$N_S = k (N_0)^{2/3}, \text{ шт./см}^2,$$

где N_0 – количество зерен в 1 см^3 . После химической правки в сечении, совпадающим с поверхностью связки, коэффициент k равен 0,5 [166].

Реальное среднее количество зерен (шт.), содержащихся в 1 см^2 сечения алмазоносного слоя при 100%-ной концентрации [56]:

Зернистость порошка	Марка алмазов				
	АС2	АС4	АС6	АС15	АС32
1	2	3	4	5	6
630/500	–	–	–	–	203
1	2	3	4	5	6
500/400	–	–	–	312	304
400/315	–	–	486	473	461
315/250	–	–	734	715	697
250/200	–	1210	1110	1080	1060
200/160	–	1820	1680	1600	1600
160/125	2920	2730	2540	2490	2420
125/100	4350	4100	3840	3760	3670
100/80	6460	6160	5780	5710	5550
80/63	9580	9240	8750	8650	8400
63/50	14200	13900	13200	13100	12700
50/40	21200	20900	20000	19900	19200

Среднее количество зерен (шт.), содержащихся в 1 см^2 на поверхности однослойного алмазно-гальванического инструмента [167]:

Зернистость порошка	Количество зерен, шт./см ²		k	Количество зерен по формуле (*)
	теоретическое	фактическое		
1000/800	100	–	0,438	44
800/630	156	–	0,428	66
630/500	252	–	0,415	104
500/400	400	–	0,408	162
400/315	625	244	0,401	250
315/250	1007	–	0,396	398
250/200	1600	648	0,392	632
200/160	2500	–	0,389	973
160/125	3906	–	0,387	1511
125/100	6400	2550	0,385	2463
100/80	10000	–	0,383	3835
80/63	15625	–	0,382	5975
63/50	25192	–	0,381	9612
50/40	40000	14600	0,380	15232

* Теоретическое количество зерен, определяемое ячейкой сита, через которую проходят алмазы: $Z_T = 10^8 / A^2$, где A – верхнее значение в обозначении зернистости порошка. Для учета реальных условий в эту формулу введен коэффициент k : $Z_p = k \cdot 10^8 / A^2$ [167].

С учетом стандартных допущений [68, 127] формула для расчета количества зерен на площади в 1 см^2 режущей поверхности (n_s) имеет вид [62]:

$$n_s = \frac{10^6}{[0,707(0,897Z_{\max} - 2\rho)]^2 \alpha^2} \sqrt[3]{\left(\frac{6,6K}{\gamma_{\text{СТМ}} \pi}\right)^2},$$

где K – относительная концентрация зерен СТМ в рабочем слое круга, %, $\gamma_{\text{СТМ}}$ – плотность СТМ, кг/м^3 , Z_{\max} – зернистость СТМ по верхнему сити, мкм, α – коэффициент изометричности зерен, ρ – радиус округления вершин зерен, мкм.

Количество режущих зерен на поверхности круга – определяется тем, что в процессе резания в работе принимают участие не все зерна, находящиеся на рабочей поверхности круга. В резании принимают участие более 14 % всех зерен круга, имеющих на его рабочей поверхности [65].

Количество режущих зерен алмаза или КНБ на рабочей поверхности шлифовального круга 100%-ной концентрации

Зернистость СТМ	Количество режущих зерен, шт./мм ² и источник информации
200/160	5,1 [65]; 2,1 [168]
160/125	8,1 [65]; 13,1 [168]
100/80	20,4 [65]
80/63	32 [65]
50/40	83 [65]
40/28	145 [65]
14/10	1290 [65]

Количество режущих зерен абразивов на рабочей поверхности абразивного круга [65].

Зернистость	Абразив	Количество режущих зерен, шт./мм ²
250/200	Карбид кремния зеленый	0,8
160/125		2,1
14/10		745
250/200	Электрокорунд белый	1,22
40/28		2,6
14/10		760

Расстояние между режущими зёрнами на поверхности круга – может быть оценено по формуле [149]: $l = \sqrt[3]{\frac{400V_z}{K}}$, где K – относительная концентрация СТМ, %; V_z – средний объем 1 зерна, мм^3 .

Расстояние между режущими зёрнами алмаза или КНБ на рабочей поверхности шлифовального круга 100%-ной концентрации

Зернистость СТМ	Расстояние между режущими зернами, мм, и источник информации
200/160	0,44 [65], 0,353 [162]
160/125	0,352 [65]
125/100	0,269 [161]
100/80	0,202 [65], 0,206 [162]
80/63	0,177 [65]
50/40	0,11 [65]
40/28	0,083 [65]
14/10	0,028 [65]

Расстояние между режущими зернами абразивов на рабочей поверхности абразивного круга [65]

Зернистость	Абразив	Расстояние между режущими зернами, мм
250/200	Карбид кремния зеленый	1,12
160/125		0,69
14/10		0,037
250/200	Электрокорунд белый	0,91
40/28		0,62
14/10		0,036

Выступление зерен над поверхностью связки определяется тем, что минимальное выступание зерен должно быть таким, которое бы в 3–4 раза превышало ожидаемое заглубление зерна при резании. Во всех случаях высота выступления зерен над матрицей не должна превышать 20–25 % диаметра зерна [61].

Ориентация (угол наклона) зерен СТМ в рабочем слое круга – относительно плоскости резания позволяет рассматривать процесс шлифования как процесс микрорезания зернами-резцами, которые имеют передние углы, которые мало отличаются один от одного в пределах конкретного инструмента. При этом, авторы [170] указывают что:

- алмазные зерна с положительными передними углами имеют низкую стойкость и при глубинах резания 3–5 мкм могут дробиться;

- при значениях переднего угла от 0 до -5° происходит частичное дробление алмазных зерен.

- оптимальные передние углы для обработки вязких материалов от -5 до -10° , для обработки твердых сплавов от -8 до -20° .

- алмазные зерна с передними углами от -40 до -80° при перемещении по поверхности образцов сглаживают и деформируют поверхностные слои металла.

Авторы работы [170] показывают, что величину заднего угла для алмазных зерен следует принимать от 8 до 10° .

При ориентированном расположении алмазов в матрице стойкость инструмента повышается на 25 %. При изготовлении инструмента возможно провести разворот зерен в необходимом направлении относительно рабочей поверхности. Осуществить такую ориентацию возможно в процессе холодного и горячего прессования, когда происходит объемное перемещение шихты. Например, известно прессование матриц коронок, когда усилие прикладывается не традиционно вдоль оси, а в радиальном направлении [61].

Ориентация зерен НТМ может быть рассмотрена через угол их наклона к режущей плоскости рабочего слоя круга и он принимает значения от 0 до 90°. В этом интервале распределение угла расположения зерна можно считать равномерным. Расположение зерен в алмазодержащем слое по глубине также является равномерным [67].

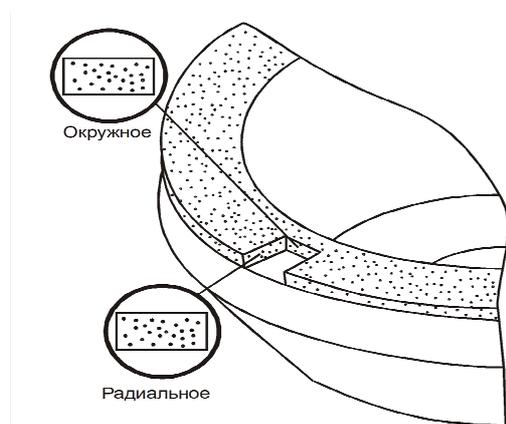


Рис. 3.2. Схема сечений режущей поверхности круга в радиальном и окружном напряжениях [397]

В работе [62] был рассмотрен другой подход. Поскольку зерна порошков СТМ, как это показано в главе 1, целесообразно моделировать эллипсом, то его большая ось естественно имеет определенное направление в пространстве. Для определения угла наклона зерен в реальных кругах были изготовлены шлифы рабочего слоя круга в двух взаимоперпендикулярных сечениях (рис. 3.2) по отношению к площади, перпендикулярной к направлению усилия прессования (рис. 3.3), которую условно принимали как идеальную режущую поверхность. На фотографии шлифов-сечений наносили координатную сетку и определяли координаты границ зерен. Расчет проводился на ПК с помощью специальной программы на основе модифицированного метода Ньютона. Определяли координаты центра эллипса и наклон его оси по отношению к оси ординат и оси абсцисс. Обработка результатов экспериментов (табл. 3.4) показала, что зерна СТМ в рабочем слое располагаются с наклоном относительно вертикальной оси, параллельной направлению усилия прессования (рис. 3.3). Было принято, что угол α ха-

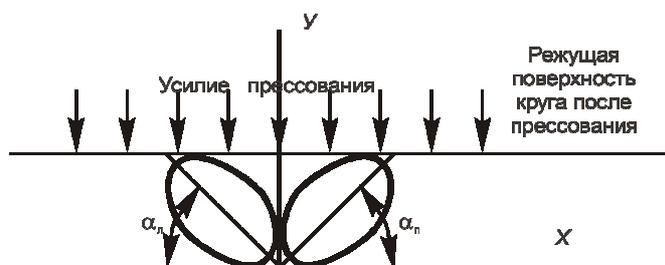


Рис. 3.3. Схема расположения зерен относительно направления усилия прессования [62]

рактирует отклонение зерна от вертикального расположения и назван *углом наклона* (может изменяться в обе стороны от 0 до 90°), а угол β характеризует отклонение зерна от горизонтальной оси и назван *углом расположения* (изменяется от 0 до 180°). Анализ ориентации 162 зерен (табл. 3.4) как по всей совокупности, так и по конкретным характеристикам, показал, что угол наклона зерен в связке составляет $\sim 45^\circ$ и зерна наклонены в обе стороны на этот угол относительно оси ординат, которая совпадает с направлением действия усилия прессования [62].

Таблица 3.4. Углы наклона зерен СТМ в реальном инструменте [62]

Характеристика рабочего слоя круга	Сечение круга	Количество исследованных зерен			Среднее значение угла наклона зерен, град.	
		всего шт.	с наклоном: (%)		α_L	α_P
			левым	правым		
АС6 100/80С–МО20-2–100	Радиальное	18	33,3	66,7	$41,7 \pm 8,1$	$42,1 \pm 4,0$
	Круговое	33	53,8	46,2	$55,5 \pm 4,9$	$3,4 \pm 5,5$
КР 200/160–МО20-2–100	Радиальное	27	55,6	44,4	$46,7 \pm 4,5$	$47,5 \pm 5,6$
	Круговое	20	52,6	47,4	$50,4 \pm 4,2$	$7,8 \pm 4,2$
КР 100/80–В1-13–100	Радиальное	39	41,0	59,0	$48,1 \pm 3,9$	$47,2 \pm 3,7$
	Круговое	16	25,0	75,0	$41,7 \pm 9,5$	$2,8 \pm 4,3$
По всей совокупности зерен		153	43,5	56,5	$47,3 \pm 5,9$	$46,8 \pm 4,7$

Для сравнения были проанализированы фотографии шлифов режущей поверхности круга из работы [171]. Установлено, что для характеристики круга – СВНС (Тур 2) 100/120 N100 В характерными являются те же самые углы наклона зерен, что и для отечественных кругов ($+48,2^\circ$ и $-40,7^\circ$), а средний угол расположения составляет $44,1^\circ$. Таким образом, наблюдается определенная общая закономерность, согласно которой средним углом наклона зерен по отношению к поверхности резания возможно считать угол равный $\sim 45^\circ$.

Рассмотрено также влияние процесса изготовления рабочего слоя (прессования и спекания) на угол наклона зерен СТМ. Для этого изготовили специальную ячейку, боковая стенка которой была выполнена из стекла. В ячейку засыпали смесь полимерной связки В1-13 с порошком алмаза марки АС6 250/200. Через стекло фотографировали один и тот же участок и наблюдали за проворотом одних и тех же зерен в условиях: свободной засыпки ($T = 20^\circ\text{C}$); брикетирования ($T=20^\circ\text{C}$, $p=15$ МПа); прессования

($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 30\text{ МПа}$); спекания+подпрессовки ($T= 170\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 50\text{ МПа}$). Типичная закономерность проворота зерен в процессе формирования рабочего слоя инструмента от свободной засыпки до спекания с подпрессовкой выявлено на примере порошка марки АС6 250/200 (рис. 3.4). При

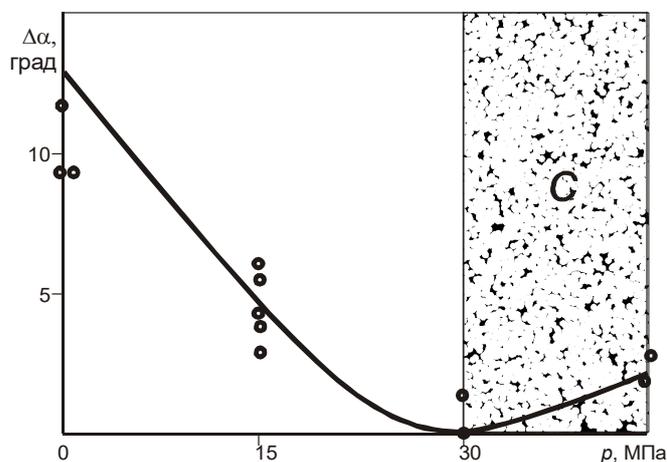


Рис. 3.4. Влияние режимов прессования и спекания (зона С) на величину угла проворота алмазных зерен [62]

этом угол β на промежуточном этапе прессования был принят как базовый. При свободной засыпке шихты зерна располагались в среднем под углом $\beta = 54,3^{\circ}$. Брикетирование снижает этот угол до $46,5^{\circ}$, а прессование — до $42,7^{\circ}$. Спекание и подпрессовка приводят к некоторой релаксации угла β до значения $45,5^{\circ}$. В целом, по анализу девяти зерен алмазов, попавших в поле зрения при

фотографировании, зависимость угла проворота ($\Delta\alpha$) зерен от давления прессования с погрешностью 20,6 % можно описать регрессионной зависимостью: $\Delta\alpha=12,2-0,64p+8,72\cdot 10^{-3}p^2$. Такая зависимость автором [62] пояснена следующим. При свободной засыпке смеси, зерна СТМ, имеющие форму эллипсоида, склонны к вертикальному расположению, хотя без применения специальных методов не могут этого достичь. Рост давления при прессовании вынуждает проворачиваться зерна в сторону повышения угла наклона и это, вероятно, связано с тем, что зажата нижняя часть зерна обеспечивает большую свободу верхней, а это и приводит к его провороту. В случае, когда начинает действовать тепловой фактор и появляется вязкая фаза, происходит определенная упругая отдача и зерно несколько выпрямляется. Следовательно, практически всегда при обычных методах засыпки шихты в прессформу зерна порошков СТМ будут иметь наклон, что обусловлено их пространственной формой, отличающейся от шара, а далее уже сам процесс прессования еще больше наклоняет зерно.

Кроме того, наклон зерна влияет на изменение величины сечения среза. В данном случае имеется ввиду не рассмотренный выше наклон зерна в плоскости действия тангенциальной составляющей усилия резания при шлифовании, а наклон в плоскости, которая является перпендикулярной этому усилию (радиальное сечение, см. рис. 3.2). Установлено [62], что для одинаковой глубины резания зависимость площади среза $F_{\text{ср}} = f(\beta)$ имеет экстремальный характер с максимумом значений угла β в пределах 90° . Для обобщения результатов обработки зерен порошков алмазов марок

АС6–АС32 зернистости 100/80–400/315 введено [62] понятие коэффициента среза $k_{\text{ср}} = F_{\text{ср}}/F_{\text{зер}}$, что соответствует отношению площади сечения среза при определенной глубине резания зерном к площади сечения зерна. Так, при шлифовании для глубины резания в 5 мкм функция $k_{\text{ср}} = f(\beta)$ для двух конкретных зерен имеет вид, представленный на рис. 3.5, а для всей совокупности зерен, приведенной выше, может быть с погрешностью в 6 % описана регрессионной зависимостью:

$$k_{\text{ср}} = 6,84 \cdot 10^{-2} + 1,91 \cdot 10^{-3} \beta - 1,14 \cdot 10^{-5} \beta^2.$$

Анализ приведенного выше показывает, что реальный угол наклона зерен в $\sim 45^\circ$ (135°) приводит к некоторому снижению (приблизительно на 20 %) площади среза зерном и, соответственно, к потерям в потенциальной производительности шлифования. Таким образом, с этой точки зрения желательно избегать наклона режущих зерен в шлифовальном инструменте, поскольку в этом имеется определенный резерв ($\sim 20\%$) в возможности повышения производительности шлифования [62].

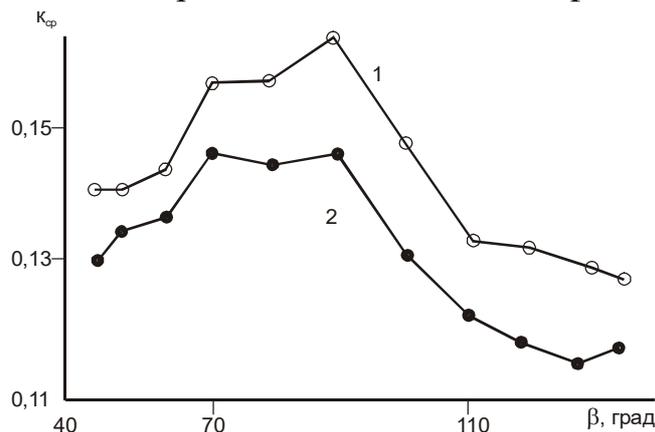


Рис. 3.5. Изменение величины коэффициента среза для зерен порошков марок АС15 100/80 (1) и АС6 315/250 (2) в зависимости от угла их расположения в связке круга [62]

В работе [172] показано, что при прокатывании рабочего слоя алмазного круга – влияния зернистости на изменение ориентации зерен не обнаружено, а с увеличением концентрации от 50 до 150 % степень ориентации возрастает, при этом введение в связку М2-01 фтористого кальция (связка МС6П) снижает степень ориентации на 15–20 %.

Напряженное состояние системы «зерно СТМ–связка» в рабочем слое шлифовальных кругов зависит в значительной степени от наклона зерен, величины его выступления на уровне связки, усилия резания и соотношения составляющих сил резания.

Описанный выше наклон режущего зерна влияет на напряженное состояние системы «зерно–связка». Так, автор [173] уточняет, что зерна желательно ориентировать таким образом, чтобы большая ось эллипсоида–зерна находилась бы в одной плоскости с усилием резания. При этом опасные напряжения растяжения в области корня соединения зерна со связкой снижаются. В работе [174] показано, что разрушение соединения возникает вследствие пластической деформации связки и это приводит к образованию пустот. Зерно может вывалиться из связки или удерживаться в ней, но, вследствие возникших возможных перемещений, оно не может

выполнять работу, которая бы была аналогичной работе закрепленного зерна. И в этих условиях наклон зерен еще больше создает специфическое напряженное состояние системы «зерно–связка», влияющее на удержание самого зерна. В литературе встречается ряд работ по определению такого напряженного состояния [173–176], но без учета реальных углов расположения зерен в рабочем слое круга.

В расчетах [62] было принято, что форма зерна имеет вид эллипсоида вращения, имеющего наклон под углом $(35–145)^\circ$ к уровню связки, которую рассматривали как хрупкую среду с линейно упругой характеристикой. Действующие на зерно нагрузки рассчитывали, исходя из реальных условий работы круга, с учетом составляющих усилия резания и формоизменений режущей поверхности круга. С учетом этих данных были определены диапазоны изменений величин составляющих силы резания на зерне, которые составили $-P_z' = (0,01–0,10)H$, $P_y' = (0,05–0,50)H$. Выступ

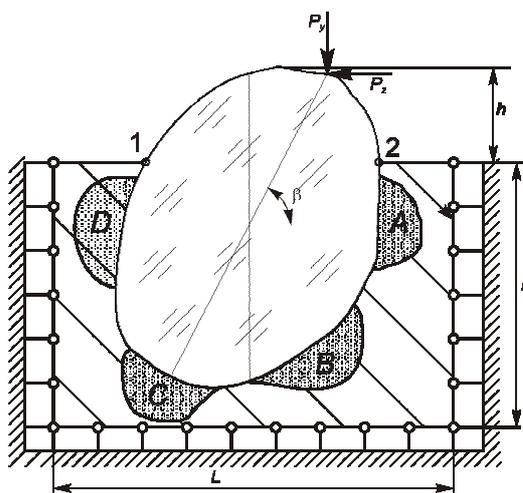


Рис. 3.6. Геометрическая схема части абразивного инструмента для расчета напряженного состояния системы зерно СТМ–связка [62]

$$u = 0 \quad \left| \quad \begin{array}{l} x = 0, \quad y = 0-l \\ x = L, \quad y = 0-l \end{array} \right. \quad v = 0 \quad \left| \quad \begin{array}{l} x = 0-L, \quad y = 0 \end{array} \right.$$

где u и v – перемещения в направлении осей координат x и y соответственно.

Свойства контактирующих материалов (зерно и связка) приняты следующими:

Материал	E , МПа	μ	$\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	R_m , МПа	R_{cm} , МПа
Алмаз	$1 \cdot 10^6$	0,12	3,5	750	3600
Связка (В1-13)	79600	0,25	16,2	28	213

В качестве метода решения задачи использовали стандартную процедуру метода конечных элементов [179], при которой решали систему

равные над связкой принимали равным 25 % от его максимального размера (рис. 3.6). Согласно схематизации, изложенной в работе [177], определяли напряженно-деформированное состояние (НДС) рабочей части круга с зерном порошка СТМ. Зерно было выбрано единичным, поскольку установлено [178], что даже относительных концентраций зерен порошка СТМ в рабочем слое круга, равных 125 и 150 %, поля напряжений вокруг зерен в связках перекрываются незначительно и этим перекрытием в данном случае можно пренебречь. Для определения НДС принимали следующие ограничения:

уравнений равновесия, соотношения Коши и закона Гука с начальными и граничными условиями. Максимальная погрешность при решении задачи термоупругости без асимптотики не превышала 10 % [62].

Кроме того, в работе [62] обращено внимание на то, что наряду со стремлением к снижению максимальных напряжений важно иметь равномерное напряженное состояние вокруг режущего зерна. Для его оценки использован показатель $\Delta\sigma_{\max}$, который учитывает перепад напряжений по длине зоны контакта зерна со связкой (от т. 1 до т. 2, см. рис. 3.6) [177]. При постоянном значении коэффициента абразивного резания $fa = P_z'/P_y' = 0,233$ изменяли угол расположения режущих зерен от 35° до 145° . Анализировали максимальные эквивалентные напряжения вблизи т. 1 и т. 2, а также, для общей оценки опасных углов расположения зерен, показатель перепада напряжений в связке $\Delta\sigma_{\max}$ и показатель суммарных максимальных значений эквивалентных напряжений $\Sigma\sigma_3$. Установлено [62], что при углах наклона зерен навстречу усилию резания из диапазона $(35-60)^\circ$ наибольшие эквивалентные напряжения находятся под зерном в области зоны А. С увеличением величины угла расположения этот участок опасных напряжений смещается к т. 1. А наибольший прирост напряжений наблюдается при углах $(120-145)^\circ$, когда максимальные напряжения достигают почти 60 МПа. Переход угла через 120° является в определенной степени границей перехода в неблагоприятную зону по напряжениям (рис. 3.7). Это характерно как для эквивалентных напряжений в зоне т. 1, так и для суммарных напряжений $\Sigma\sigma_3$ и перепада максимальных напряжений $\Delta\sigma_{\max}$. Анализ данных по влиянию угла β расположения режущих

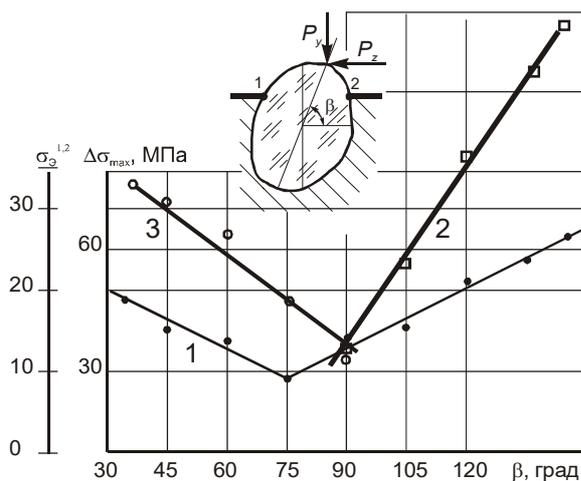


Рис. 3.7. Влияние угла расположения зерна на градиент напряжений $\Delta\sigma_{\max}$ (1), возникающих в связке на границе зерно-связка, и значения эквивалентных напряжений σ_3 в т. 1 (2) и т. 2 (3) [62]

зерен в диапазоне значений углов $(35-145)^\circ$ на показатель $\Delta\sigma_{\max}$ и эквивалентные напряжения в т. 1 и т. 2 (см. рис. 3.7 свидетельствует о том, что минимальные значения приведенных показателей обеспечивает угол в 75° , и тем самым, в идеале зерно должно иметь определенный угол наклона навстречу тангенциальному усилию. Выявлено также, что в диапазоне значений углов $(45-105)^\circ$, без учета оптимального угла в 75° , перепад напряжений является почти одинаковым (разница составляет $\sim 8\%$). Реальный наклон одной половины зерен под углом в 45° еще не так ощутимо ощущается на их

удержании, как наклон другой половины зерен (под углом 135°), которые попадают в крайне неблагоприятную зону (рис. 3.7), где напряжения превышают допустимые для известных составов связок. При шлифовании с производительностью, равной или большей критической (см. главу 4), от этих зерен тяжело ожидать реального участия в съеме материала [62].

В идеальном случае, для снижения напряженного состояния в системе «зерно–связка» и помощи в удержании зерен, важно стремиться в целом к снижению сил резания. Однако на конкретном инструменте при повышении производительности сделать это тяжело, поскольку последнее автоматически приведет к увеличению усилия резания. В свою очередь, снижение сил резания отразится на производительности обработки, поэтому важно выявить особенности напряженного состояния при изменении составляющих усилия резания и взаимодействия составляющих P_z и P_y (коэффициента абразивного резания fa). Следует указать, что такой подход [177] по установлению связи напряжений и коэффициента fa является нетрадиционным и позволяет найти возможность перехода от процессов на единичном зерне к совокупности зерен в круге путем учета коэффициента fa через допущение, что $fa = P_z'/P_y' = P_z/P_y$. В работе [177] рассмотрено НДС системы «зерно–связка» для двух случаев нагружения.

Случай 1. Принимали силу P_y' постоянной и равной 0,3 Н. Силу P_z' изменяли в диапазоне 0,01–0,10 Н. Расчетами выявлено, что при таких изменениях нагружения наиболее опасными являются напряжения τ_{xy} , поскольку в зоне A (рис. 3.6) они достигают наибольших значений в 20,5 МПа. При этом, с увеличением усилия P_z' , что соответственно повышает отношение P_z'/P_y' от 0,033 до 0,33 эти напряжения снижаются до 12,5 МПа, что почти в 2 раза меньше чем критическая величина этих напряжений.

В работе [177] обращается внимание на то, что для указанных выше материалов наиболее приемлемым критерием их прочности является критерий Писаренко-Лебедева, оперирующий эквивалентными напряжениями (σ_e). Значения этих напряжений в зоне вокруг зерна от т. 1 до т. 2 приведены на рис. 3.8. Видно, что максимальные эквивалентные напряжения, возникающие в зоне A , при соотношении $P_z'/P_y' = 0,033$ достигают 45 МПа, что в 1,5 раза превышает предел прочности при растяжении, и хотя при повышении соотношения P_z'/P_y' до 0,33 они снижаются, но тем не менее превышают критические. В целом, получается, что чем больше отношение P_z'/P_y' , тем меньшим является градиент напряжений вокруг зерна и меньше сами напряжения [177].

Случай 2. Принято [177] теперь постоянной нагрузке $P_z'=0,07$ Н, а P_y' изменяли от 0,05 до 0,50 Н. Выявлено, что этот случай является более опасным, чем первый. Так, при соотношении $P_z'/P_y'=1,4$ наиболее опасной является точка 2, где σ_x достигает значения 21,8 МПа, $\sigma_y=-6,7$ МПа, $\sigma_z=6,5$ МПа. При повышении P_y' и, соответственно, снижении соотношения, эти напряжения резко снижаются, становятся сжимающими, а опасные точки смещаются в зону А (см. рис. 3.6). Анализ эквивалентных напряжений показывает, что при изменении отношения от $P_z'/P_y'>1$ до $P_z'/P_y'<1$ изменяется и характер напряженного состояния (рис. 3.9). В случае $P_z'/P_y'=1,4$ наиболее опасной является зона т. 2, где напряжения достигают 33 МПа. При отношении $P_z'/P_y'<1$ она смещается в зону А. Так, при $P_z'/P_y'=0,233$ эквивалентные напряжения достигают 42 МПа, а при $P_z'/P_y'=0,14$ $\sigma_3=75$ МПа. Укажем, что в последнем случае появляется еще одна опасная зона – D (см. рис. 3.6), где эквивалентные напряжения достигают

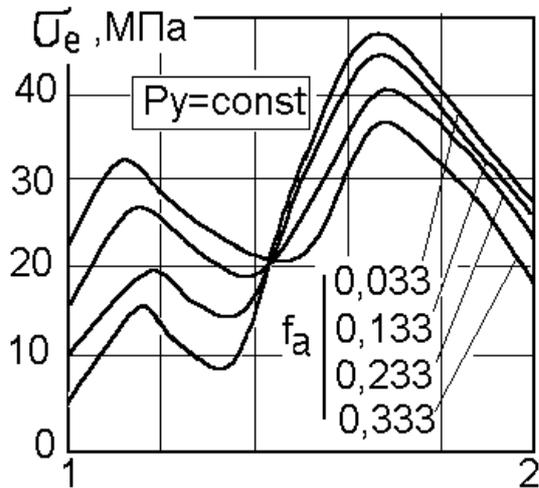


Рис. 3.8. Распределение эквивалентных напряжений в материале связки вокруг зерна, при постоянном нагружении P_y^1 и при разных соотношениях P_z^1/P_y^1 [177]

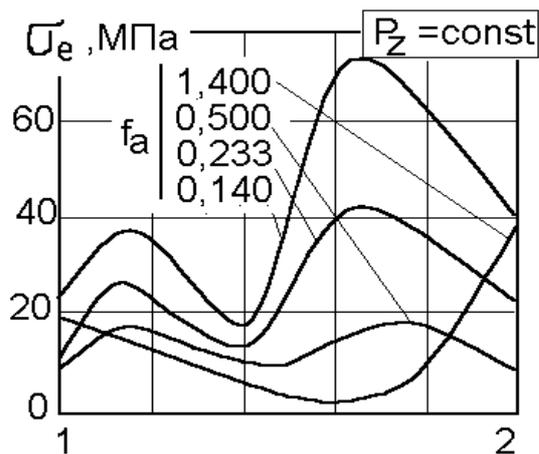


Рис. 3.9. Распределение эквивалентных напряжений в материале связки вокруг зерна при постоянном нагружении P_z^1 и при разных соотношениях P_z^1/P_y^1 [177]

составляющую P_z в 8 раз, при том же значении P_y (см. п. 1 и п. 8 табл. 3.5), напряженное состояние не только не ухудшится, но и улучшится.

33 МПа и превышают предел прочности в 1,2 раза. Таким образом, и в этом случае можно сделать вывод о том, что чем больше отношение P_z'/P_y' , тем градиент напряжений меньше и, соответственно, снижаются и сами напряжения. Для уточнения этого вывода был так построен расчет НДС, чтобы изменялись все три компонента: P_z' , P_y' и fa , причем fa последовательно возрастал от 0,05 до 0,40. Данные приведены в табл. 3.5, из которой возможно сделать несколько необычный вывод: необходимо снижать составляющую P_y или хотя бы удерживать ее от возрастания, а составляющую P_z наоборот необходимо повышать. Так, если увеличить

составляющую P_z в 8 раз, при том же значении P_y (см. п. 1 и п. 8 табл. 3.5), напряженное состояние не только не ухудшится, но и улучшится.

Таблица 3.5. Влияние величин составляющих силы резания на показатели напряженного состояния при угле наклона зерна в 45°

Показатели нагружения			Показатели напряженного состояния, МПа		
fa	P_z' , Н	P_y' , Н	σ_{\max}	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_m$
0,05	0,010	0,20	29,47	31,34	18,73
0,10	0,050	0,50	72,03	74,95	45,47
0,15	0,030	0,20	27,32	28,96	16,98
0,20	0,100	0,20	66,03	68,39	40,45
0,25	0,075	0,30	34,14	40,00	23,19
0,30	0,090	0,30	36,72	38,39	22,07
0,35	0,070	0,20	23,53	24,66	13,98
0,40	0,080	0,20	22,59	23,58	13,24

где σ_{\max} – максимальные напряжения, $\Delta\sigma_{\max}$ – перепад максимальных напряжений вдоль зоны контакта, $\Delta\sigma_m$ – перепад в разнице максимальных напряжений вдоль зоны контакта.

Приведенное выше дало возможность [117] сформулировать следующее положение: для улучшения напряженного состояния системы «зерно-связка» и, соответственно, снижения износа круга необходимо стремиться в процессе шлифования к повышению величины fa . При этом, желательно снижать составляющую P_y , или сдерживать ее от возрастания, а вот составляющую P_z необходимо повышать.

3.2. Формирование структуры информационных показателей шлифовальных кругов

В нынешнее время сложилась структура информационно-коммерческих показателей шлифовальных кругов из СТМ, которая содержит сведения о геометрических параметрах круга и основные характеристики режущего слоя (марка, зернистость, покрытие СТМ и его концентрация в связке, марка связки). Вместе с тем, в ряде случаев, например, для специальных конструкций кругов, проявляется неполнота этой традиционной информации. В частности, отсутствуют механические и физические показатели инструмента, как изделия в целом, которые позволяли бы в той или иной степени делать вывод о его потенциальных эксплуатационных свойствах, решать задачи равноценной замены материала корпуса, оптимизационные задачи по конструктивным изменениям круга с целью минимизации его веса или поиска оптимальной формы. К таким элементам, которые отсутствуют в информационной оболочке шлифовальных кругов, следует отнести, наряду с другими, показатели жесткости круга, его твердости и электропроводности и другие, изложенные ниже в данной подглаве.

Жесткость круга является важным показателем, который во многом определяет работоспособность шлифовального инструмента. Для установления того, какой именно должна быть жесткость круга, необходимо учи-

тывать то, что шлифовальный круг находится в общей технологической станочной системе и, в первую очередь, важно разобраться с ситуацией в жесткости именно этой системы. Это позволит сопоставить жесткость круга с жесткостью составляющих этой станочной системы.

Известно [180], что жесткость упругой системы шлифовального станка 3Г71 при неподвижном и вращающемся шпинделе соответственно равна 13,15 МН/м и 10,8 МН/м. Снижение жесткости упругой системы при вращающемся шпинделе объясняется снижением сил трения в подвижных соединениях. Нужно отметить, что чем больше жесткость, тем более точной будет обработанная деталь. Кроме того, по мере повышения жесткости технологической системы повышаются производительность и точность обработки без ощутимого увеличения износа алмазов [181]. Так, для станков моделей 312М, 3184, 3Е12 с повышением жесткости шлифовальной бабки от 2 до 9 МН/м возрастает производительность обработки. Дальнейшее увеличение жесткости не вызывает роста производительности шлифования. Возрастание жесткости шлифовальной бабки снижает износ круга. Например, при шлифовании на станке 3Е12 с жесткостью бабки в 2,7–3,2 МН/м размерный износ круга 1А1 300×40×5×76 после снятия 1 см³ твердого сплава составляет 20–25 мкм, а с жесткостью 8,8–9,7 МН/м при идентичных условиях – 5,7–9,8 мкм. Это подтверждается и в работе [182], где показано, что с увеличением жесткости заднего центра станка износ круга (относительный расход алмазов) снижается (табл. 3.6).

Таблица 3.6. Эксплуатационные характеристики алмазных кругов при разных жесткостях заднего центра шлифовального станка [182]

Жесткость заднего центра, МН/м	Частота колебаний, Гц	Высота волнового формоизменения на круге, мкм	Относительный расход алмазов, мг/г
9,8	750	10	9,8
6,1	540	38	15,5
3,7	420	64	19,7

В целом, суммарная жесткость упругой системы станка, по выводам авторов работы [181], для обработки инструмента из твердого сплава должна быть не менее как 5,0–7,5 МН/м, а при обработке твердого сплава вместе со сталью – 9,0–10,0 МН/м.

При повышении жесткости технологической системы заточного станка с 3,24 до 5,88 МН/м увеличивается производительность заточки на 20 %, снижается период врезания и выхаживания при снятии заданного припуска. Изменение жесткости технологической системы почти не влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности. Возрастание суммарной амплитуды относительных колебаний шлифовальной головки и приспособ-

соблений на частотах 54 и 108 Гц при снижении жесткости от 5,39 до 1,67 МН/м повышает удельный расход алмазов более чем в 3,5 раза [115]. Следовательно, делают вывод авторы [183], жесткость технологической системы станка должна быть не менее 4,41–4,90 МН/м. А между тем, из приведенного выше, по нашему мнению, можно сделать несколько выводов: во-первых, жесткость шлифовальных и заточных станков колеблется в пределах от 2 до 13 МН/м, и во-вторых, чем большей будет жесткость в этих пределах, тем меньше износ кругов, больше производительность и точность обработки.

Из анализа табл. 3.6 следует, что ухудшение жесткости оборудования повышает износ алмазных кругов. Вместе с тем, важно было бы получить такие данные для одного станка, но при обработке алмазным инструментом с разной жесткостью корпуса и выявить – какой именно должна быть предельная жесткость кругов в реальных величинах. Для этого были проведены исследования [184] по выявлению зависимости относительного расхода алмазов и шероховатости обрабатываемой поверхности от изменения величины осевой жесткости круга. Исследования проводились на круге формы 12А2-45° 150×40×10×3×32 – АС6 80/63–В1-13–100. Материал корпуса – алюминиевый сплав АК6. Обработывался твердый сплав Т15К6 (режимы резания: продольная подача – 2 м/мин, поперечная подача – 0,05 мм/дв.х., скорость вращения круга – 15 м/с, производительность обработки без охлаждения – 600 мм³/мин). Жесткость круга определялась экспериментально по схеме с сосредоточенной нагрузкой. Для контроля величины нагружения использовался пружинный динамометр ДОСМ 3-02 ГОСТ 9500-84 с диапазоном измерения от 0 до 200 кГ. Изменение жесткости круга происходило за счет изменения конструктивных параметров его корпуса. Были рассмотрены 4 варианта: 1 – стандартный корпус, 2 – изменение по корпусу внешнего диаметра со 150 до 140 мм, 3 – дополнительно к варианту 2 протачивание конической части корпуса на глубину 5 мм (толщина стенки изменилась с 10 до 5 мм), 4 – дополнительно к варианту 3 протачивание опорной поверхности круга в месте крепления на глубину 7 мм с изменением диаметра со 100 до 50 мм. Результаты исследований приведены в табл. 3.7.

Исследования [184] показали, что при жесткостях круга, значительно превышающих жесткость оборудования, уменьшение ее на первом почти в 3 раза фактически не повлияло на эксплуатационные показатели круга. А вот когда величина жесткости круга попала в диапазон жесткостей самого оборудования, то такое снижение сразу оказало влияние и ухудшило эксплуатационные показатели. Побочно укажем, что изменение жесткости круга почти в 20 раз фактически не отразилось на показателях шероховатости обработанной поверхности, что подтверждает данные работы [115].

Таблица 3.7. Влияние жесткости шлифовального круга формы 12А2-45° на его эксплуатационные показатели [184]

Вариант корпуса	Жесткость круга, МН/м	Относительный расход алмазов, мг/г	Высота волнового формоизменения на круге, мкм	Шероховатость обработанной поверхности, R_a , мкм
Стандартный	105,2	9,97	22	0,07
Измененный – 1	102,6	10,3	24	0,08
Измененный – 2	33,5	10,8	30	0,08
Измененный – 3	5,7	25,4	6	0,09

Интересно, что высота волнового формоизменения на круге, которая характеризует режущие свойства шлифовального инструмента [62], остается более-менее стабильной в области повышенных жесткостей, однако значительно снижается при пониженной жесткости. Это обозначает повышенную скорость перемещения гребня волны вдоль окружного направления, что увеличивает износ круга и удерживает шероховатость обрабатываемой поверхности от возрастания. Таким образом, во-первых, шлифовальные круги в их стандартном исполнении имеют достаточно высокий уровень жесткости. Снижение ее почти в три раза фактически не изменило эксплуатационные показатели кругов при шлифовании. Во-вторых, предельной нижней границей жесткости как кругов, так и универсального станочного оборудования для процессов шлифования с учетом изложенных выше исследований и данных работ [181] и [182] следует считать величину в 10 МН/м, поэтому утверждения авторов работы [185] о том, что жесткость технологической системы при затачивании должна быть в пределах 4,5–5,0 МН/м является в определенной степени неоправданными, а эти ее значения заниженными.

В работах [186–188], были определены конкретные значения величин осевой жесткости разных типоразмеров шлифовальных кругов из СТМ. Так, в работе [186] показано, что в зависимости от геометрических размеров величины жесткости могут изменяться от 6,1 МН/м до 22,4 МН/м. Из этого следует, что жесткость круга может быть меньшей или превышать указанную предельную величину жесткости оборудования. Возникает вопрос, как можно повлиять на жесткость шлифовальных кругов и ее регулировать. В работах [186–188] показано, что в зависимости от формы круга на его жесткость можно оказать влияние как изменением материала корпуса, так и определенных геометрических размеров. Например, применительно к стандартизированным кругам формы 1А1 показано, что с увеличением толщины круга, модуля упругости материала корпуса и снижением внешнего диаметра (D) круга его жесткость будет возрастать. Изменение формы с прямого профиля (1А1) на более сложную (12А2-45°) изменяет и направления воздействия на жесткость. При выводе формулы для расчета осевой

жесткости кругов формы 12А2 исходили [187] из общепринятого определения жесткости J , как отношения нагрузки P , вызывающей перемещение ϖ , к величине этого перемещения в точке ее приложения в направлении действия нагружения. У случае расчетной схемы с распределенной нагрузкой постоянной интенсивности q за P принималось вся нагрузка, приходящаяся на торцевую поверхность круга, или $P = \pi b(D-b)q$, а в качестве перемещения ϖ – прогиб в ее средней точке. С учетом изложенного получена [187] формула для расчета осевой жесткости кругов формы 12А2 в виде:

$$J = \pi b(D - b)q/\varpi. \quad (3.1)$$

Результаты обсчета по данной формуле осевой жесткости стандартизованных кругов формы 12А2-45° показали, что диапазон их жесткостей находится в диапазоне от 140 до 900 МН/м. Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что наиболее существенно на осевую жесткость круга влияют такие его конструктивные параметры, как ширина рабочего слоя круга (b) и посадочный диаметр (d). Так, повышение b приблизительно в 1,7 раза с 6 до 10 мм повышает осевую жесткость приблизительно в 1,2 раза. Более существенно J зависит от диаметра посадочного отверстия. Увеличение d приблизительно в 2,4 раза с 32 до 76 мм при сохранении постоянными других параметров приводит к повышению жесткости в 3,6 раза, что собственно вызвано снижением момента действия усилия относительно места закрепления круга на шпинделе станка. Осевая жесткость кругов из СТМ формы 12А2-20° стандартных типоразмеров, как показали исследования [188], изменяется в диапазоне от 35 до 93 МН/м. При этом, показано, что средние экспериментальные значения показателя осевой жесткости круга внешним диаметром в 125 мм были равными – 37,8 МН/м для алюминиевого корпуса и 129,2 МН/м – для стального. Тем самым, перевод корпуса из алюминиевого на стальной более чем в три раза повышает жесткость круга. Кроме того, выявлено, что наибольшее влияние на осевую жесткость J круга формы 12А2-20° оказывают такие его конструктивные параметры как d , D , b , а также параметр $h = H - H_1 - s$ (толщина основы корпуса). Характер этого влияния является таким, что увеличение b и d приводит к повышению осевой жесткости, а для D и h наблюдается обратная картина. Так, увеличение ширины b в 2 раза с 3 до 6 мм приводит к повышению жесткости приблизительно в 1,4 раза. Более сильная зависимость J наблюдается от толщины основы корпуса и от диаметра d . Так, возрастание d в 2 раза при сохранении постоянными значений остальных параметров приводит к повышению жесткости в 1,8–3,7 раза в зависимости от соотношения параметров b и D для стандартных типоразмеров кругов. Аналогичное уменьшение h приводит к снижению J в 2,2 раза. Увеличение D в 1,5 раза с 50 до 75 мм при неизменных b и d и пропорциональном уве-

личении других параметров приводит к снижению жесткости приблизительно в 1,7 раза. Таким образом, из приведенного выше следует, что шлифовальные круги из СТМ в их стандартном исполнении имеют высокий уровень жесткости. Снижение ее почти в три раза фактически не изменяет эксплуатационные показатели кругов при шлифовании. В целом, предельной минимальной границей жесткости, как шлифовальных кругов, так и универсального шлифовального станочного оборудования для процессов шлифования следует считать величину в 10 МН/м [184].

В зависимости от формы кругов и их типоразмеров расчетное определение осевой жесткости выполняется по схеме с сосредоточенной нагрузкой или с распределенной. В математическое обеспечение входили уравнения осесимметричной задачи теории упругости и уравнения теории изгиба пластин с учетом усилий в срединной плоскости [186].

Осевая жесткость шлифовальных кругов формы 1А1. В данном случае в качестве механической модели инструмента принята составная кольцевая пластина кусочно-постоянной толщины. В соответствии с этим, на соотношение между толщиной корпуса h и его внешним радиусом R накладывается известное из теории тонких пластин ограничение $R > 5h$. Допускается, что в пределах каждого участка постоянной толщины пластина является однородной, а ее материал – изотропным. Внутренний контур пластины принимается жестко заземленным, а его радиус отождествляется с радиусом зажимных фланцев. Поскольку расчет осевой жесткости, проведенный по схеме с сосредоточенной нагрузкой, то силовые граничные условия сводятся в данном случае к задаче такого нагружения на внешнем контуре пластины. Допускается, что прогиб нагруженного таким образом круга намного меньше, чем его толщина, поэтому в качестве исходных использованы линеаризованные уравнения нелинейного изгиба круглых пластин с учетом напряженно-деформированного состояния в срединной плоскости. Последнее обусловлено действием в этой плоскости внешних факторов (инерционных сил, усилий резания, температурных полей). Однако, поскольку все эти факторы тут не учитываются, то усилия и перемещения, вызванные их действием, из указанной системы исключены и они тождественно равны нулю. Переходя к решению задачи изгиба принято [186], что вследствие условий нагружения она будет двумерной. Поэтому предварительно сведено ее к одномерной, за счет представления решения с учетом симметрии, что имеет место в данном случае, в виде неполных рядов Фурье:

$$V_r = \sum V_{rn}(r) \cos(n\theta), \quad M_r = \sum M_{rn}(r) \cos(n\theta),$$

$$\theta_r = \sum \theta_{rn}(r) \cos(n\theta), \quad \omega = \sum \omega_n(r) \cos(n\theta),$$

где V_r , M_r , θ_r , ω – соответственно обобщенное усилие, радиальный момент, наклон изогнутой поверхности, прогиб; (r, θ) – полярные координаты точки; $V_{rn}(r)$, $M_{rn}(r)$, $\theta_{rn}(r)$, $\omega_n(r)$ – коэффициенты Фурье, являющиеся функциями только радиальной координаты. При этом, сосредоточенную силу P представлено в виде аналогичного ряда, переводя ее в разряд граничных условий. Неизвестные коэффициенты, входящие в приведенное выше допущение, определяются из системы обычных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Применительно к кругам формы 1А1 эта система должна быть проинтегрирована при следующих граничных условиях [62]:

$$\theta_{rn} = \omega_n = 0, \quad \text{при } r = D_3/2;$$

$$M_{rn} = 0; \quad V_{rn} = P/(\pi D_1) + [2P/(\pi D_1)] \sum \cos(n\theta) \quad \text{при } r = D_1/2.$$

Путем перехода к безразмерным величинам получена формула для определения осевой жесткости кругов прямого профиля из СТМ в виде:

$$J = k_1 E h^3 / a^2, \quad (3.2)$$

где $k_1 = f(D_1/D_3, D_2/D_3, E_1/E_2, H_1/H_2, \nu_1, \nu_2)$ – коэффициент, представляющий собой безразмерный прогиб под безразмерным единичным нагружением; E_1 , E_2 и ν_1 , ν_2 – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона участков круга с постоянной толщиной; E , h – модуль Юнга и толщина участков корпуса круга с минимальной толщиной; a – радиус зажимных фланцев. Для принятой расчетной схемы $E_1 = E_2$, $h = H_2$, $a = D_3/2$. С целью удобства дальнейшего изложения введены следующие обозначения: $\varepsilon_1 = E_1/E_2$, $\beta_1 = H_1/H_2$, $\alpha_1 = D_1/D_3$, $\alpha_2 = D_2/D_3$.

Для корпуса, состоящего из двух участков, и изготовленного из однородного материала, что имеет место в нашем случае, $E_1 = E_2$ и $\varepsilon_1 = 1$. Это

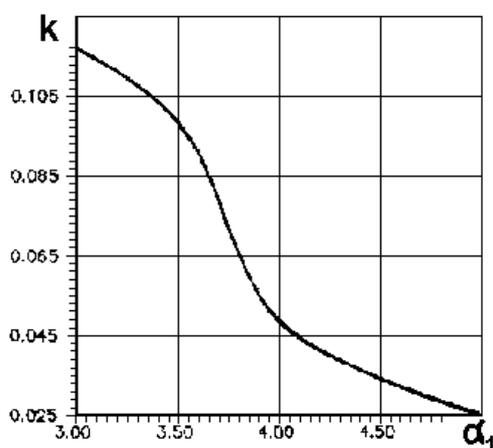


Рис. 3.10. График зависимости коэффициента k_1 от α_1 при $\alpha_2 = 1,21$, $\beta = 1,45$, $\varepsilon_1 = 1,00$ [186]

уменьшает количество параметров, необходимых для обсчета k_1 , благодаря чему повышается информативность формулы (3.2). Значения коэффициента k_1 определяли путем последовательного (при $n = 0, 1, 2, \dots$) решения двухточечной краевой задачи для указанной выше системы дифференциальных уравнений и принятых ограничений (рис. 3.10).

Последнее проводится численно с использованием метода дискретной ортогонализации. Для получения конкретных значений коэффициента k_1 разработана программа на языке ФОРТРАН 77. Ре-

зультаты расчетов для наиболее используемых вариантов конструктивного исполнения корпуса инструмента согласно ГОСТ 16167-80 приведены в табл. 3.8. В качестве базового материала корпуса при этом принят – алюминий ($\nu_1=\nu_2=0,32$). Формула (3.2) является достаточно удобной для практического использования, поскольку содержит в правой части три независимых параметра корпуса круга: два геометрических (толщину самого тонкого его участка и радиус зажимных фланцев) и один механический (модуль Юнга материала данного участка).

Это позволяет проводить количественный анализ влияния этих параметров на осевую жесткость корпуса, а, при известных значениях показателей механических свойств режущего слоя, и круга в целом. С другой стороны, при сохранении неизменными значений α_1 , α_2 , β_1 , ε_1 , ν_1 , ν_2 возможно решение разных оптимизационных задач, когда важным является определение значений одного из параметров: E , J , a , h при фиксированных значениях других. Для расширения информативности формулы (1) на рис. 3.10 и приведен график зависимости коэффициента k_1 от α_1 при $\alpha_2 = 1,21$, $\beta_1 = 1,45$, $\nu = 0,3$, что характерно, например, для варианта № 1 (см. табл. 3.8).

Таблица 3.8. Осевая жесткость корпусов шлифовальных кругов формы 1А1 некоторых типоразмеров, согласно ГОСТ 16167-80 [186]

D_3 , мм	D_2 , мм	D_1 , мм	H_2 , мм	H_1 , мм	J , МН/м
50,0	160,0	194,0	4,0	5,8	0,382
160,0	220,0	240,0	6,0	9,8	6,125
160,0	260,0	290,0	10,0	15,8	9,526
250,0	340,0	390,0	15,0	24,8	34,084
315,0	440,0	490,0	16,0	31,8	30,174
380,0	520,0	580,0	30,0	49,7	129,389
410,0	650,0	730,0	40,0	69,6	112,200
380,0	545,0	580,0	14,0	29,8	7,673
300,0	455,0	500,0	15,0	24,8	15,092
460,0	460,0	500,0	60,0	24,8	22413

Расчетные эксперименты показали, что на зависимость $k_1 = f(\alpha_1)$ наиболее существенно влияют параметры α_2 , β_2 , ε_1 , в отличие от влияния коэффициента Пуассона. Так, например, изменение ν от 0,3 на величину +0,05 или -0,05 приводит к изменению k_1 всего только на 2 %, причем «+» соответствует большим (в сравнении с 0,3) значениям ν . Отметим, что диапазон $0,25 \leq \nu \leq 0,35$ охватывает достаточно большой ряд материалов, таких, как: сталь ($\nu = 0,27$), бакелит (0,28), алюмобакелит (0,3), алюминий (0,32), латунь (0,35), абразив (0,25), которые часто используются при изготовлении корпусов шлифовальных кругов. Поскольку отношение D_2/D_3

не входит в круг аргументов функции k_1 , то при расчетах задавались соотношением $\alpha_2 = 0,826 \cdot \alpha_1$, которое получается из условия $D_2/D_3 = 1,21$.

В работе [62] рассмотрены некоторые примеры практического использования формулы (3.2). Во-первых, это качественный анализ осевой жесткости корпуса или круга в целом. Необходимость этого вызвана следующим. Поскольку круг находится в общей технологической системе (ТС), но является изменяющимся элементом, то его жесткость может быть в зависимости от технологических задач выше или ниже жесткости ТС. Минимальное значение последней оценивается в 0,68 МН/м, а максимальное – в 7,0 МН/м. Из табл. 3.8 следует, что жесткость круга может превышать указанную максимальную жесткость ТС. Это дает возможность сделать вывод о том, что инструмент, в этом случае, имеет избыточную жесткость. Для поиска путей регулирования жесткости в работе [186] применительно к стандартизованным кругам, несколько изменена формула (3.2) в следующий вид:

$$J = k_1 \alpha_1^2 E H_2^3 / D_1^2 \quad (3.3)$$

или в случае анализа жесткости круга с наличием рабочего слоя:

$$J = k \alpha^2 E H_2^3 / D^2, \quad (3.4)$$

где $\alpha = D/D_3$, а коэффициент k имеет тот же смысл, что и k_1 , однако количество его определяющих параметров увеличивается за счет учета линейных параметров режущего слоя и показателей его механических свойств. Из формул (3.3) и (3.4) непосредственно вытекает, что с ростом толщины, модуля упругости материала корпуса и уменьшением внешнего диаметра круга его жесткость будет возрастать и наоборот. Например, при переходе от материала корпуса (алюминия, вариант 1 в табл. 3.8) на более или менее прочный материал (соответственно, сталь и бакелит) с сохранением начальной его жесткости $J_0 = 382$ Н/мм, то тут необходимо учитывать модуль E и один из параметров: α или h [62].

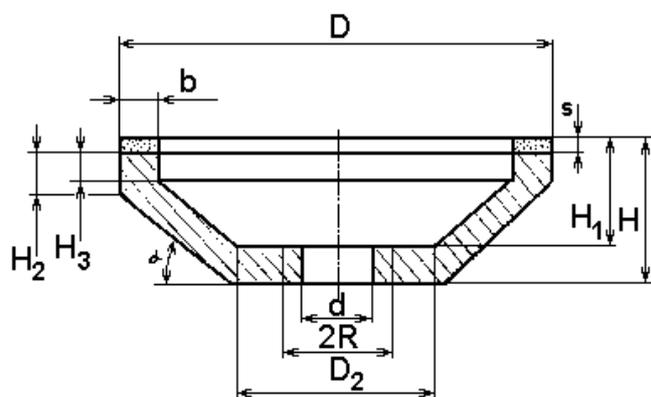


Рис. 3.11. Механическая модель круга формы 12А2-45°

Осевая жесткость кругов формы 12А2-45° из СТМ. В качестве механической модели данного типа инструмента принимали [187] тело вращения с прямолинейными образующими (рис. 3.11). Исходя из условий закрепления круга на шпинделе, по участкам верхней и нижней поверхностей основы круга, ограниченных кругом радиусом $R = 1,5d$, принято жесткое за-

щемление. Такое условие эквивалентно отсутствию тут радиальных (u_r) и осевых (u_z) перемещений. Другие поверхности круга, за исключением торцевой, предусматриваются свободными. На торцевой задавали определенные силовые ограничения. Отметим [187], что использование расчетной схемы с сосредоточенной нагрузкой к принятой тут механической модели связано с решением трехмерных задач теории упругости, что приводит к определенным трудностям. Применительно к рассматриваемой задаче это отягощается еще и большим объемом последующих расчетов, связанных с разнообразием типоразмеров кругов. По этой причине использована расчетная схема с распределенной осевой нагрузкой, задающейся на торце круга и имеющей постоянную интенсивность q (рис. 3.12). Расчет осевой жесткости кругов формы 12A2-45° в таком виде предусматривает решение осесимметричной задачи теории упругости изотропного тела для области S (см. рис. 3.12) при следующих ограничениях [187]:

$$\begin{aligned} \sigma_z = q, \tau_{rz} = 0 & \quad \text{при} \quad z = H, \quad D/2 - b \leq \rho \leq D/2, \\ u_r = 0, u_z = 0 & \quad \text{при} \quad z = 0, \quad d/2 \leq \rho \leq R, \\ & \quad z = H - H_1, \quad d/2 \leq \rho \leq R; \end{aligned}$$

другие части границы области свободны от внешнего нагружения.

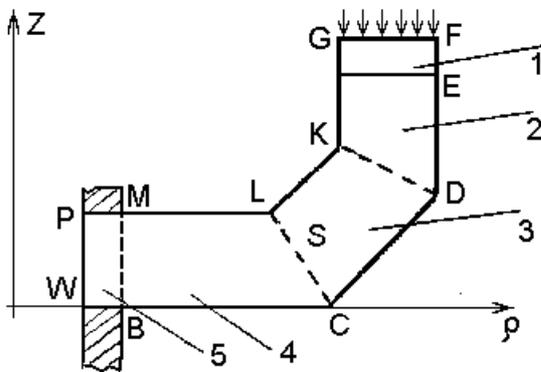


Рис. 3.12. Расчетная схема вычисления осевой жесткости круга формы 12A2-45° [187]

Для решения сформулированной задачи применяли метод конечных элементов с линейной аппроксимацией перемещений на треугольных элементах на основе комплекса программ на языке ФОРТРАН. По функциональному назначению он складывается из двух, связанных программ: программы автоматической генерации сеток конечных элементов двухмерных областей и программы решения методом конечных элементов плоских и осесимметричных задач теории прочности. Дискретная модель области S конструировалась в составе пяти четырехугольных подобластей (рис. 3.12), что обуславливает точное описание геометрии области, возможность учета неоднородности материала круга и учета указанных выше ограничений в перемещениях и напряжениях. Область расчетов делилась на 552 или 780 треугольных элементов (в зависимости от типоразмера круга), что приводило к решению системы линейных алгебраических уравнений 658-го и 880-го порядка соответственно. Точность решения задачи контролировалась точностью выполнения условий ограничений в напряжениях. Указанное выше количество элементов обеспечивало погрешность вычислений, которая не превышала несколько процентов [187]. При выводе формулы

для вычисления осевой жесткости кругов формы 12A2-45° исходили из общепринятого определения J , как отношение нагрузки P , вызывающей перемещение ϖ , к величине этого перемещения в точке ее приложения [187], см. формулу (3.1)

Величина ϖ находится путем решения осесимметричной задачи теории упругости, для области, указанной на рис. 3.12 с упомянутыми условиями ограничения. Результаты вычисления осевой жесткости по формуле (3.1) для наиболее используемых вариантов конструктивного выполнения корпуса инструмента согласно ГОСТ 16181-82, приведены в табл. 3.9. Их анализ позволяет сделать вывод, что наиболее ощутимо на осевую жесткость круга влияют такие его конструктивные параметры, как b и d . Так, увеличение b приблизительно в 1,7 раза с 6 (вариант 4) до 10 мм (вариант 5) повышает осевую жесткость примерно в 1,2 раза. Сильнее J зависит от диаметра посадочного отверстия. Увеличение d приблизительно в 2,4 раза с 32 (вариант 6) до 76 мм (вариант 7) при сохранении постоянными других параметров приводит к повышению жесткости в 3,6 раза.

Таблица 3.9. Результат вычисления осевой жесткости шлифовальных кругов формы 12A2-45° некоторых типоразмеров [187]

Вариант изготовления корпуса	D , мм	b , мм	H , мм	d , мм	H_1 , мм	H_2 , мм	J , МН/м	j , Н/мм ³
1	75	3	21	16	12	4	140,49	207,0
2	100	3	32	20	22	11	221,36	259,0
3	150	10	40	32	28	11	321,04	73,0
4	175	6	26	51	14	4	183,61	57,7
5	175	10	26	51	14	4	223,53	43,1
6	200	10	50	32	36	11	231,00	39,0
7	200	10	50	76	36	11	836,00	143,0
8	200	10	52	76	38	11	900,31	153,5

Осевая жесткость кругов из СТМ формы 12A2-20°. На основе изложенных выше подходов были рассчитаны жесткости наиболее уязвимых с этой точки зрения кругов, а именно кругов формы 12A2-20° [188]. Механическая модель, схема нагружения и программное обеспечение являются аналогичными форме 12A2-45°. Вычисление осевой жесткости кругов формы 12A2-20° в такой постановке предусматривает решение осесимметричной задачи теории упругости изотропного тела для области S , что является объединением подобластей 1–5 (рис. 3.13) при следующих условиях ограничения:

$$\sigma_z = q, \tau_{pz} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{при } z = H, \quad D/2 - b \leq \rho \leq D/2 \\ z = 0, \quad D/2 - b \leq \rho \leq R \\ z = H - H_1 - s, \quad D/2 \leq \rho \leq R \end{array} \right.$$

где σ_z , τ_{pz} – соответственно нормальные и касательные напряжения. Другие части границы области свободны от внешнего нагружения.

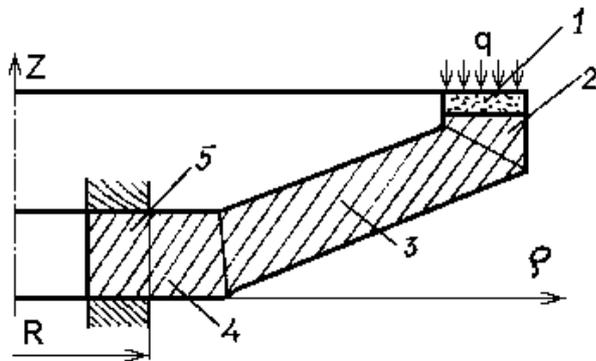


Рис. 3.13. Расчетная схема вычисления осевой жесткости шлифовального круга 12A2-20° [188]

Схема закрепления и нагружения корпуса круга в процессе проведения испытаний приведена на рис. 3.14. Реализация расчетной схемы с равномерно распределенной нагрузкой при экспериментальном определении осевой жесткости круга осуществляли с помощью прессы, на нижнюю плиту 1, которого последовательно устанавливали толстостенную цилиндрическую втулку 2,

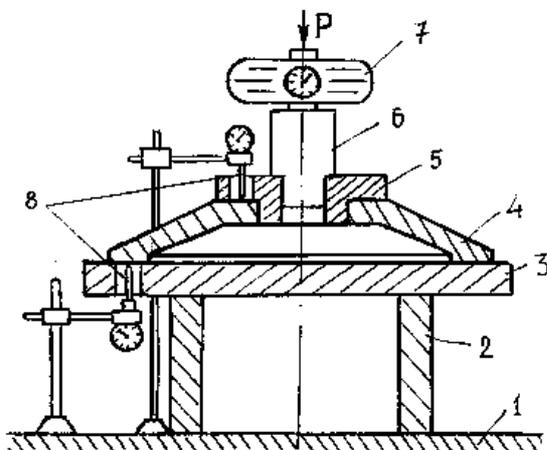


Рис. 3.14. Схема для измерения прогибов корпуса шлифовального круга формы 12A2-20° при экспериментальном определении его осевой жесткости по схеме с распределенным нагружением [188]

массивную дисковую плиту 3 и корпус исследуемого круга (рис. 3.14). Ступенчатое нагружение проводилось опусканием верхней плиты прессы с передачей усилия через пружинный динамометр 7 (тип ДОСМ 3-02 ГОСТ 9500-84, с диапазоном измерений 0–200 кГ), стержень 6 и пластину 5. В диске 3 и в пластине 5 имелись цилиндрические отверстия в которые устанавливались наконечники многооборотных индикаторов 8. В процессе исследований измеряли осевое перемещение (прогиб) торца круга (ϖ_H) и его основания (ϖ_B), что позволяло исключить влияние соединения системы «втулка–круг–стержень» на действительную величину прогиба. Результаты исследований и рассчитанные по ним значения показателя осевой жесткости приведены в табл. 3.10.

Средние (экспериментальные) значения осевой жесткости по результатам всех испытаний равны 3854 кГ/мм для алюминиевого корпуса и 13169 кГ/мм – для стального. Теоретические значения данного показателя,

Для оценки точности вычисления осевой жесткости с помощью описанного выше комплекса программ проводилось экспериментальное ее определение для алюминиевого (сплав АК6 ГОСТ 4784-74) и стального (сталь 45 ГОСТ 1050-88) корпусов с такими геометрическими параметрами (рис. 3.13): $D = 125$ мм, $D_2 = D_3 = 54$ мм, $d = 32$ мм, $H = 14$ мм, $s = 0$, $H_1 = 6$ мм, $H_3 = 0,5$ мм, $b = 8$ мм. Схема закрепления и нагружения корпуса круга в процессе проведения

обсчитанные согласно разработанного комплекса программ, составили соответственно 4152 и 11852 кГ/мм. Таким образом, разница между теоретическими и экспериментальными значениями показателя осевой жесткости находится в пределах 8...10 %, что вполне приемлемо для практических целей и подтверждает достоверность результатов расчетов.

Таблица 3.10. Результаты экспериментальных измерений прогибов торца корпуса круга формы 12A2-20° 125×6×32 и обсчитанные по ним значения показателя его осевой жесткости [188]

P, кГ	Материал корпуса							
	Алюминий				Сталь			
	ϖ_B , мкм	ϖ_H , мкм	$\varpi = \varpi_B - \varpi_H$	$J = P/\varpi$, кГ/мм	ϖ_B , мкм	ϖ_H , мкм	$\varpi = \varpi_B - \varpi_H$	$J = P/\varpi$, кГ/мм
40	21	10	11	3636	11	8	3	13333
60	35	19	16	3750	15	10	5	12000
80	43	22	21	3809	18	12	6	13333
100	48	24	24	4167	21	14	7	14286
120	57	26	31	3871	25	16	9	13333
140	64	28	36	3889	29	18	11	12727

Результаты обсчетов осевой жесткости по приведенной выше формуле (3.1), которая приемлема и для кругов формы 12A2-20°, для ряда вариантов конструкций таких, наиболее используемых кругов согласно ГОСТ 16175-90Э (п. 1–14), а также других, не предусмотренных в нем, но таких, которые представляют интерес с точки зрения анализа (п. 15–20), приведены в табл. 3.11. В качестве материала корпуса принимался алюминий ($E = 700 \text{ кГ/мм}^2$, $\nu = 0,32$).

Анализ приведенных в табл. 3.11 результатов показывает, что наиболее весомое влияние на осевую жесткость J круга оказывают такие его конструктивные параметры как d , D , b , а также параметр $h = H - H_1 - s$ (толщина основания корпусу). Характер этого влияния является таким, что возрастание b и d приводит к повышению осевой жесткости, а для D и h наблюдается обратная картина. Эти выводы подтверждаются следующим. Так, увеличение b в 2 раза с 3 мм (вариант 3) до 6 мм (вариант 4) приводит к повышению жесткости примерно в 1,4 раза. Более сильная зависимость J наблюдается от толщины основы корпуса и от диаметра посадочного отверстия d . Так, возрастание d в 2 раза при сохранении постоянными значений остальных параметров приводит до повышению жесткости в 1,8...3,7 раза в зависимости от соотношения параметров b и D для исследованных типоразмеров кругов. Аналогичное уменьшение h (варианты 5 и 20) приводит к снижению J в 2,2 раза. Уменьшение D в 1,5 раза с 50 (вариант 1) до 75 мм (вариант 18) при неизменных b и d и пропорциональном увеличении других параметров приводит к снижению жесткости приблизительно в 1,7 раза.

Таблица 3.11. Результаты расчетов осевой жесткости шлифовальных кругов формы 12А2-20° [188]

№	D , мм	D_2 , мм	D_3 , мм	H , мм	H_1 , мм	H_3 , мм	b , мм	d , мм	J , кГ/мм	j , кГ/мм ³	F , кГ·мм/мм ³
Стандартные круги											
1.	50	25	22	8	2	0,5	3	10	6328	14,3	715
2.	50	25	22	8	2	0,5	3	16	7383	17,5	875
3.	75	33	37	10	3	0,5	3	16	5180	7,6	570
4.	75	33	37	10	3	0,5	6	16	7186	5,5	412
5.	100	50	51	12	4	0,5	3	20	4137	4,5	450
6.	100	50	51	12	4	0,5	6	20	5625	3,2	320
7.	125	54	54	16	6	0,5	3	32	4545	4,0	500
8.	125	54	54	16	6	0,5	10	32	8899	2,5	312
9.	150	68	68	18	7	0,5	3	32	3923	2,8	420
10.	150	68	68	18	7	0,5	6	32	5483	2,0	300
11.	150	68	68	18	7	0,5	10	32	7117	1,6	240
12.	175	85	85	20	8	0,5	10	32	6384	1,2	210
13.	200	96	96	22	9	1,0	10	51	7351	1,2	240
14.	250	135	135	25	10	1,0	6	51	5807	1,3	325
15.	250	135	135	25	10	1,0	10	51	9285	1,2	300
Нестандартные круги											
16.	150	68	68	18	7	0,5	10	20	5374	1,2	180
17.	150	68	68	18	7	0,5	10	16	4928	1,1	165
18.	75	33	37	10	3	0,5	3	10	3815	5,6	420
19.	100	50	51	12	4	0,5	3	10	1108	1,2	120
20.	100	50	67	9	4	0,5	3	20	1873	2,2	220
21.	150	68	101	12	7	0,5	3	32	1820	1,3	195
22.	175	85	85	20	8	0,5	10	51	9605	1,9	332,5

В целом, анализ показал, что осевая жесткость стандартизированных кругов формы 12А2-20° разных типоразмеров изменяется значительно и находится в диапазоне от 3923 до 9285 кГ/мм. То же самое, мы наблюдали выше и для кругов форм 1А1 та 12А2-45°. Однако, возникает вопрос определения достаточности такой жесткости. В работе [187] дополнительно введено понятие удельной жесткости $j = J / S_{pn}$, где S_{pn} – площадь режущей поверхности кругу. Показатель удельной жесткости позволяет оценивать достаточность осевой жесткости по отношению к площади режущей поверхности круга, воспринимающей все нагрузки при шлифовании. Имеется в виду наличие определенной корреляционной связки между максимальными нагрузками и площадью режущей поверхности круга. Так, при увеличении внешнего диаметра круга D (табл. 3.11) показатель j снижается и несколько стабилизируется при $D > 150$ мм. Это указывает на то, что круги формы 12А2-20° меньших диаметров (50–125 мм) имеют больший запас

жесткости, чем круги диаметров 150–250 мм. Однако необходимо также учитывать, что круги меньших диаметров работают в наиболее неблагоприятных условиях по скорости резания и им тем более необходим некоторый запас жесткости. Но достаточно ли этого запаса? Для ответа на этот вопрос предложено [62] ввести понятие относительной жесткости круга: $j_B = j \cdot v_k$. Поскольку скорость круга v_k является функцией D , то это выражение принимает вид:

$$j_B = (\pi n / 60) \cdot j D = K_{II} \cdot F,$$

где K_{II} – коэффициент пропорциональности, n – частота вращения круга.

В этой формуле наиболее интересным является сомножитель $F = j \cdot D$, который косвенно отражает влияние скорости шлифования через внешний

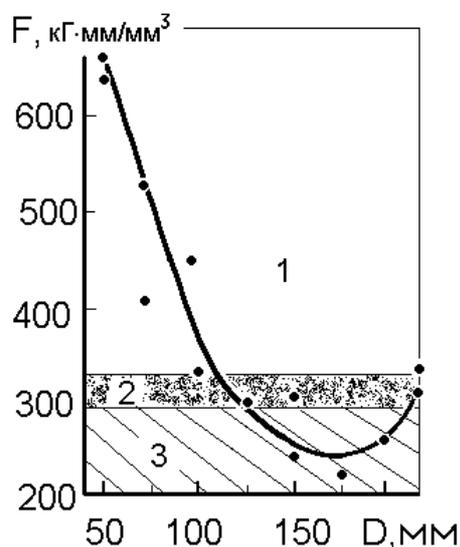


Рис. 3.15. Графическая интерпретация зависимости критерия F от внешнего диаметра круга D : 1 – зона избыточности осевой жесткости; 2 – граничная зона (оптимальное значение критерия F); 3 – зона недостаточной жесткости [62]

диаметр круга и который может быть принят в качестве критерия достаточности осевой жесткости уже применительно к условиям шлифования. В табл. 3.11 приведены значения F , а на рис. 3.15 представлена графическая интерпретация зависимости данного критерия от внешнего диаметра D . Их анализ указывает на то, что в качестве оптимальной нормы критерия F может быть принято его среднее значение для кругов диаметрами от 100 до 250 мм, которое равно 300–320 кг/мм². Анализ F с этой точки зрения показывает, что стандартизированные круги формы 12А2-20° диаметрами 50–75 мм так и имеют достаточно высокий запас жесткости. Отсюда можно сделать вывод о том, что выполнять корпуса кругов 12А2-20° указанного типоразмера как из стали, так и алюминия нецелесообразно. Для этого, следует использовать более дешевые и менее дефицитные материалы, например прессованный алюмоба-

келит. С другой стороны, некоторые типоразмеры кругов диаметром 175 и 200 мм не имеют достаточного запаса осевой жесткости. В этом случае необходимо вносить какие-то конструктивные изменения, направленные на повышение жесткости (см. п. 22 в табл. 3.11), или изменять материал корпуса круга на более прочный (например, алюминий на сталь) [62].

Твердость рабочего слоя алмазных кругов является одной из характеристик, которая в значительной степени определяет их работоспособность, и фактически служит основным технологическим параметром, по

которому оценивается качество рабочего слоя кругов [71]. Твердость алмазного слоя в значительной степени определяет эксплуатационные характеристики алмазно-абразивного инструмента – производительность, износостойкость, качество обработки и шероховатость обработанной поверхности [130]. Так, в работе [166] показано, что с повышением твердости круга параметр Ra при обработке керамики снижается.

В работе [189] показано, что твердость у кругов из СТМ в определенной степени является неоднородной, что вызвано технологией изготовления таких кругов. Так, для кругов на металлических связках установлено, что почти 90 % изученных кругов со средней твердостью менее чем 100 HRB имеют на рабочей поверхности участки сниженной или повышенной на 10–30 HRB ед. твердости. Для кругов со средней твердостью рабочего слоя за 100 HRB преимущественно результаты измерений являются более стабильными. Распределение средней твердости по толщине рабочего слоя представлено на рис. 3.16. Видно, что рабочий слой твердостью около 100 HRB является более однородным, чем слой твердостью 93 HRB , а также, что твердость слоя толщиной как 3, так и 5 мм в его поверхностной части ниже и особенно это является ощутимым для кругов с исходной твердостью 93 HRB . Исследования распределения твердости по поверхности рабочего слоя круга на уровне толщин 1,0 та 2,5 мм (рис. 3.17) подтвердило то, что более стабильные свойства имеет слой со средней твердостью 100 HRB [189].

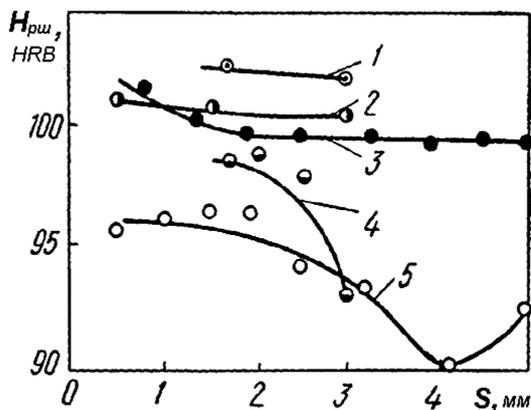


Рис. 3.16. Распределение твердости по толщине рабочего слоя кругов КР 100/80–М2-12Э–100 (1), КРС 100/80–МО13Э–100 (2), КРС 100/80–МО20-2–100 (3-5). Исходная средняя твердость 102 (1), 100 (2,3), 93 (4,5) HRB [189]

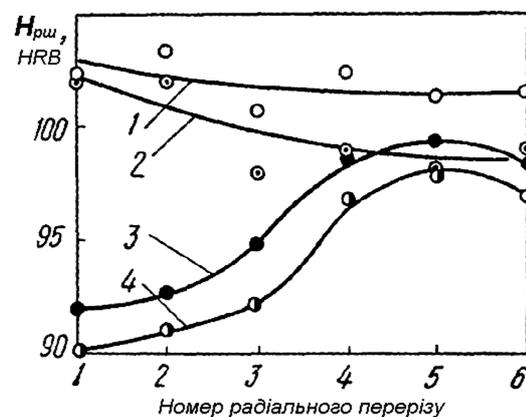


Рис. 3.17. Распределение твердости по поверхности рабочего слоя кругов КРС 100/80–М2-12Е–100 на уровне толщины 1,0 (1,3) и 2,5 (2, 4) мм. Исходная средняя твердость 100 (1, 2) и 93 (3, 4) HRB [189]

Коэффициент трения связующего кругов из СТМ в работе [71] определен для условий трения по обрабатываемым инструментальными матери-

алам. Установлено, что с возрастанием нагрузок в зоне фрикционного контакта коэффициент трения инструментальных материалов по керамическим и металлическим связкам с основами Cu–Sn и Cu–Sn–Sb снижается, по металлическим связкам с основой Cu–Al–Zn повышается, а по полимерным – остается неизменным. Указанные выше особенности объяснены [71] следующим. С ростом нагрузки повышается температура в зоне контакта и инициируется возникновение оксидных пленок, как на связке, так и на инструментальном материале. А это, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента трения. В тех случаях, когда такое окисление не происходит, например, на керамических связках или инструментальной керамике, или образуются специфические пленки, как, например, на связке с основой Cu–Al–Zn, коэффициент постоянен или даже увеличивается. В случае фрикционного контакта без применения СОТС коэффициент трения резко возрастает. Так, при скольжении инструментальных материалов по металлическим связкам он повышается: в 1,3–1,9 раза для основы Cu–Al–Zn, в 1,6–4,9 раза для основы Cu–Sn, в 2,4–4,7 раза для основы Cu–Sn–Sb, а по полимерным связкам – в 1,8–2,9 раза (исключение составляет связка на основе кобальта, у которой коэффициент трения по инструментальным материалам в случае контакта без СОТС – снижается). Укажем, что и в данном случае выводы из изложенной выше «оксидной» гипотезы подтверждаются. Известно, что добавки Sb снижают окисляемость, поэтому наиболее повышение коэффициента трения мы и наблюдаем на связке с основой Cu–Sn–Sb [71].

Установлено, что для обработки инструментальных материалов с точки зрения фрикционного контакта нецелесообразно использовать круги на керамических связках, так как они имеют наибольшие показатели коэффициента трения – 0,14–0,39. Следует обратить внимание на то, что металлические связки на основе кобальта (0,12–0,38) и на основе Cu–Al–Zn (0,12–0,32) являются также для них неблагоприятными с точки зрения снижения контактных нагрузок. В свою очередь, другая группа связок: полимерных (0,06–0,15), и металлических на основах Cu–Sn–Sb (0,06–0,18) и Cu–Sn (0,02–0,17) уже являются более благоприятными для использования при обработке инструментальных материалов, в особенности содержащих карбиды металлов IVb–Vb подгруппы [71].

Электросопротивление кругов из СТМ исследовалось в работе [71] применительно к процессам электрошлифования кругами из СТМ. Одним из вариантов снижения при электрошлифовании избыточного электроэрозионного тока является повышение электросопротивления круга, который входит в электросопротивление внешней электрической цепи (R_3), благодаря чему, снижается мощность разрядов в межэлектродном промежутке [190]:

$$N_p = R_E U^2 / (R_3 + R_E)^2.$$

Выявлено [71], что преимущественное влияние на электросопротивление кругов из СТМ оказывает характеристика его рабочего слоя, а именно: их связка, концентрация зерен СТМ в рабочем слое и покрытие зерен. Так, с повышением относительной концентрации зерен в рабочем слое электросопротивление кругов ощутимо возрастает (табл. 3.12), поскольку в связке повышается доля абразива, имеющего невысокую проводимость. Обратим внимание на то, что в электропроводной металлополимерной связке марки ВС-Э повышение концентрации от 50 до 150 % приводит к чрезвычайно резкому росту ее электросопротивления, что вероятно вызвано полупроводниковыми свойствами оксидов, покрывающими зерна в такой связке.

Таблица 3.12. Влияние относительной концентрации СТМ на электросопротивление кругов (R_K) формы 12А2-45° 150×10×3×42×32

Характеристика круга	Электросопротивление (мОм) при концентрациях (%)				
	25	50	100	125	150
КРМ 100/80 М1-04	2,4	2,7	3,3	–	–
КРС 100/80 М2-12Э	2,9	3,4	4,5	–	–
АС4ма 100/80 ВС-Э	–	19,1	38,1	270,2	980,1

Таблица 3.14. Влияние покрытия зерен из СТМ на электросопротивление кругов формы 12А2-45° 150×10×3×42×32

Характеристика круга	Электросопротивление (мОм) при покрытиях			
	без покрытия	стекло покрытия (С)	металлических	
			Н1-25	МА
КР 100/80–М2-12Э–100	3,5	4,5	3,4	–
АС4 100/80–МО13Э–100	5,2	7,0	4,7	–
АС15 100/80–М2-12Э–100	3,5	4,2	3,3	–
ГА 100/80–М1-01–100	2,8	3,0	–	–
АС4 100/80–ВС-Э–100	10,1	–	–	38,1

Приведенное выше свидетельствует о влиянии покрытия зерен на электропроводность кругов. Установлено [71] (табл. 3.14), что стеклопокрытие (С) резко повышает электросопротивление. Последнее у кругов без покрытия и с металлизированным СТМ отличается незначительно. При этом, у металлических связок наличие металлопокрытия (Н-125) несколько снижает сопротивление, а у металлополимерных (МА) – повышает. Укажем также, что в случае, когда связка круга полимерная (типов В2-01 или В2-08) и не проводит ток, применение металлизированного покрытия зерен СТМ резко снижает электросопротивление. Так, круг 12А2-45 150×10×3×42×32–АС4 100/80–В2-08–100 имеет $R_K=4 \cdot 10^6$ Ом, а при введении металлизации алмазов (МА) – $R_K = 80$ мОм (табл. 3.15).

Таблица 3.15. Влияние связок на электросопротивление кругов из СТМ с характеристикой 12А2-45 150×10×3×42×32–АС4 (АС6, КР) 100/80–100

Связка	Твердость рабочего слоя, <i>HRB</i>	Коэффициент содержания электропроводных компонентов в связке	Электросопротивление кругов, мОм, со связкой	
			без СТМ	с СТМ
Металлические связки				
М1-01	87 ± 5	0,95	–	2,8 ± 0,2
М1-03	91 ± 6	–	–	3,0 ± 0,3
М1-04	86 ± 7	0,91	2,9 ± 0,3	3,5 ± 0,3
М1-05	95 ± 4	0,75	4,4 ± 0,4	–
МО13Э	103 ± 4	0,95	4,0 ± 0,3	4,9 ± 0,4
М1-10	92 ± 6	0,91	2,7 ± 0,2	–
М2-01	87 ± 6	1,00	2,1 ± 0,2	2,4 ± 0,2
М2-09	96 ± 4	0,97	2,5 ± 0,2	–
М2-12Э	96 ± 6	0,88	2,6 ± 0,2	3,4 ± 0,3
М2-15-2	90 ± 5	0,97	–	3,3 ± 0,3
М2-15-4	103 ± 3	0,93	–	3,4 ± 0,3
М3-16	94 ± 3	0,97	2,0 ± 0,2	–
М6-16	94 ± 4	0,99	2,0 ± 0,2	–
МС2	103 ± 4	0,89	2,0 ± 0,2	–
МС6	92 ± 3	0,85	2,3 ± 0,3	2,9 ± 0,3
МО20-2	105 ± 5	0,88	2,9 ± 0,3	3,9 ± 0,4
МШ-С1	75 ± 5	0,99	–	2,4 ± 0,2
Металлополимерные связки				
В1-01	35 ± 5	0,94	11,0 ± 3,0	31,0 ± 5,0
В1-02	49 ± 5	0,94	–	25,0 ± 2,0
В1-03	44 ± 4	0,91	5,0 ± 1,0	9,0 ± 2,0
В1-10	43 ± 7	0,60	20,0 ± 2,0	129,0 ± 8,0
В1-13	54 ± 3	0,65	10,0 ± 2,0	18,0 ± 4,0
ВС-Э	56 ± 4	0,72	7,0 ± 1,0	10,0 ± 2,0
Полимерные связки с покрытием алмазов – МА				
В1-11П	62 ± 2	–	–	76,0 ± 18,0
В2-01	68 ± 6	–	–	712,0 ± 38,0
В2-08	64 ± 3	–	–	80,0 ± 24,0

Изучено также электросопротивление кругов из СТМ с характеристикой – АС4 (АС6, КР) 100/80–100 на разных связках (табл. 3.15). Видно, что наибольшее сопротивление наблюдается у металлополимерных связок, являющихся гетерогенными полимерными композитами, имеющими полимерное связующее и электропроводный наполнитель. При изменении концентрации алмазов в кругах на таких связках объемная доля полимера V_{II}

остается постоянной, а объемная доля наполнителя определяется как $V_H = 1 - (V_{II} + V_A)$. Учитывая изложенное в работе [71] определено электросопротивление круга в зависимости от концентрации и покрытия алмазов:

$$R_k = 1500\rho_H \frac{l\sqrt[3]{1/P_{BH}}}{S} \frac{1}{[1 - (V_n + V_a)](1 - V_a)}$$

Отсюда следует, что при всех других равных значениях ρ_H , R_k , l , S , электросопротивление зависит от объемной доли алмаза с учетом его покрытия.

С повышением концентрации алмазов электросопротивление кругов растет. Тем самым, зная сопротивление $R_k = 10$ мОм круга-эталоны (АС4 100/80–ВС-Э–100), возможно рассчитать электросопротивление кругов с другими характеристиками. Расчеты R_{ki} по этой формуле с погрешностью в пределах 1,8...9,5 % совпадают с экспериментальными данными (табл. 3.16), что позволяет использовать ее при анализе связи эксплуатационных и электрофизических параметров кругов из СТМ.

Таблица 3.16. Расчетные и экспериментальные значения R_k для кругов на связке ВС-Э (круг-эталон АС4 100/80–ВС-Э–100, $R_{k3} = 10$ мОм)

Характеристика алмазов в круге			R_k , мОм		Отклонение расчетных данных от экспериментальных, %
Марка алмазов	Зернистость	Концентрация	эксперимент	расчет	
АС4	100/80 МА	100	38	38,3	1,8
	(100/80+50/40)МА	100 + 25	270	251,8	6,8
	100/80МА+100/80	50 + 50	19	17,2	9,5
АС6	100/80 МА	100	38	38,3	1,8

3.3. Формоизменение режущей поверхности шлифовальных кругов из СТМ в процессе обработки

При фрикционном контакте двух тел естественным является взаимное формоизменение их контактных поверхностей. Процесс шлифования также имеет это явление, однако разница состоит в том, что формоизменение обрабатываемого материала происходит достаточно быстро, а абразивного – медленно. В то же время от состояния и формоизменения режущей поверхности круга в значительной степени зависят выходные показатели процесса шлифования. Укажем, что формоизменение режущей поверхности круга происходит как в радиальном направлении (образуется поперечный макропрофиль рабочей поверхности круга), так в окружном направлении (продольный макропрофиль рабочей поверхности круга).

Поперечный макропрофиль рабочей поверхности круга отражает неравномерное формоизменение режущей поверхности круга в радиальном направлении при шлифовании. Преимущественно исследователи пренебрегают таким формоизменением и считают, что вся режущая поверхность круга является ответственной за сьем материала за оборот круга. Но в реальных условиях шлифования это не так. В работе [71] рассмотрены особенности формоизменения поверхности круга в радиальном направлении, наиболее характерные для методов обработки с продольной подачей: многопроходного и глубинного. Профиль режущей поверхности круга, который образуется при торцевом шлифовании, является соединением двух

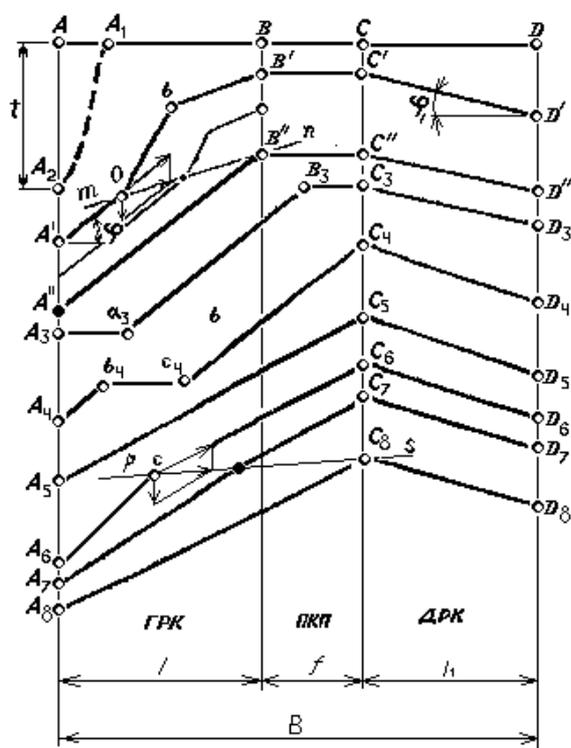


Рис. 3.18. Последовательное изменение профиля поперечного сечения режущей поверхности круга при разных условиях шлифования с продольной подачей [71]

3 – >250 г снятого материала. В нижней части профиля появляется отрезок $A'a$, который сразу получает наклон с углом φ . В процессе приработки точка a имеет две скорости перемещения: вдоль образующей с углом φ и в направлении износа. В конечном итоге перемещение точки a осуществляется по прямой $m-n$. После того, как точка попадает в положение точки B'' завершается первый этап приработки и образуется нестабильный трапецеидальный профиль $A''B''C''D''$. Укажем, что определив вначале этой стадии направление и скорость перемещения точки a вдоль образу-

режущих конических поверхностей: главной (ГРК) и вспомогательной (ВРК), разделенных переходным круговым пояском (ПКП). Однако, нашими дальнейшими исследованиями установлено, что образующая AB ГРК (рис. 3.18) с углом наклона φ может формироваться двумя способами, причем в переходном процессе она будет вогнутой или выпуклой. Вогнутая образующая характерна для впервые образующегося профиля и для нее процесс приработки проходит в 3 стадии:

1 – ~10 г снятого материала. Точка A (рис. 3.18) разделяется на две – A_1 и A_2 . Одна (A_1) перемещается радиально, а другая (A_2) – резко перемещается к низу формы профиля, таким образом, что расстояние AA_2 становится равным глубине обработки;

2 – ~250 г снятого материала. Точка A_1 смещается к точке B , причем такое перемещение в значительной степени происходит радиально;

щей ГРК, а также скорость износа, возможно рассчитать момент окончания приработки, когда образующая $A''B''$ приобретает вид прямой линии.

Дальнейшими исследованиями установлено, что и после приработки режущая поверхность круга имеет «ползучие» изменения. Вначале ГРК сдвигается приблизительно на половину исходной ширины кругового пояса (рис. 3.18), причем такой сдвиг A_3a_3 происходит параллельно B_3C_3 . Далее ГРК разделяется на две части. Нижний пояс b_4c_4 начинает смещаться вверх вдоль образующей и в нижней части профиля, начиная от точки A_4 , появляется новый режущий конус. В дальнейшем, верхний круговой пояс B_3C_3 исчезает, а нижний b_4c_4 в процессе перемещения вверх к точке C_4 уменьшается, и, в конечном итоге, образуется треугольный профиль режущей поверхности круга, что и характеризует полное завершение этапа приработки круга. С повышением режимов шлифования треугольная форма профиля уже не изменяется, возможным является только смещение точки C [71].

Более сложной является кинематика изменения профиля при переходе от более интенсивных режимов обработки к менее. В этом случае в нижней части профиля от точки A_6 (рис. 3.18) зарождается образующая нового режущего конуса с углом φ большим, чем у A_5C_5 . Однако, в дальнейшем угол φ уменьшается, приближаясь к исходному, а точка C , по аналогии с точкой a , описанной выше, перемещается по прямой $p-s$ и в сумме двух перемещений попадает в точку C_8 . Образованный в результате таких эволюций профиль $A_8C_8D_8$ полностью соответствует исходному $A_5C_5D_5$. Обратим внимание, что в данном случае все описанное выше относится до выпуклому профилю.

Таким образом, при торцевом жестком шлифовании режущая поверхность круга в радиальном сечении в конечном счете все же таки приобретает треугольную форму профиля $A_8C_8D_8$, для которой характерен равномерный (эквидистантный) износ. Описанные выше формы позволяют рассматривать круг в виде единого режущего профиля по аналог с резанием резцом, имеющем главное и дополнительное режущее лезвие. Такой подход обоснован также тем, что, например, при глубинном ЭХШ образца из стали Р6М5 алмазным кругом с характеристикой 12А2-45°150×10×3×32-АС15 100/80С-МО13Э-100 с производительностью 1200 мм³/мин в нижней части образца образуются волосовидные спирально-закрученные стержни (рис. 3.19), напоминающие сливную стружку при точении стали. Диаметр стержней зависит от угла φ ГРК и с его уменьшением снижается. В целом диаметр стержней находится в диапазоне 0,15–0,25 мм, а шаг закручивания составляет 2,80–3,25 мм.

Такой вывод позволил перейти до расчету площади поверхности круга, ответственной за сьем материала [71]. При переходе от одного режима шлифования к другому геометрические параметры формы профиля

круга изменяются. Это связано с тем, что при каждом режиме устанавливается определенная площадь режущей поверхности круга, которая определяется для ГРК через площадь боковой поверхности [71]:

$$S_{кб}^{ГРК} = \pi S_{\Pi} / [(D - S_{\Pi}/\text{tg}\varphi) \sin \varphi]. \quad (3.5)$$

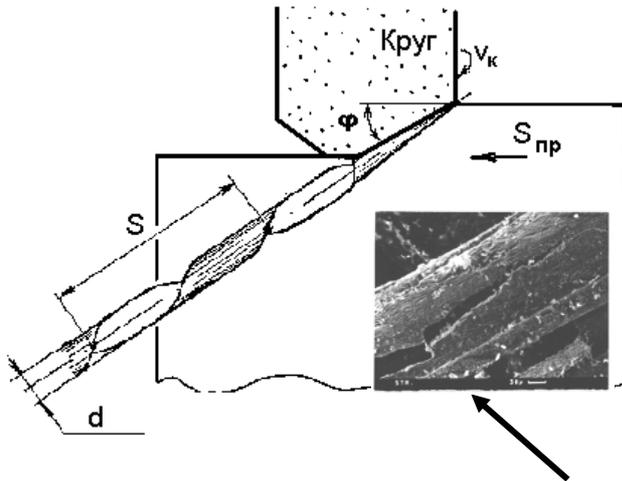


Рис. 3.19. Образование сливной стружки в нижней части образца из стали Р6М5 и ее поверхность [71]

Наиболее важными элементами для расчета объема материала, снимаемого за оборот круга (рис. 3.20), и определяющего производительность обработки с учетом постоянной площадью ГРК являются: длина дуги контакта круга с изделием по его высоте и толщина слоя материала, подвергнувшегося обработке, и определяющего нагрузку на зерна. Для определения длины дуги рассмотрена поверхность контакта круга с изделием (рис. 3.20, б). В общем виде для любой i -той точки образующей ag длина дуги по высоте

изделия равна: $\Delta l_i = 2\pi R_i \alpha_i$. Текущий радиус для i -ой точки профиля $R_i = pO - pt$ (рис. 3.20, а), а из треугольника apt равен $R_i = R_k - t_i/\text{tg}\varphi$. Угол α_i , охватывающий длину дуги по высоте изделия для i -го профиля определяли из треугольника rnO (рис. 3.20, б):

$$\alpha_i = \arcsin[h/(D - 2t_i/\text{tg}\varphi)].$$

Это позволило получить уравнение для расчета длины контакта [71]:

$$\Delta l_i = \pi(D - 2t_i/\text{tg}\varphi) \arcsin[h/(D - 2t_i/\text{tg}\varphi)].$$

Толщину слоя материала, снимаемого за оборот круга, a_0 определяли из треугольника kfg (рис. 3.20, а):

$$a_0 = kg \cdot \sin\varphi = S_{об} \cdot \sin\varphi,$$

где $S_{об}$ – подача заготовки на оборот круга, определяемого отношением $S_{пр}/n_k$, де n_k – частота вращения круга, об/мин. Известно, что $n_k = v_k/(\pi D)$, тогда $S_{об} = \pi D S_{пр}/v_k$. Далее получали уравнение для определения a_0 :

$$a_0 = \pi D S_{пр} \sin\varphi / v_k.$$

Используя формулы для расчета Δl_i и a_0 , а также то, что $ag = t/\sin\varphi$ (рис. 3.20, а), определен средний объем материала, снимаемый за оборот круга [71]:

$$w_0 = (\pi^2 D S_{пр} S_n / v_k) (D - 2S_n/\text{tg}\varphi) \arcsin[h/(D - 2S_n/\text{tg}\varphi)].$$

В этой формуле принято, что глубина шлифования t равна поперечной подаче $S_{\text{п}}$. Анализ приведенных выше формул показывает, что для улучшения условий резания зернами и снижения нагрузки на них необходимо стремиться к снижению угла φ и увеличению значений v_k и D .

Как было указано выше, процесс приработки заканчивается при достижении неустойчивого трапецеидального профиля. При этом наблюдается определенная стабилизация

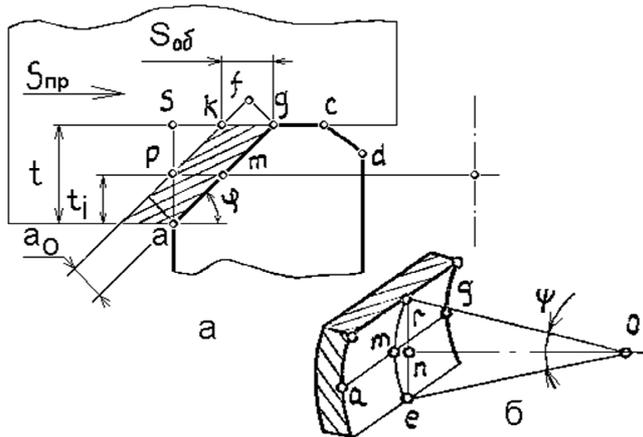


Рис. 3.20. Схема съема материала при торцевом шлифовании с продольной подачей [71]

показателей процесса шлифования ($N_{\text{эф}}$, I_T , q_p) и, в дальнейшем, при переходе к абсолютной треугольной форме, их значения изменяются мало. По мере снижения угла φ площадь контакта растет, что приводит к снижению износа кругов. Одновременно с этим наблюдается повышение эффективной мощности шлифования, вызванное увеличением количества режущих зерен при повышении площади контакта.

Поскольку круг за счет уменьшения угла φ не может компенсировать роста нагрузки на зерна при повышении $S_{\text{пр}}$ или снижении v_k , то растет толщина среза за оборот круга. При этом, снижается удельная работа резания в процессе удаления единицы объема материала и повышение эффективной мощности наблюдается в меньшей степени. Однако, повышение производительности обработки, или снижение скорости вращения круга, которые приводят к росту нагрузки на зерна, содействует их разрушению, повышению вероятности их вырывания со связки и, как следствие, быстрому износу кругов. Для типовых условий металлообработки при достижении стабильной треугольной формы профиля площадь режущей поверхности круга, ответственная за съем материала составляет только 70–75 % от общей [71].

Продольный макропрофиль рабочей поверхности круга отражает неравномерное формоизменение при торцевом шлифовании режущей поверхности круга в окружном направлении. В процессе торцевого шлифования наряду с формоизменением рабочей поверхности круга в поперечном или радиальном направлении не менее важные изменения на поверхности круга происходят и в продольном или окружном направлении. В большинстве случаев на них почти не обращается внимание и считается, что вся режущая поверхность круга является ответственной за съем припуска за оборот круга. Такое пренебрежение может привести к достаточно

существенным погрешностям. А связано это с тем, что форма профиля режущей поверхности круга в окружном направлении приобретает форму волны и реально за съём припуска отвечает только ее фронт (рис. 3.21).

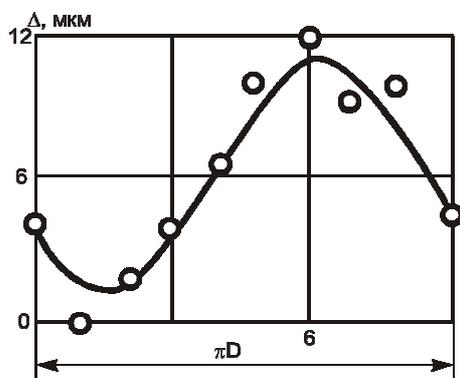


Рис. 3.21. Развертка эюры износа режущей поверхности круга в окружном направлении [62]

Если процесс формообразования режущей поверхности круга в радиальном направлении является характерным только для способов шлифования с продольной подачей, то процесс формообразования в окружном направлении имеет наличие для любого способа. На то, что режущая поверхность круга в окружном направлении может быть неравномерной и иметь выступы и впадины указано рядом исследователей [180, 191, 192], где приведенную неравномерность связывают с устоявшимися колебаниями в технологической системе. При этом, только на абразивных

кругах было зафиксировано движение этой неравномерности в виде волнового перемещения [180]. Так, в процессе шлифования появляется переменная составляющая силы резания, приводящая к образованию волн на рабочей поверхности круга формы 1А1, величина которых растет с увеличением производительности шлифования. С появлением волн сокращается количество рабочих зерен по периферии круга, повышается нагрузка на зерна, возникают автоколебания в технологической системе и происходит повышенный износ круга. Образованию волн на круге его неравномерная твердость и неравномерность. Перемещение волн на поверхности шлифовального круга объясняется тем, что точки его периферии, вступающие в контакт с обрабатываемой деталью на очередном проходе, постоянно изменяются. Это приводит к смещению вершин волн [180].

Снижение волнистости или полная ее ликвидация, как считают авторы [181], могут быть достигнуты при алмазно-электрохимическом шлифовании на «минусовой» полярности, благодаря чему уменьшаются автоколебания, повышается размерная стойкость, кромкостойкость и стойкость профиля круга. Когда волнистость является следствием биения круга, то она может быть уменьшена снижением жесткости инструмента или повышением площади его контакта с заготовкой, что достигается увеличением подачи на врезание. Колебания круговой жесткости шпинделя вызывают неравномерный износ круга и усиливают его радиальное биение. Радиальное биение, в свою очередь, вызывает повышение волнистости и огранки на обрабатываемой поверхности, нестабильность размеров, поэтому величина радиального биения круга не должна превышать 20–25 мкм [181].

Вместе с тем, детальное описание этого явления отсутствует, что не позволяет оценить динамику данного процесса и реальную площадь режущей поверхности круга, ответственную за сьем материала. Тем не менее в работе [192] все ж таки отмечено – «съем материала осуществляется не всей рабочей поверхностью, а лишь ее частью (55 %)». Именно поэтому, в работе [62] при изучении особенностей износа режущей поверхности круга в окружном направлении, исследовали следующие процессы: многопроходное шлифование стали Р6М5 без охлаждения кругами из КНБ на полимерной связке ПК, глубинное шлифование сплава марки ТН20 алмазными кругами на металлополимерной связке В1-13, глубинное электрохимическое шлифование стали Р6М5 кругами из КНБ на металлической связке М2-12Э. Тем самым, в поле исследования вошли не только три разных процесса, а и алмазные и кубонитовые круги, полимерные, металлополимерные и металлические связки, а также, разные обрабатываемые инструментальные материалы – быстрорежущая сталь и твердый сплав. Износ круга изучали в 10-ти радиальных сечениях и 3-х окружных. Основное внимание было уделено горизонтальному формоизменению без учета вертикального винтового смещения, которое является предметом отдельного исследования. Проведенные исследования показали, что во всех направлениях развертка режущей поверхности круга в окружном направлении имеет волнообразную форму износа. Если построить эпюру износа окружной поверхности круга по ее развертки и аппроксимировать ее полиномом, то она представляет собой волну (рис. 3.21), а поскольку режущая поверхность имеет неравномерный износ, то, соответственно, по такой же форме, но обратной, формируется и сама режущая поверхность круга в окружном направлении. Аналогичная форма «биения круга» имеется, например в работе [192]. Наличие волнового формоизменения при шлифовании связывалась в работах [180, 191, 192] только с жесткостью технологической системы, а перемещение волны считалось случайным явлением, вызванным касанием разных участков поверхности круга с обрабатываемым изделием [180]. В работе [62] впервые сформулирован другой подход к описанному явлению – как к закономерному формоизменению режущей поверхности круга. В этом случае наличие волны – необходимая составляющая механизма съема припуска. На основе такого подхода показано, что волна перемещается в окружном направлении и перемещается неравномерно, изменяя протяженность фронта (рис. 3.22). Результатом такого перемещения является то, что износ круга величина непостоянная как по толщине режущего слоя, так и по разным его радиальным сечениям в окружном направлении. Имеется ввиду следующее. Если произвольно выбрать любое радиальное сечение круга и наблюдать за его износом по толщине рабочего слоя на протяжении определенного промежутка времени, причем кругом будет сошлифовываться одинаковое количество

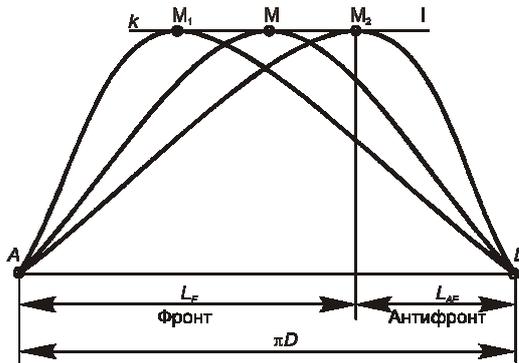


Рис. 3.22. Условная модель формы режущей поверхности круга в окружном направлении [62]

обрабатываемого материала, то возможно увидеть, что износ является величиной непостоянной и изменяется он по закону, близкому к синусоидальному. Аналогично и в окружном направлении: одни радиальные сечения будут изнашиваться быстрее, а другие медленнее. В дальнейшем будет происходить смена: первые будут снижать свой износ, а другие – ускорять. Тем самым будет наблюдаться износ поверхности, подвергающейся определенному колебательному процессу.

Такие колебания износа описаны и в работе [193], но их причина там не установлена. А причиной этого есть как раз то, что на режущей поверхности круга перемещается волна износа и это движение неравномерно. Модель формы режущей поверхности круга в окружном направлении в упрощенном виде представлена на рис. 3.22, где можно выделить наличие фронта (F) и антифронта (AF). Установлено, что в процессе шлифования вершина M профиля перемещается в окружном направлении режущей поверхности круга, но ее перемещение неравномерно. Для оценки этой неравномерности введено понятие коэффициента волнового формоизменения (k) – отношение проекций на ось абсцисс длины фронта волны (L_F) к ее антифронту (L_{AF}) (рис. 3.22). Коэффициент волнового формоизменения характеризует ту часть рабочей поверхности круга, которая ответ-

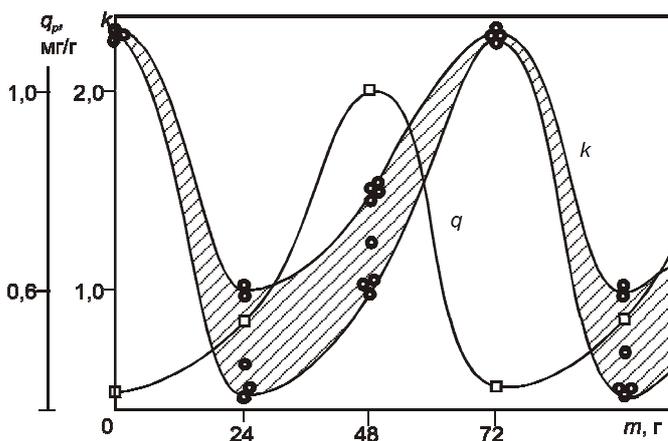


Рис. 3.23. Колебания значений коэффициента волнового формоизменения и износа круга от массы сошлифованного материала за шаг пульсации (заштрихована зона колебаний величины коэффициента k , вызванные неравномерной твердостью рабочей поверхности круга) [62]

ственна за сьем обрабатываемого материала при одном обороте этого круга. Данный коэффициент фактически отражает характеристику лобовой поверхности, воспринимающей основную нагрузку при шлифовании.

Именно неравномерностью перемещения, отражающегося на изменении коэффициента k , можно пояснить пульсирующий характер износа кругов. На рис. 3.23 приведены закономерности изме-

нения износа круга (q_p) и коэффициента k от массы сошлифованного за шаг пульсации материала (m). На первом этапе величина L_F увеличивается, повышается и k . Круг постепенно распределяет нагрузку на свою рабочую поверхность. Когда профиль достигает максимального значения L_F , он уже исчерпывает резервы дальнейшего увеличения площади рабочей поверхности. Начинает возрастать нагрузка, что приводит к срыву гребня волны. Далее идет процесс самозатачивания режущей поверхности и при переходе к L_{Fmin} износ естественно растет до тех пор, когда переход профиля от L_{Fmin} к L_{Fmax} не превысит половину пути. Максимум износа приходится на момент, когда $k \approx 1,25$. С превышением этого значения износ снижается, и процесс самозатачивания завершается. Переход от т. M_1 к т. M_2 и снова к т. M_1 является регулярным и изменение величины коэффициента волнового формоизменения имеет скачкообразный характер, напоминающий по своей форме профилограмму шероховатости поверхности. Поэтому, была принята [62] методика обработки «скачкообразных» кривых, описывающих связь между массой снятого материала и коэффициентом волнового формоизменения $k_F = f(m)$, которая аналогична к обработке профилограмм. По этой же методике подвергали обработке совокупность данных $q_p = f(m)$. Общая величина массы (m) снятого обрабатываемого материала составила не менее 1 кг. Из полученных данных, наибольшее внимание уделено шагам колебаний величины коэффициента волнового формоизменения и величины износа q_p . Обобщенные элементы колебаний указанных выше величин за один шаг представлены на рис. 3.24. Характерно то, что шаги колебательного изменения величин k и q_p совпадают. При этом величина первого этапа (переход профиля от т. 1 до т. 2) составляет 2/3, а второго этапа (переход от т. 2 до т. 1) – 1/3 величины сошлифованного за шаг

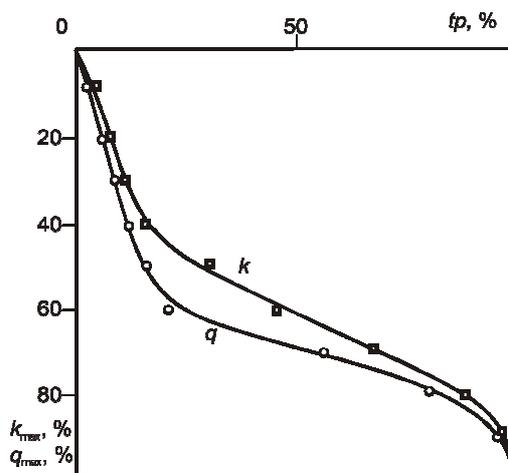


Рис. 3.24. Относительная опорная кривая профиля колебаний величин коэффициента волнового формоизменения и износа круга [62]

материала (m). Величина шага зависит от условий обработки и для исследованных методов составила: при многопроходном шлифовании стали Р6М5 без охлаждения – 72 г; при шлифовании стали Р6М5 с охлаждением – 84 г; при глубинном электрохимическом шлифовании стали Р6М5 – 102 г. Установлено, что коэффициент волны колеблется в пределах 0,43–2,33, а это означает, что площадь фронта волнового формоизменения изменяется в диапазоне 30–70 % от общей площади режущей поверхности круга. Характерно то, что шаги колебательного изменения значений k и q_p совпадают.

Все эти три фактора (наличие волны, ее перемещение и неравномерность этого перемещения) являются, на наш взгляд, исключительно важными, поскольку проясняют механизм съема припуска. Круг распределяет нагрузку на зерна (волна), вводит с течением времени новые поверхности в работу, давая предыдущим передышку (перемещение волны), и, наконец, срабатывает механизм самозатачивания (неравномерность перемещения волны). Еще одним подтверждением изложенных выше гипотез является то, что, несмотря на пульсирующий характер движения волны по поверхности круга, существует корреляционная связь между износом круга и скоростью перемещения волны, которая, например, для условий многопроходного шлифования стали Р6М5Ф3 без охлаждения, приведена на рис. 3.25. Это означает, что с повышением износа скорость движения волны растет или наоборот – с повышением скорости перемещения волны растет износ круга. В математическом виде для условий многопроходного шлифования стали Р6М5Ф3 без охлаждения такая связь с погрешностью в 24,6 % может быть описана зависимостью: $I = -1,26 + 16q_p$. Тем самым, для повышения износостойкости кругов необходимо ограничивать скорость движения волны в окружном направлении. Для этого необходимо выполнить следующее. Во-первых, внести хаотичность в процесс перемещения волны, чтобы снизить скорость ее перемещения, во-вторых – разделить волну как минимум, на две, чтобы сбалансировать срывы ее гребня [62]. Конкретную реализацию этих рекомендаций мы рассмотрим далее при изложении специальных конструкций кругов из СТМ.

Что касается величины площади режущей поверхности круга, ответственной за съем обрабатываемого материала, установлено [62], что за счет продольного формоизменения в съеме за оборот круга может принимать участие от 30 до 70 % режущей поверхности. Анализ рис. 3.23 позволяет определить, что среднее значение коэффициента k находится в пределах 1,25, что соответствует доле площади фронта волны в общей площади поверхности круга, равной 55,6 %. Это совпадает с указанным выше значением у 55 %, приведенным в работе [192]. Такое совпадение независимых исследований является определенным подтверждением приведенного выше. Следует дополнить, что среднее значение площади в 55 % является характерным как раз для методов шлифования без продольной подачи – упругого и врезного. При многопроходном и глубинном шлифовании, когда еще дополнительно су-

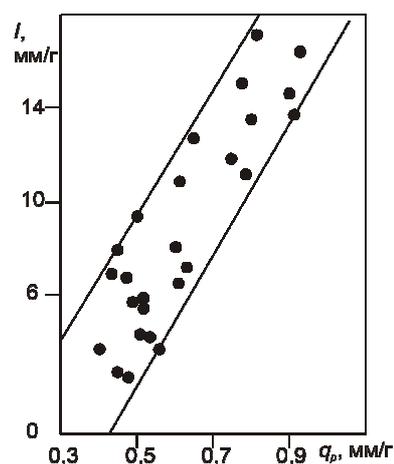


Рис. 3.25. Связь между интенсивностью (I) перемещения впадины волны и величиной износа круга (q_p) [62]

ществует радиальное формоизменение, эта площадь, с учетом доли такого формоизменения, равной 75 % [71], составит $(0,75 \cdot 0,55) \cdot 100 \% = 41,25 \%$. Следовательно, основной припуск при шлифовании в среднем снимает только ~40 % от всей режущей поверхности круга, а другие 60 % временно ожидают своей очереди войти в работу. А это как раз и отражается на том, что при повышении производительности обработки не хватает резерва площади режущей поверхности, а потому, возрастают нагрузки в зоне контакта. В свою очередь, обрабатываемые материалы реагируют на это сколами и прижогами, а круги из СТМ – повышенным износом [117].

3.4. Формы и типоразмеры шлифовальных кругов

Известна широкая номенклатура стандартных абразивных кругов из СТМ, регламентируемая ГОСТами. По виду выполняемых технологических операций и достигаемых показателей качества обработанной поверхности круги подразделяют на такие основные группы [194]:

- шлифовальные – для обработки изделий с достижением шероховатости обработанной поверхности до $Ra\ 0,08$ мкм;
- полировальные – для обработки изделий с достижением шероховатости обработанной поверхности до $Rz\ 0,04\text{--}0,05$ мкм;
- отрезные – для резки различных материалов;
- правящие – для правки кругов из абразивных материалов (корунда, электрокорунда и т.п.).

Основными конструктивными элементами кругов являются: корпус, абразивсодержащий слой и промежуточный слой (подслой), который обеспечивает прочное соединение абразивсодержащего слоя с корпусом. Промежуточный слой служит также для снижения внутренних напряжений в случаях, когда температурные коэффициенты расширения корпуса и абразивсодержащего слоя существенно разнятся. Корпуса кругов изготавливаются из различных металлических и неметаллических материалов и имеют посадочные отверстие на шпинделе круга.

Конструкцию кругов определяют выбор [194]: формы сечения круга, назначения поверхности (рабочая, присоединительная, посадочная), взаимного расположения составных элементов и способов их соединения, размеров круга и составных элементов. На выбор конструкции существенное влияние оказывают характеристики, определяющие эффективность работы кругов (расшифровка характеристики кругов представлена в табл. 3.17); материалы составных элементов, их физико-механические свойства; жесткость круга и составных элементов; возможная неуравновешенность; геометрическая точность формы, допуски на размеры; износостойкость; долговечность; энергоемкость, производительность.

Таблица 3.17. Расшифровка характеристики кругов из СТМ

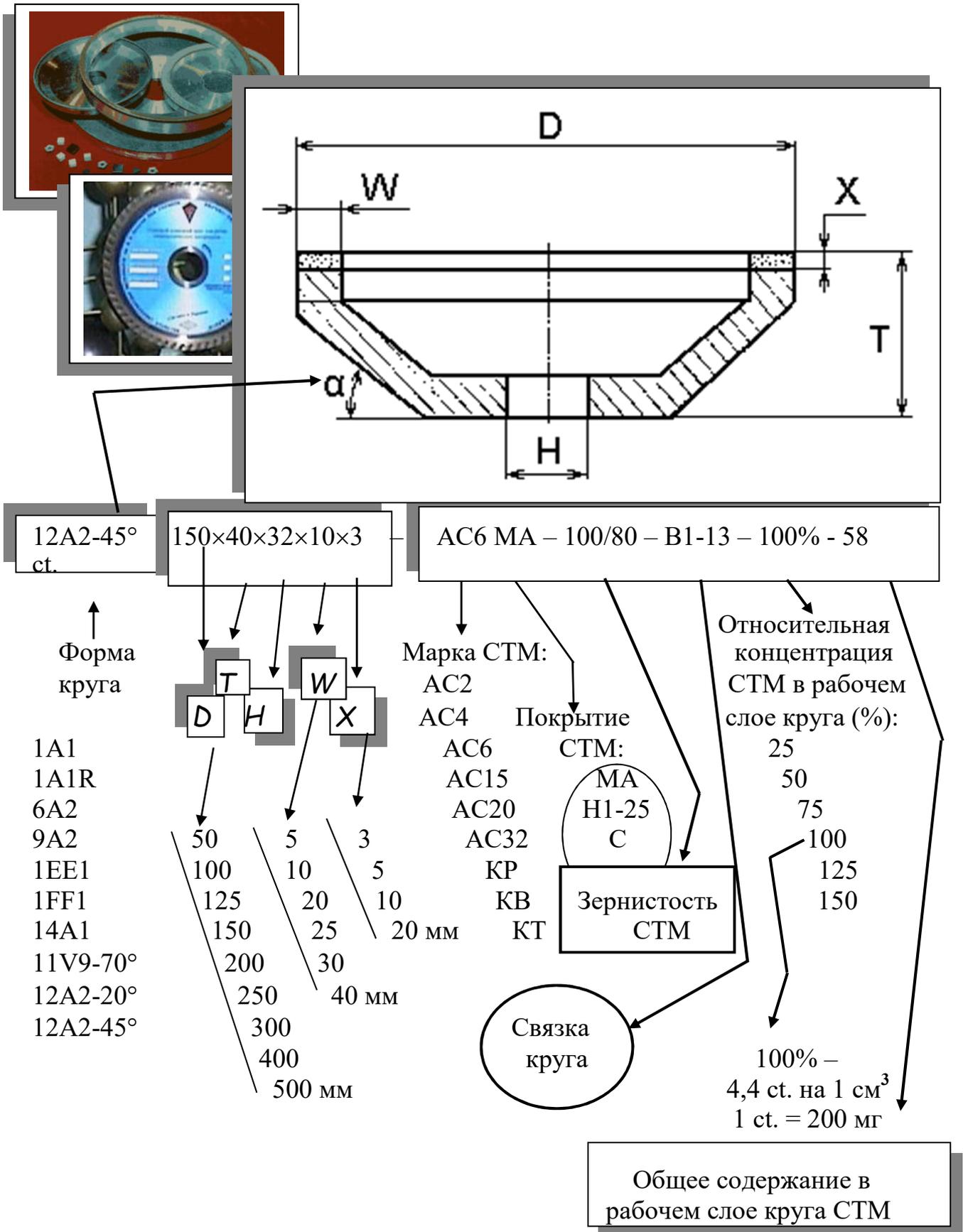
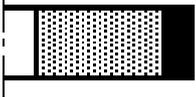
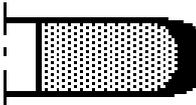
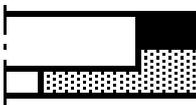
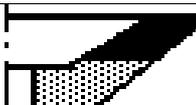
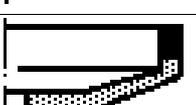


Таблица 3.18. Основные формы шлифовальных кругов из СТМ для шлифования материалов

Сечение круга	Форма	D , мм	Назначение
	1A1	80-400	Шлифование цилиндрических, конических и плоских поверхностей.
	1FF1	50-125	Затачивание деревообрабатывающих фрез и фасонных поверхностей. Обработка канавок.
	6A2	80-400	Затачивание и доводка режущего инструмента. Обработка плоских поверхностей.
	6A2(сп)	250-500	Шлифование опорных поверхностей, граней и радиусов многогранных пластин.
	12R4	80-150	Заточка и доводка многолезвийного инструмента по передней поверхности зубьев.
	11V9-70°	50-150	Заточка и доводка протяжек, разверток, пушечных сверл и подобных инструментов.
	12A2-45°	80-250	Заточка и доводка режущего инструмента. Обработка плоских поверхностей.
	12A2-20°	80-150	Заточка и доводка разверток, цельных и сборных фрез, дисковых пил, протяжек.
	12A2-25°	150-250	Шлифование фасок твердосплавных многогранных пластин.
	14EEI	125-350	Шлифование профильное, внешней и внутренней резьбы, канавок.
	1A1R	100-400	Резка твердых и хрупких неметаллических материалов.

Обратим внимание, что для реализации высокоэффективных технологий шлифования различных материалов используются как стандартные, представленные выше, так и специальные, представленные в следующей

подглаве, круги из алмаз- или кубонитсодержащих композиций, а также других абразивных материалов.

Основные формы шлифовальных кругов из СТМ для шлифования материалов представлены в табл. 3.18.

3.5. Специальные круги из СТМ для процессов алмазно-абразивной обработки

В 80-х годах прошлого века в СССР производство было достаточно интенсивным и, во многих случаях, требовало замены дорогостоящего импортного инструмента. В этот период в ИСМ создано более 150 типоразмеров специальных конструкций кругов от 100 до 600 мм диаметром, что позволило устранить закупку импортных шлифовальных кругов за рубежом бывшего СССР. Укажем, что и основной объем заказов приходился на круги больших диаметров с содержанием алмазов более 500 карат. Такой объем в 1991 году составлял 76 % от общего объема выполняемых заказов [195]. Последовавшее в дальнейшем снижение уровня производства привело к изменению структуры заказов. В 1994 г. уже основную долю заказов составляют круги средних типоразмеров, содержащих от 50 до 500 карат алмазов. Причина этого, заключается в достаточно остром снижении спроса на спецкруги больших типоразмеров, вследствие сокращения объемов производства и отсутствия оборотных средств на большие заказы таких кругов, а также в изменении структуры применяемого шлифовального инструмента.

На начало 2000-х годов структура объема изменяется довольно значительно. И происходит это как раз за счет резкого увеличения объемов применения шлифовального инструмента с малым содержанием СТМ – от 2 % в 1991 г. их объем возрастает до 35 % в 1998 г. Заметим, что в восьмидесятые годы основные заводы-изготовители довольно прохладно относились к заказам инструмента с малым содержанием СТМ. Это было связано с тем, что для серийных заводов такие круги были экономически невыгодны, и от таких заказов старались максимально избавиться, а предпочитали большие круги, где затрат на карат использованного СТМ меньше, а значит и меньше всяких хлопот. Другая ситуация сложилась в девяностые годы и характерна она и сейчас. Возрос спрос на малокаратные круги, он остался и на данный момент.

Складывающийся ныне рынок шлифовальных кругов из СТМ был детально проанализирован и, установлено, что зависимость стоимости 1 карата синтетических алмазов в готовом изделии в зависимости от содержания алмазов в круге (а) и наружного габаритного диаметра круга (б)

имеет следующий характер (рис. 3.26). Видно, что малогабаритные и малокаратные круги имеют повышенную стоимость алмазов в кругах и именно ими на данном этапе следует заниматься небольшим предприятиям, чтобы получить большую прибыль на начальном этапе. Укажем, что обе приведенных выше тенденции привели к тому, что ныне на первое место выдвинулись работы, связанные с созданием новых технологий получения малогабаритных кругов, имеющие корпуса из менее дефицитных материалов.

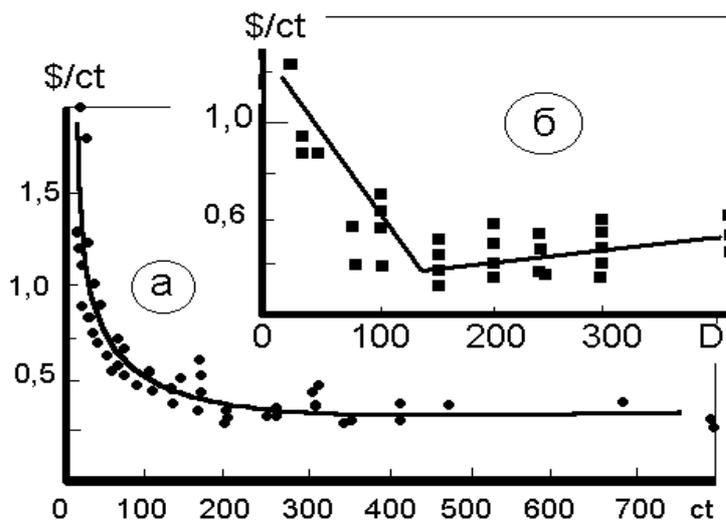


Рис. 3.26. Зависимость стоимости 1 карата алмазов в кругах от содержания алмазов в круге (а) и наружного диаметра круга (б)

материалах: быстрорежущих сталях, твердых сплавах, режущей керамике. Как следствие, возникает проблема, обуславливаемая необходимостью в эффективной обработке традиционных и новых инструментальных материалов. Особенно это актуально для высокопроизводительных процессов шлифования, когда необходимо обеспечить одновременно и высокое качество обрабатываемой поверхности и экономичность обработки. Для обеспечения этих условий необходимо иметь надежный инструмент, а именно шлифовальный, эффективность абразивной обработки которым базируется на широком использовании сверхтвердых материалов. В последнее время для решения указанных проблем используют принудительное воздействие на рабочую поверхность круга в виде механического абразивного воздействия (правки) или в виде воздействия дополнительной энергии на режущую поверхность. Это во многих случаях позволяет достичь необходимого уровня режущей способности кругов из СТМ, особенно для условий обработки таких труднообрабатываемых инструментальных материалов, как керамика, и обеспечить приемлемое качество обработанной поверхности. Сдерживающим фактором расширения областей применения указанных

Рассмотрим возможности повышения эффективности процесса шлифования материалов за счет разработки специальных секторных кругов, сочетающих эффективность работы СТМ и направленное изменение характеристик рабочего слоя непосредственно в зоне резания.

Анализ современного состояния рынка инструментов свидетельствует об увеличении потребностей производства в современных инструментальных ма-

решений является необходимость использования специального оборудования или модернизации универсального, решения дополнительных проблем соблюдения экологичности процесса обработки и утилизации отработанных технологических жидкостей.

На наш взгляд перспективным является еще одно направление – разработка способов такого изменения характеристик рабочего слоя круга в окружном направлении, когда непосредственно в процессе обработки обеспечивается постоянное возобновление режущей способности круга. В связи с этим, поиск и разработка новых конструкций специальных кругов, сочетающих высокую эффективность работы СТМ и направленное изменение характеристик рабочего слоя непосредственно в зоне резания, именно и должны придать качественный скачок в существенном улучшении износостойкости кругов при производительной и качественной обработке труднообрабатываемых материалов, что является современной и актуальной задачей.

Разработок в указанных направлениях в литературе приведено немного, но известные данные свидетельствуют о перспективности его для кругов из СТМ. Так, в работе [196] отмечаются положительные моменты сочетания в одном рабочем слое разных сверхтвердых абразивов – алмазов и эльбора. При этом, указано, что было бы интересным использовать такой инструмент для одновременной обработки как твердых сплавов, так и быстрорежущих сталей. В связи с относительно высокой стоимостью кругов из кубического нитрида бора по сравнению с алмазными возникает вопрос о возможности его частичной замены в кругах более дешевым синтетическим алмазом. Авторами [197] проведены исследования при электрохимическом шлифовании с производительностью $840 \text{ мм}^3/\text{мин}$ стали Р6М5 кругами формы 12А2-45° $150 \times 10 \times 3 \times 32$ с зернистостью СТМ 100/80 на связке М2-12Э:

Содержание СТМ в круге, %		Технологический ток, А	Эффективная мощность шлифования, кВт	Относительный расход СТМ, мг/г
КРС	АС6С			
100	–	90	1,5	0,3
70	30	170	1,1	1,3
50	50	180	1,2	1,2
30	70	150	1,5	2,2
–	100	100	2,3	7,8

Показано, что при шлифовании стали Р6М5 с заменой части кубонита на алмаз относительный расход СТМ увеличивается, однако при этом снижается эффективная мощность шлифования, что свидетельствует об активации режущей поверхности круга. Показано, что для повышения производительности шлифования целесообразно использовать круги с

одинаковым содержанием в рабочем слое алмазов и КНБ со стеклопокрытиями [197]. Изложенное свидетельствует о том, что введение измененных характеристик рабочего слоя возмущает, или активирует режущую поверхность круга, и одним из вариантов направленного изменения характеристик рабочего слоя может как раз и быть специальная конструкция рабочего слоя кругов из СТМ.

Из литературы известны подобные конструкции кругов, когда изменяется не только характеристика рабочего слоя, а и его физические свойства. Так, авторы [198] для глубинного электрохимического шлифования предложили многослойную конструкцию рабочего слоя, когда средний слой выполняется из материала связки и его главная задача обеспечить электрохимическое растворение вершинок микронеровностей и снижение тем самым шероховатости обработанной поверхности. Авторами [199] показано, что для повышения производительности обработки и стойкости инструмента за счет снижения автоколебаний станочной системы токопроводящий абразивный слой круга выполняется по периферии из ряда токопроводящих связок с перепадом их электрохимических эквивалентов. При этом, протяженность участков из неодинаковых связок повторяется в окружном направлении с определенным шагом. Известны также круги с прерывистым режущим слоем, впадины которого, например, заполняют твердой смазкой до уровня выступов и, тем самым, образуется своеобразный секторный круг с равномерной последовательностью чередования слоев рабочего алмазного слоя и твердой смазки [201]. Аналогично и для

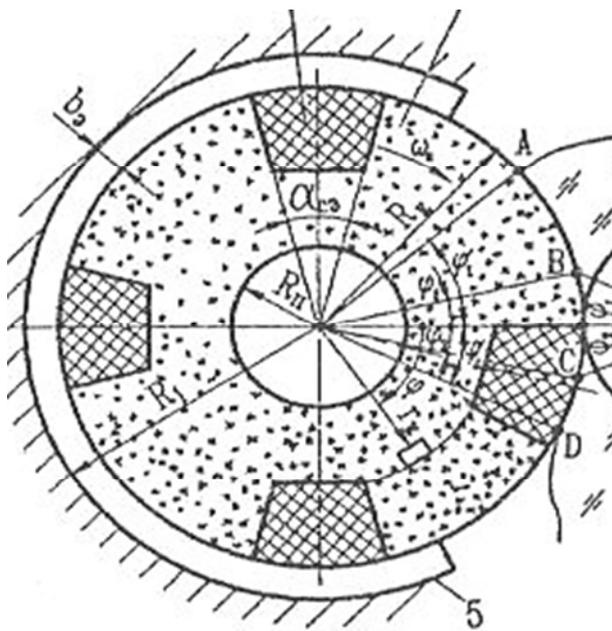


Рис. 3.27. Композиционные шлифовальные круги с секторами из твердой смазки, чередующиеся в окружном направлении [200]

абразивных кругов для круглого внешнего шлифования разработаны композиционные круги, радиальные прорезы которых заполнены твердым смазочным материалом (рис. 3.27) [200]. В целом приведенный выше анализ свидетельствует о эффективности и перспективности многослойных кругов, с изменением слоев в окружном направлении. Вместе с тем, разработок по созданию кругов с направленным изменением слоев в окружном направлении, когда непосредственно в процессе обработки происходит направленная активация режущей поверхности круга, не проводилось.

Как будет показано далее в главе 4, при повышении производительности обработки возникает характерное для процессов шлифования противоречие связанное с тем, что такое повышение приводит к одновременному увеличению износа кругов и ухудшению шероховатости обработанной поверхности. В значительной степени все это связано с описанными нами выше формоизменениями режущей поверхности круга как в радиальном, так и в окружном направлении. Дополнительно укажем, что в данном случае преимущественное внимание мы уделяем формоизменениям в окружном направлении, поскольку именно они, на наш взгляд, определяют возможности активации режущей поверхности круга. Поясним, почему это так.

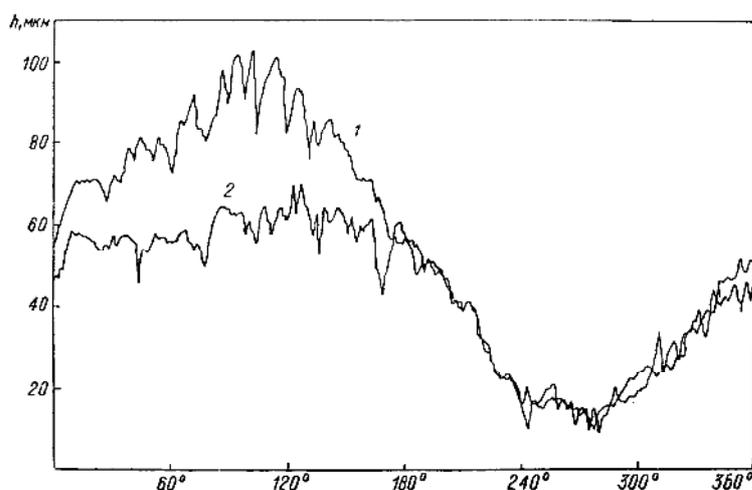


Рис. 3.28. Развертка профиля круга из СТМ до (1) та после (2) опыта [202]

Укажем, что для кругов из СТМ, кроме наших исследований, в литературе также зафиксировано наличие волнового рельефа (рис. 3.28) [202, 203], однако исследований по его динамике нами не обнаружено. Как было указано выше, на эту сторону формирования режущей поверхности круга обращается неоправданно мало внимания,

а между тем, существование такой волны отображает как раз механизм съема материала кругом из СТМ.

В исследовании [117] приведена модель изменения режущей поверхности круга, которая учитывает то, что в окружном направлении в процессе обработки режущая поверхность приобретает волнообразное формоизменение, которое в развертке имеет вид двух режущих наклонов — главного (ГРН) та вспомогательного (ВРН) (рис. 3.29). Показано, что описанное формоизменение является естественным процессом выстраивания режущих зерен на поверхности круга для снятия материала и в процессе обработки происходит смещение вершины волнообразного формоизменения от т. M_0 до т. M_2 . После достижения максимального положения — т. M_2 , происходит процесс вскрытия режущей поверхности круга, что характеризуется повышенным износом и возвратом к форме профиля в начальное положение КМК. Потом происходит снова постепенная приработка ГРН от положения KM_0 до KM_2 и циклическое повторение процесса возобновления режущей способности.

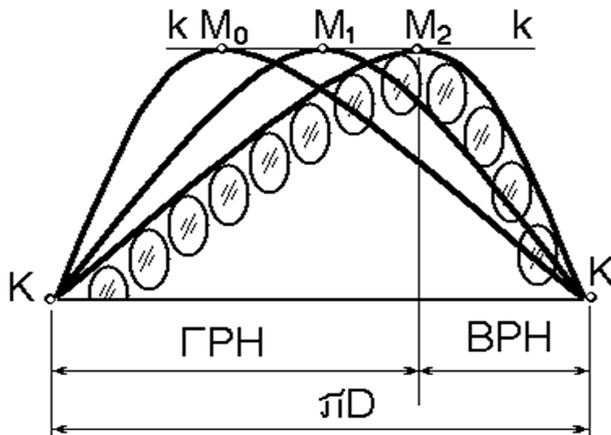


Рис. 3.29. Модель формы износа режущей поверхности круга в окружном направлении [117]

позитивным, но на реальном круге оно займет до 40 % поверхности и значительная потеря износостойкости круга произойдет именно в этот период. Поэтому, это смещение нужно оставить, однако управляемо снизить величину такого смещения, что существенно повысит износостойкость круга. Эти два научных положения и были приняты нами за основу для разработки новой конструкции круга с чередующимися в окружном направлении секторами (рис. 3.30).

Обратим также внимание на геометрические размеры основных слоев и вставных. Как было показано выше, в съеме материала за оборот круга за счет окружного формоизменения может принимать участие от 30 до 70 % режущей поверхности. Именно так колеблется протяженность ГРН (рис. 3.29). Для достижения наибольшей износостойкости круга крайне желательно было бы, чтобы протяженность ГРН была бы наибольшей и не изменялась (положение – KM_2K , рис. 3.29). Вместе с тем, переход от т. M_2 к т. M_0 является отрицательным с точки зрения достижения износостойкости круга, однако является положительным с точки зрения обеспечения режущей способности круга, поскольку он характеризует период возобновления режущей поверхности. Поэтому полностью избежать его невозможно, но возможно отрегулировать величину этого возобновления. В реальном круге переход от т. M_2 к т. M_0 составляет 40 % от протяженности режущей поверхности в окружном направлении, а по угловой протяженности это приблизительно составляет $360 \cdot 0,4 = 144$ градуса. Минимальная протяженность ВРН составляет приблизительно 30 %. Это означает, что угловая протяженность вспомогательного режущего наклона должна быть в диапазоне приблизительно 100 градусов ($360 \cdot 0,3 = 108$). Если у нас три основных сектора протяженностью по углу в 100 градусов, то они займут вместе угловую протяженность в 300 градусов. На вставные

По нашему мнению, из изложенного выше необходимо выделить два наиболее важных для нас аспекта. Во-первых, желательно стремиться к удержанию ГРН в наиболее максимальном положении, а именно в – KM_2K , что обеспечит участие в процессе обработки наибольшей режущей площади, и, тем самым, повысит износостойкость круга. Во-вторых, смещение вершины из т. M_2 в т. M_0 , которое означает возобновление режущей способности, является



Рис. 3.30. Предложенная конструкция режущего слоя с секторами рабочего слоя, чередующимися в окружном направлении

угловой протяженности они составят 30, 20 та 10 градусов. Причем нами определено, что для повышения износостойкости вставных секторов вначале в работу должен входить более протяженный вставной сектор, потом средний и далее меньший. Таким образом, определено, что размер секторов основного рабочего слоя не должен превышать минимальный угловой размер ВРН, чтобы обеспечить большую площадь ГРН, а вставные сектора должны исполнять функцию обеспечения управляемого возобновления режущей способности круга, но при этом угловая разница между точками возврата M_2 в M_0 составляет уже не традиционные 140–150 градусов, а только максимум 30, что должно значительно повысить износостойкость круга при сохранении процесса возобновления режущей способности. Обеспечить такое возобновление вставными секторами возможно соответствующим изменением характеристик режущего слоя. Такое изменение, на наш взгляд, возможно в двух основных направлениях: во-первых, непосредственно изменением характеристики режущего слоя – связкой, зернистостью и концентрацией СТМ в рабочем слое, покрытием зерен; во-вторых, изменением свойств режущего слоя – твердостью, электропроводностью и т.п., а эти направления в определенной степени зависят от рабочего слоя абразивного инструмента.

Выше в главе 2 нами уже был показан новый взгляд на представления о рабочем слое абразивного инструмента из СТМ для традиционных условий его спекания и прессования как про композит, в котором определяющим является направление действия касательных напряжений в процессе его формирования. Угол направления действий таких напряжений ($45^\circ \Leftrightarrow 135^\circ$) – как раз и характеризует структуру и, на наш взгляд, характер тех тенденций в работе шлифовальных кругов из СТМ к которым сле-

сектора, цель которых регулировать перемещение т. М только в границах их протяженности и активировать тем самым поверхность круга, остается общая угловая протяженность в 60 градусов. Возможно равномерно розбить вставные сектора по 20 градусов ($3 \cdot 20=60$), однако у нас выше задекларирован принцип внесения дополнительной активации в режущую поверхность круга, а поэтому три вставных сектора направленно необходимо сделать неодинаковыми и тогда по

дует стремиться в направлении повышения их износостойкости. По нашему мнению, эта особенность в направлениях исследований, а именно, ориентация на определенное структурирование в рабочем слое и в первую очередь в направлении углов ($45^\circ \Leftrightarrow 135^\circ$), а не 90° , является достаточно принципиальной. Зерна СТМ оказывается, находятся в совсем иных рабочих условиях, чем это традиционно представляется исследователями в теоретических разработках, а это означает, что следует основываться на совсем других приоритетах как в процессах формирования рабочего слоя кругов, так и в процессах обработки такими кругами. Продемонстрируем это на тенденции изменения величины одного из важнейших базовых параметров процесса шлифования – коэффициента абразивного резания $fa = P_z / P_y$. Каким он должен быть? К чему необходимо стремиться в том случае когда нам необходимо повышать износостойкость, или когда нам необходимо активировать режущую способность поверхности круга?

Результаты расчетов указанных выше значений показателей перепадов напряжений для разных углов наклона зерен и коэффициентов абразивного резания представлены в табл. 3.19. При этом, выбирали значения величин коэффициентов абразивного резания из диапазона от 0,05 до 0,40. Эти значения перекрывают весь диапазон коэффициентов для различных инструментальных материалов: 0,05–0,10 (инструментальные керамики), 0,20–0,25 (безвольфрамовые твердые сплавы), 0,30–0,40 (твердые сплавы). Анализ табл. 3.19 показывает, что при угле наклона зерен в 90° , который традиционно принимается исследователями за аксиому, наименьшие перепады напряжений создаются при малых значениях коэффициента fa – от 0,05 до 0,15. А это означает, что основной тенденцией в этом случае следует считать необходимость стремления к снижению величины коэффициента абразивного резания, что и позволит снизить напряжения в связке, а следовательно и повысить износостойкость кругов.

Таблица 3.19. Влияние коэффициента абразивного резания на расчетные показатели напряжений в связке в месте контакта связки с зерном

Коэффициент абразивного резания, fa	Показатели напряжений, МПа, в связке при углах наклона зерен					
	45°		90°		135°	
	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_m$	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_m$	$\Delta\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma_m$
0,05	41,34	38,73	20,23	1,39	33,81	40,59
0,10	74,95	45,47	23,93	10,81	39,11	56,60
0,15	58,96	46,98	23,39	7,26	36,29	21,91
0,20	68,39	40,45	61,92	25,27	96,70	56,98
0,25	40,00	23,19	39,67	19,43	58,69	31,08
0,30	38,39	22,07	42,29	23,70	60,70	29,96
0,35	24,66	13,58	59,93	38,63	51,29	18,56
0,40	23,58	13,24	51,67	41,45	62,57	17,70

А что же происходит в условиях реальных углов наклона зерен, которые близки к 45° и 135° ? Из табл. 3.19 видно, что при угле в 45° наименьшие показатели перепада напряжений возникают при повышенных значениях коэффициента fa – большими за 0,35. А вот при углах наклона в 135° возникают несколько противоречивые данные, поскольку по одному показателю перепада следует, что значения fa должны быть низкими, а по другому – высокими. Тут, на наш взгляд, следует обратить внимание на то, что как указано в работе [117], реальный наклон половины зерен в 45° еще не так ощутимо влияет на их удержание, то наклон второй половины зерен в 135° попадает в очень неблагоприятную зону, где напряжения превышают допустимые для известных составов связок. В условиях производительностей шлифования равных или больших критических [117], от этих зерен трудно ожидать реального участия в съеме материала. Из этого следует, что нам необходимо ориентироваться на тенденции, характерные как раз для угла наклона зерен в 45° . Таким образом, для достижения благоприятного напряженного состояния системы «зерно-связка» и, соответственно повышения износостойкости кругов, необходимо стремиться в процессе шлифования совсем не к снижению, как это следует из концепции угла в 90° , а к повышению величины fa . Для подтверждения такого вывода в работе [117] была изучена связь износа круга с коэффициентом fa при шлифовании твердого сплава ВК6ОМ кругом 12А2-45° 150×10×3×32–АС4 63/50ма–В1-11П–125 с производительностью 174 мм³/мин. Исследования показали, что с возрастанием коэффициента абразивного резания износ круга снижается и корреляционная зависимость между износом и коэффициентом абразивного резания имеет вид [117]:

$$q_p = 149,58 - 467,16 \cdot fa .$$

Аналогичная тенденция подтверждена и для безвольфрамового твердого сплава ТН20 при шлифовании кругом 12А2-45° 150×10×3×32–АС4 100/80–В1-13–100 с производительностью 450 мм³/мин, где для диапазона значений коэффициента f_a от 0,05 до 0,40 зависимость имеет вид:

$$q_p = 3,054 - 6,916 \cdot fa .$$

Видно, что и в этом случае с возрастанием величины fa износ алмазных кругов снижается.

Указанные выше исследования подтверждают также и положение о необходимости, для повышения износостойкости рабочего слоя, увеличивать величину коэффициента абразивного резания. Вместе с тем, снижение, при таких условиях, величины этого коэффициента приведет к повышению режущей способности круга и, тем самым, активации режущей поверхности. Это связано с тем, что основным характером механического контакта на границе «зерно–связка» является жесткое защемление зерна в

связке, а в таком случае наличие реального наклона зерен в 45° или 135° придется на зону (табл. 3.19), где показатели $\Delta\sigma_{\max}$ и $\Delta\sigma_m$ возрастают. В условиях высоких производительностей шлифования в этом случае повышается нагрузка на зерна и связку, а это будет содействовать, во-первых, процессу их возобновления, и, во-вторых, улучшению режущей способности зерен СТМ формированием большей разветвленности их поверхности (рис. 3.31). Таким образом, снижение, для реальных условий углов расположения зерен СТМ в рабочем слое, величины коэффициента абразивного резания приведет к повышению режущей способности круга и, тем самым, к активации режущей поверхности круга. На основании изложенного выше, выдвинуто положение о том, что при применении шлифовального круга с чередующимися вставными секторами, когда основной режущий слой должен быть износостойким, а вставки – иметь повышенную режущую способность, то последние для осуществления активирующей функции должны иметь такую

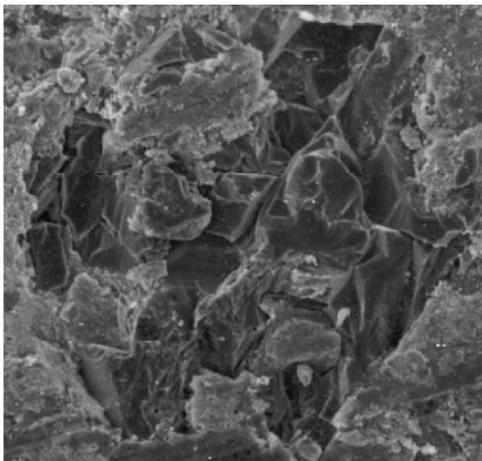


Рис. 3.31. Пример активации режущей поверхности алмазного зерна при повышении нагрузок на поверхность круга

характеристику режущего слоя, которая бы в процессе шлифования обеспечивала меньший коэффициент абразивного резания, чем основной слой.

Из литературы известен ряд мероприятий, изменяющих коэффициент абразивного резания: во-первых, повышение скорости вращения круга снижает коэффициент fa [204, 205], во-вторых, с возрастанием зернистости и концентрации порошка СТМ в круге – fa повышается [204], в-третьих, коэффициент fa является большим у кругов на металлической связке М2-01, чем у кругов на полимерной связке В2-01 [206].

Естественно, что на одном круге невозможно обеспечить разную скорость для разных его участков, а вот такие характеристики рабочего слоя, как зернистость и концентрация мы можем достаточно эффективно использовать. Поэтому, сделан вывод, исходя из изложенного выше, что для достижения направленной активации режущего слоя круга и, одновременно сохранения в целом износостойкости, в вставных секторах необходимо использовать зернистость и концентрацию СТМ меньшую чем в основном слое.

Вместе с тем, указанное выше третье мероприятие – изменение связующего, может также принести определенный позитив в достижении направленной активации режущего слоя, однако, на наш взгляд, тут нужно подходить несколько шире, и выявить возможности направленного воз-

действия на активацию изменением не просто связующего, а его физико-механическими характеристиками рабочего слоя, для определения условий повышения работоспособности шлифовального инструмента из СТМ. Поскольку в литературе обобщенных данных по таким характеристикам недостаточно, то применительно к цели нашей работы, далее были изучены некоторые важные для нас характеристики рабочего слоя кругов из СТМ.

Как было уже указано выше, какими бы хорошими не были исходные характеристики зерен СТМ, но они удерживаются связующим и именно оно существенно влияет на их работоспособность. Известно [115], что чем больше прочность связки, тем лучшим будет ее абразивоудержание. Для поиска путей повышения удержания зерен рассмотрим выводы, изложенные в [131], где показано, что твердость связки в границах одного состава может характеризовать ее способность на удержание зерен. Кроме того, показано, что наиболее вероятной является взаимосвязь алмазоудержания с прочностью при сжатии, которая может быть записана как [131]

$$\sigma_A = 0,074 R_{cm} + 12,4.$$

Таким образом, важным технологическим приемом по улучшению удержания зерен при повышении производительности обработки является прямое увеличение показателей прочности связок. Для этого, нами были изучены их механические свойства: границы прочности на сжатие, изгиб, растяжение, модули Юнга и Пуассона (табл. 3.20).

Таблица 3.20. Механические свойства связок кругов из СТМ

Связка	Границы прочности, МПа, на			Модуль упругости, E , ГПа	Коэффициент Пуассона, ν
	сжатие	изгиб	растяжение		
Металлические связки					
М1-10	230	71	39,8	63,0	–
М2-01	830	515	198,2	105,0	–
М2-09	373	124	–	97,8	–
М2-12Э	392	123	31,5	105,4	–
МО20-2	677	119	49,2	80,0	–
Полимерные связки					
В1-10	–	–	29,9	20,8	0,395
В1-11П	–	–	–	13,1	0,320
В1-13	213,0	–	28,0	16,2	0,230
В2-01	237,1	93,2	26,0	–	–
ВС-Э	213,8	77,8	30,8	–	–

Поскольку мы реально имеем дело с абразивсодержащими композициями, то для нас в значительной степени представляет интерес изменение их свойств в зависимости от изменения характеристик рабочего слоя кру-

гов из СТМ. Так (см. подглаву 2.2), установлено, что прочность на сжатие у полимерных и металлополимерных композитов снижается с повышением относительной концентрации зерен СТМ в композите. Наличие металлического наполнителя в полимерном композите влияет на повышение прочности на сжатие. Аналогичным образом ведут себя и показатели прочности на изгиб и растяжение. Так, прочность на изгиб с возрастанием концентрации алмазов уменьшается. Укажем, что любое покрытие алмазов во всех случаях приводит к снижению прочности композитов на растяжение. Аналогично влияет зернистость – ее повышение снижает прочность. Обратим внимание, что изложенное выше верно для диапазона относительных концентраций 50 – 150 % и зернистости СТМ из диапазона 63/50 – 250/200.

Необходимо отметить, что контроль указанных выше показателей прочности для реальных инструментов является в определенной степени усложненным, поэтому желательно было бы иметь такой показатель, который бы не приводил к необходимости разрушения рабочего слоя и был бы технологично не сложным. Таким показателем с некоторыми ограничениями может быть твердость. В связи с тем, что твердость абразивоудержающего слоя контролировать легче, чем прочность на сжатие, известны исследования по установлению взаимосвязи этих параметров [71]. Как следствие, это позволяет получить для металлополимерных связок зависимость между прочностью алмазоудержания и твердостью:

$$\sigma_A = 0,273 H_{pc} + 19,8.$$

Анализ зависимости указывает на то, что с возрастанием твердости рабочего слоя абразивоудержание увеличивается и, тем самым, изменением твердости возможно влиять на условия использования зерен СТМ и изменения тем самым состояния режущей поверхности круга, например, улучшать ее износостойкость, или наоборот, активировать эту поверхность. Таким образом, приведенные выше исследования позволяют определить комплекс механических свойств, характеризующих режущий слой кругов из СТМ и установить определенные пути регулирования и изменения таких свойств в необходимом, для конкретных условий шлифования, направлении. Далее мы приведем примеры использования этого для создания специальных многослойных кругов с направленным изменением характеристик рабочего слоя.

Выше мы уже обращали внимание на то, что в процессе шлифования режущая поверхность круга приспособливается к условиям резания и приобретает сложную форму. При этом выявлено [117], что такая форма профиля постоянно перемещается в окружном направлении вдоль режущей поверхности круга таким образом, что создаются своеобразные процессы волнового формоизменения. Установлено, что в процессе шлифования вершина M (рис. 3.29) волны перемещается по окружности, но ее переме-

щение является неравномерным. Также установлено, что движение гребня волны является неравномерным, а срывы гребня определяют процессы возобновления режущей поверхности в процессе шлифования. Нас в этом перемещении интересует вопрос его неравномерности во времени. Если сделать анализ перемещения точек впадины (min) или вершины (max) волны по равномерно разбитым секторам (сечениям) поверхности круга в окружном направлении, то в каких-то секторах круга этих точек будет больше, а в каких-то – меньше. При этом, за некоторый промежуток времени количество min совпадает с количеством max. Поэтому не удивительно, что на круге одна точка имеет повышенный износ. Поскольку наблюдается перемещение волны, то эта точка со временем будет иметь и малый износ. Для иллюстрации этого построена развертка режущей поверхности круга в окружном направлении, на которой указаны номера сечений круга и количество попаданий положений впадины волны на конкретное сечение (рис. 3.32). При этом видно, что точки сечений 3, 4, 7, 8 имеют больше максимумов, чем, например, точки сечений 0, 1, 5, 6.



Рис. 3.32. Показатели твердости режущего слоя круга (1), на котором проводились исследования по изучению волнового формоизменения режущей поверхности круга 12A2-45° 150×10×3×32–КР 100/80–ПК-03–100, соотнесенные с количеством (2) положений (n) впадины волны при ее перемещении вдоль режущей поверхности, которые попадают на определенные точки сечений вдоль развертки круга (масса сошлифованной стали Р6М5Ф3 – 864 г.)

есть в литературе и довольно детально описана в работе [117]. Вместе с тем, круги из СТМ, даже одинаковых характеристик, могут иметь твердость рабочего слоя, которая разнится между ними до 20 ед. *HRB*. А это, в свою очередь, приводит к разной износостойкости кругов. Так, например, согласно [117], относительный расход КНБ при глубинном электрохими-

Первую причину неравномерности мы изложили выше: это срыв вершины профиля, вызванный процессами вскрытия режущей поверхности круга. А вот почему нет закономерности в самом процессе неравномерности? На наш взгляд, тут играет важную роль неоднородность в физико-механических характеристиках режущего абразивсодержащего слоя конкретного круга по его круговой поверхности. Такая неоднородность по твердости

ческом шлифовании стали Р6М5 кругом 12А2-45° 150×10×3×32–ЛКВ8–М2-12Э–100 с твердостью рабочего слоя 74 *HRB* равен 1,8 мг/г, а таким же кругом с твердостью слоя 92 *HRB* – 1,3 мг/г.

Поскольку, как было указано выше, круги могут иметь неравномерную твердость, то это влияет на их износостойкость и на неравномерность движения волны по их поверхности. В виде косвенного подтверждения этой гипотезы можно обратить внимание на данные по возникновению волнового износа продольного профиля рельс, приведенные в работе [207]. Ее автор считает, что такой износ вызван напряжениями, возникающими при прокатке рельс и проявляющимися в неравномерной твердости рельсов. Для проверки выдвинутой гипотезы нами была изучена твердость рабочего слоя кругов по тем же 10 сечениям, по которым изучали износ круга (рис. 3.32). Если сравнить обе развертки на рис. 3.32, то можно увидеть, что характеры разверток по впадинам и по твердости совпадают обратно – чем больше твердость, тем меньше количество остановок впадины на этой точке. Это говорит о том, что второй причиной неравномерного перемещения волны по режущей поверхности круга является неравномерность в твердости самой поверхности. А, как следствие, мы и имеем такие колебания в величине износа круга за равные промежутки времени или массовые величины снятого материала при шлифовании. Поскольку реально перемещение волны по поверхности круга мы можем зафиксировать только после измерения линейного износа режущей поверхности при шлифовании и снятия достаточно большого объема обработанного материала, то, чтобы проявить визуально такое движение вдоль круговой поверхности круга, был поставлен эксперимент, когда направленно на режущей поверхности круга формировались анодные оксидные пленки именно на вершинах волн



Рис. 3.33. Следы движения вершины вдоль режущей поверхности круга и пример неравномерности такого перемещения

ны и следы движения этих вершин можно отследить, пока они не закончили один оборот своего движения (рис. 3.33). Видно, что шаг следов неравномерен, что и подтверждает приведенные выше исследования по неравномерности волнового формоизменения в окружном направлении.

Определим нашу позицию по приведенному выше. Как указано, неравномерность движения является элементом самозатачивания режущей поверхности круга и, тем самым, активации режущей поверхности, которая

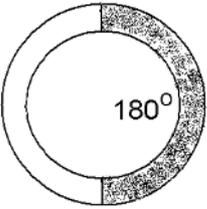
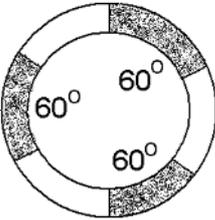
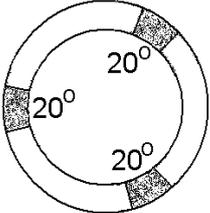
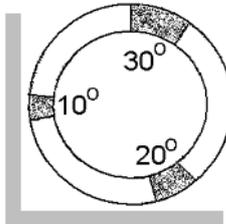
нам нужна для улучшения режущей способности круга с повышением его износостойкости. Вставными секторами в специальном круге (рис. 3.30) за счет изменения их характеристики (зернистости или концентрации СТМ) мы можем направленно поддерживать режущую способность круга. Вместе с тем, представленные выше исследования показывают, что возможен и другой подход к направленной поддержке режущей способности. Данные по неравномерности твердости казалось бы свидетельствуют о том, что желательнее стремиться к достижению наилучшей равномерности в структуре рабочего слоя круга, но нами выдвинуто другое положение, а именно положение о внесении направленной неоднородности в структуру и характеристику рабочего слоя круга, что позволило бы достичь эффекта направленной активации режущей поверхности круга.

Следовательно, для достижения направленной активации режущей поверхности круга на вставных секторах необходимо использовать зернистость и концентрацию СТМ меньшую, чем в основном слое. Другим вариантом такой активации является направленная неоднородность в твердости рабочего слоя основных и вставных секторов и, при этом, твердость основного рабочего слоя должна быть большей, чем на вставках. Для проверки этого, и уточнения направлений дальнейших исследований, были [208] изготовлены 4 варианта конструкций специальных кругов и проведены исследования их работоспособности в сравнении с серийными кругами. При этом, во вставных секторах использовали две достаточно существенно различающиеся зернистости алмазов – 63/50 и 200/160, чтобы уловить разницу в показателях работоспособности и косвенно подтвердить правильность наших выводов по поводу лучшего использования во вставных секторах меньших зернистостей в сравнении с основным рабочим слоем. Исследования проводили на станке 3В642 при шлифовании пластин из твердого сплава Т15К6 с производительностью обработки 1050 мм³/мин (скорость вращения круга – 30 м/с, продольная подача – 0,5 м/мин, поперечная подача – 0,3 мм/дв.х., охлаждение – водный раствор NaNO₃ (1,0 масс. %) и NaNO₂ (0,2 масс. %)). Результаты исследований приведены в табл. 3.21.

Анализ данных табл. 3.21 позволяет сделать следующие выводы:

– во-первых, внесение в рабочую поверхность круга дополнительного возмущения разделением на две части или последовательно и равномерно на 6 частей практически не дает эффекта, а и даже несколько ухудшает эксплуатационные показатели. Очевидно, такая принудительная замена основного рабочего слоя достаточно существенным количеством вставных секторов, без целевой направленности такой замены, и не может принести существенного эффекта;

Таблица 3.21. Исследованные варианты конструкций рабочего слоя кругов и их эксплуатационные показатели при шлифовании твердого сплава Т15К6

Конструкция рабочего слоя круга	Характеристика рабочего слоя круга 12А2-45° 150×10×3×32	Показатели шлифования		
		Относительный износ алмазов, мг/г	Эффективная мощность шлифования, кВт	Шероховатость поверхности, Ra, мкм
 <p>Стандартный круг</p>	Стандартная			
	АС6 125/100–МО20-2–100	1,42	0,95	0,25
	АС6 63/50–МО20-2–100 АС6 200/160–МО20-2–100	1,81 1,22	1,28 0,80	0,16 0,42
 <p>180°</p>	Основной слой АС6 125/100–МО20-2–100			
	Вставные сектора АС6 63/50–МО20-2–100 АС6 200/160–МО20-2–100	1,60 1,34	1,25 0,80	0,18 0,36
 <p>60° 60° 60°</p>	Основной слой АС6 125/100–МО20-2–100			
	Вставные сектора АС6 63/50–МО20-2–100	1,62	1,10	0,24
 <p>20° 20°</p>	Основной слой АС6 125/100–МО20-2–100			
	Вставные сектора АС6 63/50–МО20-2–100	0,84	0,90	0,21
 <p>30° 20°</p>	Основной слой АС6 125/100–МО20-2–100			
	Вставные сектора АС6 63/50–МО20-2–100 АС6 200/160–МО20-2–100	0,54 1,03	0,70 0,55	0,19 0,37

– во-вторых, введение в рабочий слой небольшой, но направленной протяженности, вставных секторов (угловая протяженность суммарно около 60°) дает возможность достичь необходимого эффекта. При этом, равномерное распределение протяженности вставных секторов (угловая про-

тяженность по 20°), позволяет изменить износ круга, но мощность шлифования остается практически без изменений, тогда как при неравномерном распределении угловой протяженности вставных секторов (30° , 20° и 10°) достигается как снижение износа круга, так и мощности шлифования, что свидетельствует об улучшении режущей способности круга.

Исходя из результатов табл. 3.21 и была выбрана далее за основу конструкция рабочего слоя круга с чередующимися секторами в круговом направлении, причем периодичность чередования была определена неравномерной (А.с. СССР № 1437169). Для уточнения наиболее рациональной характеристики рабочего слоя вставных секторов, была изготовлена опытная партия специальных кругов в количестве 54 кругов, в которых изменялись: зернистость из диапазона от 63/50 до 200/160, концентрация СТМ от 50 до 150%, покрытие зерен (металлическое, стеклопокрытие), связка круга (металлические, полимерные, металлополимерные связки), марка СТМ – алмазы АС4, АС6, АС20, кубонит КР та КВ.

Работоспособность кругов с чередующимся режущим слоем исследовалась при шлифовании твердого сплава Т15К6 с охлаждением при производительности обработки $1050 \text{ мм}^3/\text{мин}$ (скорость вращения круга – 30 м/с, продольная подача – 0,5 м/мин, поперечная подача – 0,3 мм/дв.х., охлаждение – водный раствор натрия азотнокислого (1,0 масс. %) та азотистокислого (0,2 масс. %). При этом за базовую была выбрана характеристика круга 12А2-45° 150×10×3×32–АС6 125/100–М020-2–100. Изготавливались круги (конструкция представлена в табл. 3.21, последняя строка) с вставными секторами различных характеристик и исследовалось влияние изменения характеристики вставных секторов на работоспособность кругов в сравнении с кругами со специальным рабочим слоем. Результаты исследований представлены в табл. 3.22 и 3.23.

Влияние покрытия алмазных зерен. Установлено, что в сравнении со сплошным кругом (табл. 3.22) введение вставных секторов с использованием металлизации алмазов (М) практически не снижает относительный расход алмазов, хотя и наблюдается определенная тенденция на снижение, однако растет эффективная мощность шлифования и шероховатость обработанной поверхности. Введение секторов со стеклопокрытием (С) позволяет значительно снизить мощность шлифования, однако относительный расход алмазов и шероховатость поверхности существенно возрастают (табл. 3.22).

Влияние зернистости алмазных зерен. Установлено, что изменение зернистости алмазов во вставных секторах существенно влияет на показатели работоспособности и введение вставок с большими зернистостями достаточно существенно снижает эффективную мощность шлифования, несколько снижает расход алмазов, однако растет шероховатость обработанной поверхности (табл. 3.22). Вместе с тем, анализ данных табл. 3.22

показывает, что именно снижение зернистости во вставных секторах является наиболее приемлемым для повышения износостойкости кругов, и, при этом, снижается как мощность шлифования, так шероховатость обрабатываемой поверхности.

Таблица 3.22. Показатели работоспособности кругов с чередующимся режущим слоем при шлифовании твердого сплава Т15К6 (влияние покрытия зерен и зернистости алмазов)

Характеристика круга 12А2-45° 150×10×3×32	Показатели шлифования		
	Относительный расход алмазов, мг/г	Эффективная мощность шлифования, кВт	Шероховатость поверхности, Ra, мкм
Стандартный круг со сплошным рабочим слоем			
АС6 125/100–МО20-2–100	1,42	0,95	0,25
Круги с чередующимся режущим слоем			
Основной рабочий слой – АС6 125/100–МО20-2–100			
Влияние покрытия зерен			
Вставные сектора:			
АС6С 125/100–МО20-2–100	4,34	0,55	0,35
АС6М 125/100–МО20-2–100	1,12	1,05	0,35
АС6 125/100–МО20-2–100	1,35	1,00	0,26
Влияние зернистости алмазов			
Вставные сектора:			
АС6 200/160–МО20-2–100	1,03	0,55	0,37
АС6 160/125–МО20-2–100	1,18	0,70	0,32
АС6 125/100–МО20-2–100	1,35	1,00	0,26
АС6 80/63–МО20-2–100	0,62	0,85	0,25
АС6 63/50–МО20-2–100	0,54	0,70	0,19

Влияние относительной концентрации алмазов в рабочем слое круга. Установлено, что изменение во вставных секторах концентрации с 50 до 150 % в определенной степени влияет на показатели работоспособности кругов. При этом, установлено, что по показателю относительного расхода алмазов лучшим является использование вставок с концентрацией алмазов в 50 %. Характерно, что в обоих случаях, как 50 % так и 150 % возрастает шероховатость поверхности. Это свидетельствует о том, что режущая способность кругов повышается, на что указывает также и некоторое снижение в сравнении с концентрацией в 100 % эффективной мощности (табл. 3.23).

Влияние прочности зерен. Установлено, что изменение во вставных секторах прочности зерен алмазов от АС4 до АС20 влияет на показатели работоспособности кругов на металлической связке МО20-2. При этом, использование высокопрочных зерен ухудшает все показатели работоспо-

способности. В связи с этим, лучше использовать во вставных секторах зерна алмазов невысокой прочности – АС4 (табл. 3.23).

Таблица 3.23. Показатели работоспособности кругов с чередующимся режущим слоем при шлифовании твердого сплава Т15К6 (влияние прочности алмазных зерен и относительной концентрации алмазов в рабочем слое)

Характеристика круга 12А2-45° 150×10×3×32	Показатели шлифования		
	Относительный расход алмазов, мг/г	Эффективная мощность шлифования, кВт	Шероховатость поверхности, Ra, мкм
Стандартный круг со сплошным рабочим слоем			
АС6 125/100–МО20-2–100	1,42	0,95	0,25
Круги с чередующимся режущим слоем			
Основной рабочий слой – АС6 125/100–МО20-2–100			
Влияние концентрации алмазов			
Характеристика вставных секторов:			
АС6 125/100–МО20-2–150	1,74	0,75	0,30
АС6 125/100–МО20-2–100	1,35	1,00	0,26
АС6 125/100–МО20-2– 50	0,75	0,90	0,29
Влияние прочности алмазов			
Характеристика вставных секторов:			
АС4 125/100–МО20-2–100	0,92	0,78	0,29
АС6 125/100–МО20-2–100	1,35	1,00	0,26
АС20 125/100–МО20-2–100	1,59	0,95	0,36

В целом, проведенные исследования подтвердили допущения, изложенные выше, о том, что, для достижения условий активации режущей поверхности и повышения износостойкости круга, лучшими являются те характеристики вставных секторов, которые бы обеспечивали меньшие показатели коэффициента абразивного резания при шлифовании, чем характеристики основного рабочего слоя, а именно, сниженные зернистость – 63/50 или 80/63 (табл. 3.22) или концентрация алмазов в рабочем слое – 50 % (табл. 3.23). В основном рабочем слое – зернистость 125/100 и концентрация 100 %. При этом, повышается износостойкость специальных кругов до 2,5 раз, в сравнении со стандартными, которые имели характеристику, соответствующую основному рабочему слою и следующие эксплуатационные показатели ($q_p = 1,42$ мг/г, $N_{эф} = 0,95$ кВт, $Ra = 0,25$ мкм). Кроме того, снижается эффективная мощность при шлифовании в 1,5 раза, что свидетельствует об улучшении режущей способности специальных кругов.

Обратим внимание что и небольшое снижение прочности алмазов во вставных секторах на АС4 (АС6 – в основном слое) тоже дало ожидаемый

положительный эффект. Укажем, что во всех изложенных выше случаях эксперименты производились с одинаковым содержанием связующего (МО20-2), как в основном рабочем слое, так и во вставных секторах. Между тем, интересно исследовать влияние другого состава связки во вставных секторах на показатели работоспособности кругов с чередующимся режущим слоем. При этом были выбраны три варианта с изменением твердости вставных секторов от 54 *HRB* до 96 *HRB*. Установлено (табл. 3.24), что введение ощутимо «мягких» секторов не повышает износостойкость кругов. Вместе с тем, фактически вдвое снижается эффективная мощность, что свидетельствует о повышении режущей способности. Опосредованно мы это можем наблюдать и по повышению шероховатости. Из анализа табл. 3.24 мы можем также сделать вывод, что использование во вставных секторах связки М1-10 повышает режущую способность, однако выигрыш в износостойкости при этом невелик, хотя и наблюдается тенденция к ее повышению. Вероятно, тут играет роль основа связующего. Напрашивается, что желательно было бы иметь одну основу связки, а вот твердость разную и большую на основных секторах, чтобы обеспечить возобновление режущей способности.

Таблица 3.24. Показатели работоспособности кругов с чередующимся режущим слоем при шлифовании твердого сплава Т15К6 (влияние связующего, основной рабочий слой – АС6 125/100–МО20-2–100)

Характеристика круга 12А2-45° 150×10×3×32	Показатели шлифования		
	Относительный расход алмазов, мг/г	Эффективная мощность шлифования кВт	Шероховатость поверхности, <i>Ra</i> , мкм
Стандартный круг со сплошным рабочим слоем			
АС6 125/100–МО20-2–100	1,42	0,95	0,25
Круги с чередующимся режущим слоем			
Характеристика вставных секторов:			
АС6 125/100–МО20-2–100 (<i>HRB</i> 96)	1,35	1,00	0,26
АС6 125/100–М1-10–100 (<i>HRB</i> 89)	1,09	0,65	0,44
АС6 125/100–В1-13–50 (<i>HRB</i> 54)	1,55	0,42	0,36

Для обеспечения разной твердости возможно использовать описанный нами выше эффект срабатывания накопленной деформации. Однако, он срабатывает только в том случае, когда есть каркас и относительно легкоплавкая составляющая. В этом случае подвижная фаза выдавливается, во-первых, у пористое пространство, заполняя его, что приводит к повышению твердости композита, а во-вторых, в поверхностные слои, что наблюдается по повышению количества олова в поверхностной зоне кру-

гов. Для срабатывания этого механизма, необходимо наличие пластичной подвижной фазы, а сделать это возможно за счет термообработки. Поскольку реально связка состоит не из олова и меди, а из их определенных фаз, то, как только температура термообработки превысит половину величины температуры плавления главной фазы, начинает срабатывать механизм термоупругости и пластичная фаза вытесняется в незанятые объемы или на поверхность. Известно [141], что одним из основных составляющих в структуре связки есть δ -фаза, имеющая температуру плавления от 360 до 410 °С [90], то возможно ожидать уже со 180 °С проявления эффекта повышения твердости рабочего слоя.

Для проверки этой гипотезы нами были изготовлены круги формы 12A2-45° 150×10×3×32 двух характеристик: АС6 125/100–МО20-2–100 и АС6 160/125–МО20-2–100, которые были термообработаны при различных температурах 180 °С, 540 °С и 600 °С и далее были исследованы их эксплуатационные показатели при шлифовании (900 мм³/мин) твердого сплава ТТ20К9 (рис. 3.34). Установлено, что именно с указанной выше температуры термообработки в 180 °С мы и наблюдаем снижение износа кругов. При этом, для температуры в 180 °С наблюдается и значительное возрастание твердости рабочего слоя кругов – от 92–96 HRB до 102–110 HRB и почти вдвое снижается износ круга.

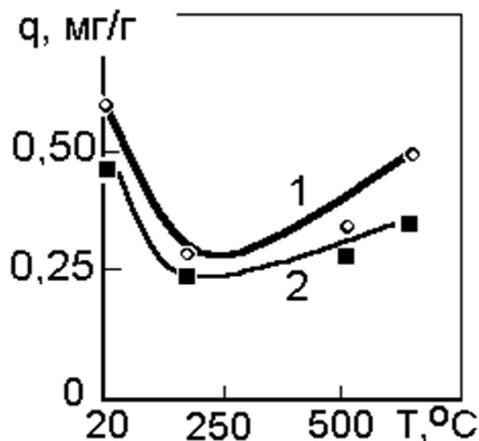


Рис. 3.34. Влияние термообработки кругов формы 12A2-45° 150×10×3×32 с характеристикой рабочего слоя АС6 125/100–МО20-2–100 (1) и АС6 160/125–МО20-2–100 (2) на их износостойкость при шлифовании твердого сплава ТТ20К9 (значения в показателях относительного расхода алмазов – мг/г)

ется повышение износа круга и наблюдается эффект так называемого «выпотевания» олова на поверхности круга, что не способствует повышению износостойкости круга. Тем самым, за счет предварительной термообработки основного рабочего слоя секторного круга мы можем повысить его твердость и, соответственно – износостойкость.

Изложенное позволяет реализовать нашу гипотезу о возможности активации режущей поверхности круга изменением твердости секторов, но не за счет снижения твердости вставных секторов, а наоборот, за счет повышения твердости основных секторов. В секторных кругах это может быть реализовано технологическими особенностями изготовления таких кругов, поскольку первым подвергается тепловому воздействию основной рабочий слой и при, последующем спекании вставок, он подвергается дополни-

тельному воздействию (термообработке), а потому твердость основного рабочего слоя в разработанных специальных секторных кругах всегда будет более высокой, чем у вставных секторов, что является дополнительным фактором обеспечения необходимого нам эффекта активации режущей поверхности круга. Как следствие, наряду с указанными выше характеристиками вставных секторов (табл. 3.22 и 3.23), хорошими также являются показатели, когда характеристика секторов и основного рабочего слоя совпадает, или мало отличается (металлопокрытие зерен) (табл. 3.25).

Таблица 3.25. Эксплуатационные показатели кругов с чередующимся режущим слоем

Характеристика круга 12А2-45° 150×10×3×32	Показатели шлифования		
	Относительный расход алмазов, мг/г	Эффективная мощность шлифования кВт	Шероховатость поверхности, Ra, мкм
Стандартный круг АС6 125/100–МО20-2–100 (HRB 92–95)	1,42	0,95	0,25
Специальные круги с основным рабочим слоем АС6 125/100–МО20-2–100 % (HRB 102–108) и вставными секторами:			
АС6 125/100–МО20-2–100 (HRB 92–96)	0,45	0,85	0,24
АС6М 125/100–МО20-2–100 (HRB 94–96)	0,76	0,62	0,25
АС4 125/100–МО20-2–100 (HRB 91–95)	0,62	0,87	0,30
АС6 63/50–МО20-2–100 (HRB 92–94)	0,46	0,40	0,19
АС6 125/100–МО20-2–50 (HRB 91–94)	0,55	0,90	0,29

В целом, суммарный эффект (применение сниженной зернистости вставок – 63/50) и повышение твердости основного слоя позволяет в сравнении со стандартными почти в 3 раза повысить износостойкость кругов и более чем в 2 раза снизить эффективную мощность шлифования, что свидетельствует об улучшении режущей способности специальных кругов (табл. 3.25).

Представленный выше эффект является также интересным с точки зрения получения хорошего соединения слоев в многослойных шлифовальных инструментах, поскольку переходная зона между слоями является наиболее проблемной для качественного рабочего слоя. Нами изучены технологические условия формирования слоистого рабочего слоя при сочетании разных связующих трех вариантов – сочетания металлических связующих, металлических и полимерных связующих, полимерных с полимерными связующими. Установлено, что при использовании сочетаний металлических связующих необходимым является одновременное брике-

тирование слоев с последующим спеканием. При этом, вначале спекается основной слой. Для сочетания металлическая связка–полимерная связка необходимым является спекание металлического слоя с последующим спеканием полимерного связующего. Наиболее сложным является сочетание двух полимерных связующих, поскольку необходимо последовательное спекание обоих слоев. Установлено, что при этом следует использовать один слой из металлополимерного связующего, а другой слой из полимерного.

Укажем, что для металлических связок имеется определенное технологическое отличие при изготовлении кругов с чередующимся рабочим слоем. Вначале формируется основной рабочий слой, а далее вставные сектора, и поэтому те слои, которые брикетируются первыми, подвергаются дополнительному термическому воздействию, что влияет как на формирование определенной структуры их рабочего слоя, так и на их эксплуатационные показатели. Проведенными исследованиями установлено, что переходная зона между чередующимися слоями (рис. 3.35), со стороны того слоя, который был спечен первым и подвергался дополнительному термическому воздействию, является более насыщенной оловом (возрастает с 15,7 до 22,4 мас. %, табл. 3.26), что является позитивным и улучшает соединение слоев.

Таким образом, изложенные выше исследования показывают, что именно изложенный нами в подглаве 2.3 эффект изменения градиента пластичной фазы позволяет объяснить то несоответствие, на которое мы уже указывали выше, когда у секторных кругов лучшими являются показатели, когда характеристика секторов и основного рабочего слоя совпадают или мало разнятся. Объясняется это тем, что именно благодаря такому эффекту у основного слоя твердость при одинаковых характеристиках является большей, чем у вставных секторов, а поэтому такой перепад твердостей и обеспечивает при данных условиях активацию режущей поверхности кругов и отсутствие потери износостойкости основного режущего слоя. Следовательно, для реализации идеи об одновременном обеспечении как износостойкости кругов из СТМ, так и активации их режущей поверхности, рабочий слой круга необходимо сделать многослойным в круговом направлении и, при этом, основной слой должен отвечать за износостойкость, а вставные сектора за активацию режущей поверхности круга и поддержание его высокой режущей способности. Поэтому, нами дополнительно были изучены особенности работы вставок у таких секторных кругах.

Таблица 3.26. Содержание элементов на поверхности секторов в переходной зоне их соединения

Элементы	Состав элементов, мас. %, в переходной зоне со стороны:	
	основного слоя	вставного сектора
Cu	66,9	68,2
Sn	22,4	15,7
Sb	9,3	11,3
Al	0,5	2,7
Si	0,95	2,0

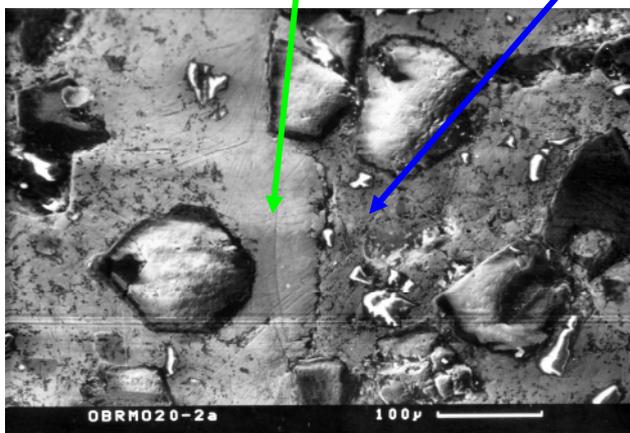


Рис. 3.35. Фотография переходной зоны между чередующимися слоями (характеристика круга – основной рабочий слой АС6 125/100–МО20-2–100 (HRB 102–108) и вставной сектор: АС6 125/100–МО20-2–100 (HRB 92–96))

Для изучения особенностей износа вставок были изготовлены специальные алмазные круги 12А2-45° 100×10×3×32 с чередующимся режущим слоем, которые возможно было поместить после процесса обработки в камеру рентгеновского микроскопа-микроанализатора «CamScan-4DV» и проводить анализ рабочей поверхности. Это позволяло ощутимо увидеть изменения в элементном составе вставок. Укажем, что в процессе обработки на вставные сектора ложится наибольшая нагрузка при шлифовании, поэтому основным рабочим слоем в этом случае был принят слой на металлополимерной связке В1-13 (АС6 125/100–В1-13–100), а вставные сектора изготавливали на металлической связке МО20-2 (АС6 125/100–МО20-2–100). Как следствие, это позволило в процессе обработки установить, что режущая поверхность вставок в окружном направлении имеет неравномерный волнообразный элементный состав. Так, та часть сегмента, которая первой входит в контактную зону содержит большее количество Cu и Sn, и меньшее количество наполнителя (Al), который «вымывается» шламом. В свою очередь, элементы обрабатываемого материала в большей степени накапливаются ближе к конечной части сегмента. Особенно ощутимо это наблюдается при шлифовании нержавеющей стали, когда общее содержание элементов стали (Fe, Ni, Mn) волнообразно возрастает от начала к концу сегмента (10,7→11,4 →20,4→17,3 масс. %), а при шлифовании на поверхности стандартного несекторного круга фиксируется однородное содержание элементов шлама в 12,4 масс. %. Это показывает, что на каждой вставке начинают формироваться свои волновые

Для изучения особенностей износа вставок были изготовлены специальные алмазные круги 12А2-45° 100×10×3×32 с чередующимся режущим слоем, которые возможно было поместить после процесса обработки в камеру рентгеновского микроскопа-микроанализатора «CamScan-4DV» и проводить анализ рабочей поверхности. Это позволяло ощутимо увидеть изменения в элементном составе вставок. Укажем, что в процессе обработки на вставные сектора ложится наибольшая нагрузка при шлифовании, поэтому основным рабочим слоем в этом случае был

процессы, которые являются реакцией вставных секторов на их нагружение. Это означает, что наряду с описанным нами выше волновым формоизменением всей поверхности круга в действие вступает дополнительное секторное формоизменение, что является дополнительным фактором активации режущей поверхности круга.

Выше нами был рассмотрен вариант кругов с чередующимся слоем, когда направленно изменялись характеристики рабочего слоя. Вместе с тем, как было уже сказано выше, возможно направленно изменять также и свойства рабочего слоя кругов: твердость, электропроводность, прочность и т.п. В данном случае, мы обратим внимание на использование эффекта чередования вставок режущего слоя с разными существенно различающимися электрофизическими свойствами для процессов шлифования с введением дополнительной электрической энергии в зону обработки. Электрофизические характеристики композитов в наибольшей степени зависят от связующего. В табл. 3.27 приведены полученные нами данные по удельному электросопротивлению композитов на разных связках. Полимерные связующие фактически не имеют проводимости, а вот введение в их структуру металлического наполнителя уже существенно повышает их проводимость, до такой степени, что они вполне достигают проводимости металлических связок (см. композит В1-02 в табл. 3.27), а это дает возможность их использования в процессах электрошлифования.

Таблица 3.27. Удельное электросопротивление связок для кругов из СТМ

Основа связки	Марка	Удельное электросопротивление, $\cdot 10^{-6}$ Ом·м
Металлическая	М1-04	0,050 – 0,058
	М2-01	0,038 – 0,042
	М2-09	0,105 – 0,114
	М2-12Э	0,110 – 0,120
Металлополимерная	В1-02	0,040 – 0,055
	В1-10	0,420 – 0,480
Полимерная	В2-01	$1,8 \cdot 10^{11}$ Ом·м

Укажем, что на проводимость композитов также существенно влияет относительная концентрация зерен в рабочем слое. Кроме того, характерным является отличие механизмов проводимости в композитах с металлической связкой, где установлено, что электросопротивление монотонно растет с повышением концентрации по зависимости [71]: $\rho_{KM} = (0,097 + 0,350 \cdot K/25) \cdot 10^{-6}$, и в композитах с металлополимерной связкой, где электросопротивление значительно возрастает после концентрации в 100 %. Приведенное выше говорит о том, что в процессах шлифования с введением электрической энергии в зону обработки кругами на металлополимерных связках нежелательно использовать в их характеристике кон-

центрацию алмазов более 100 %. Обратим внимание, что металлизация (МА, Н1-25) алмазных зерен повышает проводимость композитов, а стеклопокрытие – снижает. Это характерно, как для металлических, так и металлополимерных связок. Вместе с тем, интересным является то, что использование металлопокрытия алмазов (МА) позволяет достичь существенного повышения электропроводности неэлектропроводных полимерных связок, например, см. связку В1-11П (табл. 3.28).

Таблица 3.28. Электросопротивление кругов из СТМ с характеристикой 12А2-45° 150×10×3×42×32 – АС4 (АС6, КР) 100/80–100 на разных связках

Связка	Твердость рабочего слоя, <i>HRB</i>	Электросопротивление кругов, мОм, с рабочим слоем	
		без СТМ	с СТМ
М2-01	80 – 93	1,9 – 2,3	2,2 – 2,6
М1-10	86 – 98	2,5 – 2,9	2,6 – 3,0
М2-12Э	90 – 102	2,4 – 2,8	3,1 – 3,7
МО20-2	100 – 110	2,6 – 3,2	3,5 – 4,3
В1-03	40 – 48	4,0 – 6,0	7,0 – 11,0
ВС-Э	52 – 60	6,0 – 8,0	8,0 – 12,0
В1-13	51 – 57	8,0 – 12,0	14,0 – 22,0
В1-10	36 – 50	18,0 – 22,0	121,0 – 137,0
В1-11П*	60 – 64	–	56,0 – 94,0
В2-01*	62 – 74	–	676,0 – 750,0

* *Примечание.* Рабочий слой с покрытием алмазов – МА.

При электрошлифовании, за счет чередования слоев с различным электросопротивлением, это дает возможность наложить на процесс с постоянным током еще и импульсные его колебания. Для достижения такого эффекта колебания тока необходимо рассчитать минимальное количество участков со сниженным электросопротивлением. Суммарную длину такого участка нужно рассчитать с учетом времени стабилизации тока после перепада электросопротивления участка (τ_B), частоты вращения круга (n) и его внешнего диаметра (D): $l_i = \pi D n \tau_B / k$, где $\tau_B = 4,2 \cdot 10^{-3}$ с (для наших условий [71]); k – максимальное количество таких участков:

$$k = (120 - n \tau_B) / (3n \tau_B).$$

Для условий шлифования, когда возникают избыточные электроконтактные разряды, вызванные стружкой в зоне обработки, резко увеличивающие износ кругов, есть необходимость в корректировке электрического тока в зоне обработки. Рассмотрим определение геометрических размеров секторов для круга типоразмера 12А2-45° 150×10×3×32 в условиях, когда скорость вращения круга равна 20 м/с (2800 об/мин). Определено, что рас-

четное количество участков равно 3,068. Принято – 3. Общая угловая протяженность участков составила для принятых условий – 64°. Согласно технологических условий изготовления таких кругов, принято, что общая угловая протяженность составит 60° и три сектора разделяются между собой как 30°, 20° та 10°. С учетом этого были изготовлены секторные шлифовальные круги из кубического нитрида бора. С помощью таких кругов описанными выше приемами мы можем изменять электропроводность системы и получать гарантированный эффект повышения износостойкости кругов при электрошлифовании инструментальных сталей. Например, при одинаковой со стандартными кругами мощности шлифования (1,35 кВт), круги из кубонита формы 12А2-45° 150×10×3×32 с чередующимися слоями (при трех вставных неравномерных секторах) позволяют повысить производительность шлифования образцов из стали Р6М5Ф3 с 1200 до 1800 мм³/мин. При этом, технологический ток снизился со 240 А на стандартных кругах до 210 А на секторных. Укажем, что использование эффекта чередования слоев с разной проводимостью (электросопротивление круга на основной части связки МО20-2 – 3,8–4,2 мОм, а на вставках В1-13 – 16–20 мОм) позволяет снизить общий ток, например, в случае одинаковой производительности шлифования 1200 мм³/мин технологический ток снизился с 240 А (на стандартных кругах) до 180 А (на секторных). Как следствие, это позволяет уменьшить эффективную мощность шлифования с 1,35 кВт до 0,95 кВт и снизить относительный расход кубонита с 2,7 до 2,1 мг/г (табл. 3.29). В целом, использование кругов с чередующимся режущим слоем разных электрофизических характеристик позволяет получить своеобразный процесс импульсно-циклического шлифования и достичь, в сравнении с традиционными кругами, снижения расхода КНБ в 1,3 раза при одинаковой с серийными кругами производительности шлифования.

Таблица 3.29. Показатели работоспособности кругов с чередующимися секторами при электрошлифовании стали Р6М5Ф3

Характеристика рабочего слоя круга	Электро-сопротивление круга, мОм	Технологический ток, А	Эффективная мощность шлифования, кВт	Относительный расход КНБ, мг/г	Шероховатость поверхности, Ra, мкм
КР 100/80–МО20-2–100	4	240	1,35	2,7	0,38
КР 100/80–100 МО20-2 + В1-13 (чередующиеся сектора)	4/18	180	0,95	2,1	0,38

Дополнительно укажем, что возможность направленного изменения электрофизических характеристик рабочей поверхности именно на одном круге дает возможность по другому подойти и к выбору для процессов

шлифования такими кругами технологических жидкостей, через нетрадиционный способ создания неявной поляризации при алмазном шлифовании. Дело в том, что режущая поверхность круга становится направленно гетерогенной по своему составу, что в условиях использования разных составов смазочно-охлаждающих жидкостей может привести к возникновению электрохимической поляризации, образования пленок на поверхности круга, изменения контактных процессов при этом. Это может быть эффективно реализовано для кругов на связках, которые имеют медную матрицу и металлы, или неметаллы, в виде включений, отличающиеся по своим физико-химическим свойствам от металлической матрицы, и приводят к появлению коррозионных микроэлементов и усилению электрохимической гетерогенности поверхности связки.

На специальные секторные круги с чередующимся режущим слоем разработана техническая документация и изготовлена оснастка для их изготовления. Круги изготавливаются и выпускаются Институтом сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля Национальной Академии наук Украины (рис. 3.36).

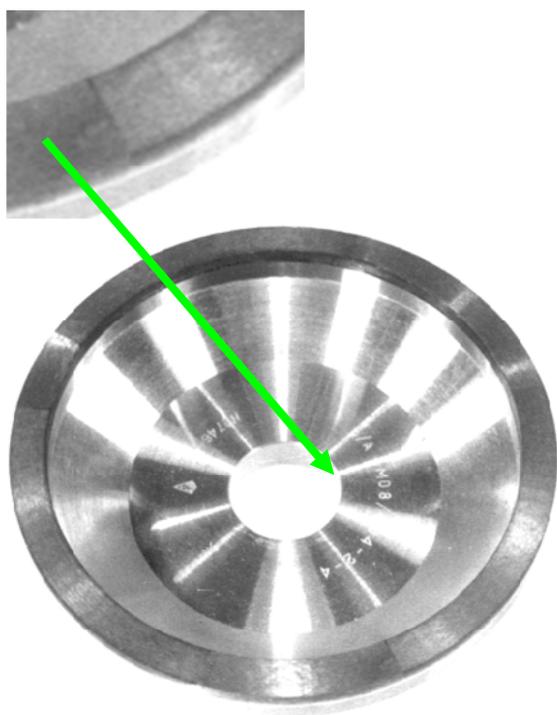


Рис. 3.36. Пример секторного круга, спеченного с учетом эффекта изменения градиента подвижной фазы для лучшего соединения слоев (вставка) в круговом направлении

Рекомендации по выбору характеристик специальных кругов с чередующимся слоем в окружном направлении и технологических смазочно-охлаждающих жидкостей для шлифования различных инструментальных материалов приведены ниже в табл. 3.30).

Рассмотрим теперь особенности разработки кругов специальных конструкций кругов, учитывающих формоизменение рабочей поверхности в радиальном направлении. Укажем, что для таких кругов наряду с решением вопроса снижения износа кругов, важным является урегулирование вопроса ухудшения шероховатости при повышении производительности обработки. Аналогично износу, с исчезновением кругового пояса на поверхности круга шероховатость обрабатываемой поверхности значительно ухуд-

шается. Для того, чтобы этого избежать разработан ряд конструкций кругов, защищенных А.с. СССР № 1006197, 1006198, 1168398, которые позво-

ляют стабилизировать профиль круга в радиальном направлении за счет достижения соотношения нагрузки на режущую поверхность круга, с приходящейся на нее площадь. Важным элементом профиля при этом является наличие переходного кругового пояса, ответственным за формирование невысокой шероховатости обработанной поверхности.

Таблица 3.30. Рекомендации по выбору характеристик специальных шлифовальных секторных кругов

Характеристика рабочего слоя круга				Технологическая жидкость
Марка СТМ	Зернистость	Связка	Концентрация, %	
Шлифование твердосплавного инструмента				
Основной рабочий слой				Натрий азотнокислый (1,0 масс. %) и азотистокислый (0,2 масс. %), аммоний сернокислый (0,1 масс. %), остаток – вода.
АС6	125/100	МО20-2	100	
Вставные сектора				
АС6	63/50	МО20-2	100	
АС6	125/100	МО20-2	50	
АС4	125/100	МО20-2	100	
АС6	125/100	М1-10	100	
Шлифование инструментальной керамики				
Основной рабочий слой				Натрий азотистокислый (0,2 масс. %), аммоний сернокислый (0,1 масс. %) и активированная анодная вода (99,7 масс. %).
АС6	125/100	В1-13	100	
Вставные сектора				
АС6	63/50	В1-13	100	
АС6	125/100	В1-13	50	
Шлифование инструмента из быстрорежущей стали				
Основной рабочий слой				Натрий азотнокислый (2,0 масс. %) и азотистокислый (0,2 масс. %), гидроксид алюминия (0,2 масс. %), остаток – вода.
КР (КВ)	125/100	В2-08	100	
Вставные сектора				
КР (КВ)	63/50	В2-08	100	
КР (КВ)	125/100	В2-08	50	
Основной рабочий слой				
КР (КВ)	125/100	ПК	100	
Вставные сектора				
КР (КВ)	63/50	ПК	100	
Электрошлифование изделий из нержавеющей стали				
Основной рабочий слой				Натрий азотнокислый (2,0 мас.%) и азотистокислый (0,2 мас.%), гидроксид алюминия (0,2 мас.%), остаток – вода.
АС6	125/100	МО20-2	100	
Вставные сектора				
АС6	125/100	М1-10	100	

Поскольку причина ухудшения шероховатости состоит в том, что поверхность обрабатывается минимальным количеством абразивных зерен,

находящихся на вершине треугольного профиля, то для получения необходимой шероховатости необходимо обеспечить наличие на рабочей поверхности кругового пояска с шириной $f \geq f_{\text{пр}}$ [117]. Таким образом, возникает необходимость создания кругов для шлифования с продольной подачей с фиксированным трапецеидальным профилем. При разработке таких кругов необходимо учитывать, что основным условием стабилизации профиля является обеспечение равенства линейных скоростей износов ГРК, ДРК и ПКП круга. Для реализации этого предположения, необходимо правильно определить расположение точек B и C (рис. 3.18) на профиле режущей поверхности круга и каким-то образом заполнить промежуток между ними так, чтобы сохранились основные свойства воображаемого отрезка BC : равенство линейного износа с образующими AB и CD и формирование с его помощью необходимой шероховатости поверхности.

Для определения рационального расположения точек B и C принимаем допущение, что площадь режущей поверхности круга и высота его профиля пропорциональна снимаемому припуску или $S_{\text{ГРК}} = k_V' \cdot S_K$, $S_{\text{ДРК}} = k_V'' \cdot S_K$, а $t' = k_V' \cdot S_n$, $t'' = k_V'' \cdot S_n$.

Используя формулу (3.5), запишем соотношение

$$\frac{S_{\text{ГРК}}}{S_{\text{ДРК}}} = \frac{\pi t^1 (D - t^1 / \text{tg } \varphi) / \sin \varphi}{\pi t^{11} (D_2 - t^{11} / \text{tg } \varphi_1) / \sin \varphi_1} = \frac{k_V^1}{k_V^{11}}.$$

После преобразований запишем соотношение в окончательном виде :

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi} = \frac{D - k_V^1 S_n / \text{tg } \varphi}{D - 2B + k_V^{11} S_n / \text{tg } \varphi_1}. \quad (3.6)$$

Поскольку в данном соотношении имеются две неизвестных величины φ и φ_1 , то запишем дополнительное уравнение (рис. 3.37)

$$k_V^1 S_n \text{tg } \varphi + k_V^{11} S_n \text{tg } \varphi_1 = B - f. \quad (3.7)$$

Таким образом, для определения месторасположения точек B и C на профиле режущей поверхности круга необходимо решить систему уравнений (3.6) и (3.7) относительно φ и φ_1 . Для условий глубинного шлифования коэффициенты равны:

$$k_V' = 0,90 \dots 0,95, \quad k_V'' = 0,08 \dots 0,10 \quad [117].$$

Рассмотрим теперь вопрос заполнения канавок для формирования необходимой шероховатости поверхности. Известно [209], что ПКП принимает участие в съеме 2 % припуска. Напомним, что в обычном круге во время его работы поясок не сохраняется, поскольку наблюдается несоответствие между объемом припуска и площадью режущей поверхности кругового пояска. Это приводит к тому, что линейный износ пояска отстает от линейных износов главного и дополнительного режущих конусов. Чтобы

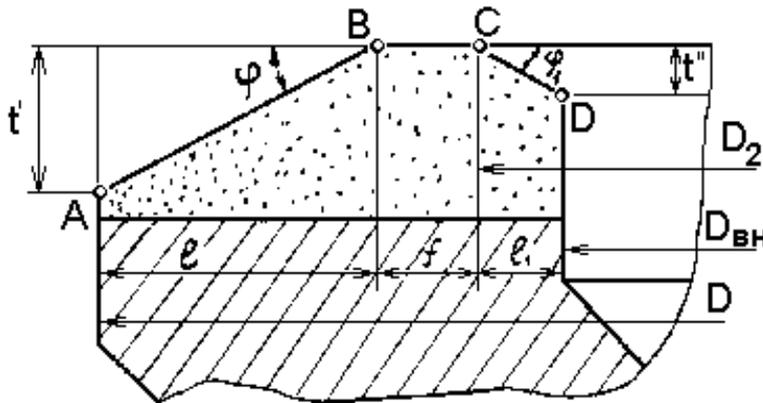


Рис. 3.37. Схема для расчета расположения точек на профиле режущей поверхности специального круга для глубинного шлифования

формирование прерывистого ПКП, общая площадь которого не превышала бы площадь, необходимую для съема 2 % припуска. У данной конструкции круга для глубинного шлифования (рис. 3.38) новым является наличие в его рабочем слое нескольких канавок, выполненных по дуге окружности на ПКП таким образом, что слой находящийся между канавками по окружности, в процессе шлифования остается эквидистантным обрабатываемой поверхности и обеспечивает необходимое ее качество. Укажем также еще на одну особенность, которая состоит в том, что шлифование изделия осуществляется рабочим слоем круга с прерывистой рабочей поверхностью. Это позволяет, кроме упомянутого выше, снизить уровень температур непосредственно в зоне окончательной обработки поверхности. Такой круг защищен А.с. СССР № 1006197, а оборудование для



Рис. 3.38. Конструкция режущего слоя круга с канавками на ПКП

избежать этого, необходимо сравнивать скорости износа, для чего необходимо привести в соответствие величины съема припуска и площади режущей поверхности круга, ответственной за съем этого припуска. Два таких варианта предложены ниже.

Одним из вариантов достижения такого соответствия является

изготовление такого круга защищено А.с. СССР № 1400901.

Другим вариантом заполнения канавки на ПКП является выполнение ее из материала связки. Рабочей гипотезой, положенной в основу такой конструкции, является гипотеза, согласно которой, благодаря равномерному износу, рабочая поверхность пояска остается параллельной обрабатываемой поверхности и, тем самым, обеспечивает необходимую ее шероховатость, вследствие анодного растворения вершин микронеровностей. Обратим внимание на то, что как раз этот вариант является

идеальным случаем возможной реализации всех преимуществ чисто анодного электрохимического растворения. В целом разработаны 2 конструкции кругов 12A2-45° 150×10(5-3-2)×3 и 150×20(10-6-4)×3 (рис. 3.39) с ПКП из материала связки, которые защищены Свидетельством на промышленный образец № 36424.



Рис. 3.39. Конструкция режущего слоя круга со связкой на ПКП

Поскольку выше мы уже коснулись вопроса снижения температур при прерывистом резании, то необходимо указать, что для условий высокопроизводительного группового шлифования достаточно больших площадей пластин из термочувствительных инструментальных материалов, которые содержат в структуре карбиды металлов IVb–Vb подгрупп, дополнительно возникает необходимость

снижения температуры шлифования и улучшения условий доставки охлаждающей технологической жидкости в зону обработки. В этом случае основная часть припуска снимается при прямом ходе стола. Температура, возникающая при обратном ходе в 1,5–2,0 раза ниже и не оказывает существенного влияния на физико-механическое состояние поверхностного слоя. Поэтому, прерывистый слой целесообразно сместить на часть ГРК, оставив сплошной рабочий слой только на самом входе в ГРК, что обеспечивает в данном случае безударную работу в момент касания круга с изделием вначале работы. Наличие прерывистых впадин содействует снижению температуры на рабочем ходу. Для удержания трапецеидального профиля режущей поверхности на ней выполнена круговая канавка, играющая роль ПКП (рис. 3.40). Но для условий такого высокопроизводительного шлифования большее значение имеет не шероховатость, а снижение температуры. Поскольку продольная подача на 3–4 порядка меньше скорости вращения круга, то время охлаждения при прохождении круговой канавки также будет на 3–4 порядка выше, чем при прохождении впадины. Поэтому, в данной конструкции круга канавка ничем не заполняется и остается свободной для лучшего прохождения МОТС. Характеристики рабочего слоя и режимы шлифования такого круга соответствуют значениям для прерывистых кругов с квазипостоянной площадью контакта (рис. 3.41), что позволяет значительно уменьшить колебания площади контакта в процессе глубинного



Рис. 3.40. Конструкция режущего слоя круга с прерывистым ГРК и круговой канавкой на ПКП

ния и эксплуатации прерывистых кругов из СТМ указывает, что длину выступа по внешней окружности целесообразно выбирать в границах 10–25 мм [210]. Исходя из полученных соотношений размеров выступов и впадин и абсолютных размеров выступов выбраны следующие геометрические параметры прерывистого рабочего слоя указанных выше кругов формы 6А2 диаметром 250 мм (рис. 3.40): угловой шаг – 15° , угол выступа – 9° , угол впадины – $2^\circ 15'$. Укажем также, что использование прерывистых кругов принципиально не изменяет характер распределения полей температур и напряжений, однако существенно снижает их абсолютные значения и градиенты. Приведенные выше круги защищены А.с. СССР № 1168398 и Свидетельством на промышленный образец № 32370.

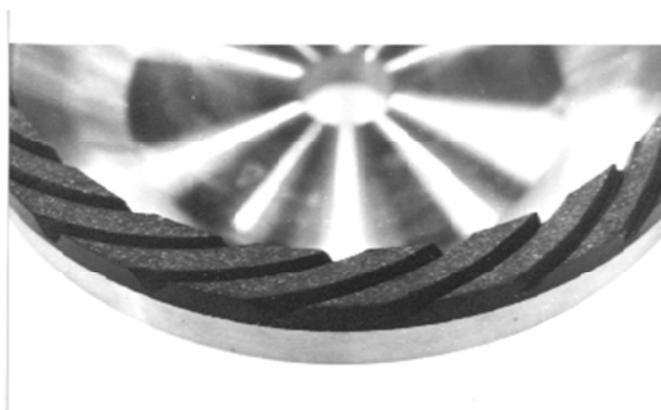


Рис. 3.41. Конструкция прерывистого режущего слоя круга с квазипостоянной площадью контакта [210]

шлифования. На основе уравнений постоянства площади контакта [210], получено уравнение, связывающее геометрические параметры такого круга $R_K/R_1 = \sin(\omega + \arcsin R_K/R_2)$, где R_1 и R_2 – радиусы наименьшей и наибольшей окружности участка рабочего слоя, контактирующего при прямом ходе с деталью; ω – шаг угла; R_K – радиус окружности, у которой имеются касательными прямые, ограничивающие выступы и, соответственно, впадины. Установлено [210], что для таких кругов отношение угла выступа к угловому шагу является оптимальным в диапазоне 0,80–0,85. Опыт изготовления

Приведенная выше конструкция круга применяется для шлифования сплошных поверхностей. А в случае обработки прерывистых поверхностей, например, зубчатых реек передних поверхностей червячных фрез, как показано в [210], необходимо ограничиться только внешней прерывистой частью режущей поверхности приведенных выше кругов, до сплошной круговой канавки. Исследованиями [210] установ-

лено, что исходя из распределения нагрузки на рабочий слой в зависимости от площади контакта зубьев и рейки фрезы наиболее благоприятное отношение площади выступов и впадин рабочего слоя круга достигается при:

$$\frac{F_{cn}}{F_3} = \frac{\pi b_{\max} (D - \frac{b_{\max}}{3})}{3F_3} = 0,5 \dots 0,8;$$

где F_{cn} – площадь сплошного слоя режущей поверхности круга, мм²; F_3 – общая площадь режущей поверхности круга, мм²; b_{\max} – максимальная ширина слоя на внешней конической поверхности корпуса, мм; D – внешний диаметр круга.



Рис. 3.42. Круг для заточки червячных фрез по задней поверхности со сплошной и прерывистой торцевой рабочей поверхностью по А.с. СССР № 1006197

С учетом этого, для повышения эффективности заточки фрез, разработаны специальные круги формы 12D9 (с рабочим слоем улучшенной формы в сравнении с кругами согласно ГОСТ 16178-82) с шириной рабочего слоя 12 и 16 мм (рис. 3.42). Исследования показали [210], что круги новой конструкции обеспечивают значительно меньший расход кубонита в 2,6...3,7 раза, чем стандартные круги. Кроме более равномерного износа, это также связано с отсутствием касания стального корпуса круга с фрезой при заточке и, в связи с этим, со снижением электроконтактных явлений при электрошлифовании.

Таким образом, приведенные выше условия достижения стабилизации формы профиля круга в радиальном направлении позволили разработать ряд конструкций шлифовальных кругов из СТМ, дающих возможность достичь не только необходимых показателей шероховатости обрабатываемой поверхности, а и снизить теплонапряженность процесса шлифования труднообрабатываемых инструментальных материалов за счет прерывистой режущей поверхности круга [210].

Важность учета соотношения нагрузки и площади режущей поверхности круга хорошо просматривается и при разработке специальных кругов для шлифования поверхностей многогранных пластин (рис. 3.43). Поиск путей решения вопроса обеспечения гарантированной износо-



Рис. 3.43. Конструкции специальных шлифовальных кругов для шлифования многогранных пластин

применительно к условиям шлифования многогранных пластин, которые преимущественно подвергаются обработке комбинированным упруго-врезным способом, формула расчета критической производительности требует определенной корректировки. В этом случае, условная длина работы алмазных зерен за все время съема припуска составляет:

$$L = \frac{(D - B)Bh_l b \cdot v_{KP}}{0,5625k_{CT}D \cdot ZQ}.$$

Тогда, уравнение критической производительности приобретает вид

$$Q = k_F k_H k_{пер} \frac{B(D - B)}{56,25k_{CT}D} \cdot \frac{H_P \cdot v_K}{Z \cdot H_M}. \quad (3.8)$$

Из уравнения (3.8) возможно решение обратной задачи, когда по известной производительности обработки, которая определяется необходимостью обеспечения сниженной теплонапряженности процесса обработки, можно установить минимально-необходимую ширину рабочего слоя круга, которая, в свою очередь, обеспечивает гарантированную износостойкость специальных кругов для шлифования поверхностей многогранных пластин:

$$B = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \frac{56,25Q \cdot Z \cdot H_M \cdot k_{CT} \cdot D}{k_F k_H k_{пер} H_P v_K}}. \quad (3.9)$$

Все круги, разработанные для шлифования пластин (рис. 3.43), условно поделены нами на группы в зависимости от геометрических параметров поверхности обрабатываемых пластин. Тем самым, выдерживается

стойкости специальных кругов для шлифования поверхностей многогранных пластин необходимо вести, по нашему мнению, на основе положения о критической производительности обработки, которое более детально будет изложено далее. Удержание производительности обработки в границах критической и будет гарантировать стабильный износ. Однако,

соотношение между обрабатываемой площадью и площадью режущей поверхности круга:

- 1 группа – узкокрюмочные круги для шлифования фасок пластин;
- 2 группа – круги с обычной шириной режущего слоя, дающие возможность шлифовать грани и радиусы многогранных пластин;
- 3 группа – круги с повышенной шириной режущего слоя, позволяющие шлифовать наибольшие по площади опорные поверхности пластин.

В целом, соотношение между шириной поверхностей обработки пластин по группам составляет 1:6:20 и аналогичное среднее соотношение ширин режущей поверхности кругов по группам составляет 2,5:15:45, т.е. 1:6:18. Это позволяет использовать однотипные решения по характеристикам режущего слоя. Рассмотрим далее особенности расчета геометрических характеристик кругов по каждой из представленных выше групп.

Группа 1 – специальные круги для шлифования фасок многогранных пластин. Поскольку эти круги работают в нестабильных условиях обработки поверхностей с переменной шириной, то важным является выявление влияния ширины фасок на твердосплавных пластинах на работоспособность кругов. При проведении экспериментов по выявлению особенностей шлифования узкокрюмочными кругами, поддерживалась одинаковая производительность обработки, равная 174 мм³/мин. Шлифование фасок пластин (твердый сплав ВК100М) проводилось кругом 12А2-45° 150×3,5×3×20–АС4 63/50МА–В1-11П–125:

Продольная подача, м/мин	Ширина фаски, мм	Эффективная мощность шлифования, кВт	Относительный расход алмазов, мг/г
1,2	0,29	0,25	8,35
0,6	0,58	0,35	1,65
0,4	0,87	0,30	1,80

Из приведенных выше данных можно сделать вывод, что снижение ширины фаски при одинаковой производительности шлифования приводит к значительному повышению относительного расхода алмазов. Это объясняется тем, что при одинаковой производительности шлифования со снижением величины фаски начинает расти давление в зоне шлифования и повышается нагрузка на алмазные зерна, что приводит к потере ними работоспособности. В случае, когда производительность не является постоянной а определяется шириной фаски, давление в зоне контакта растет пропорционально возрастанию ширины фаски. Поскольку ширина реальных фасок находится в границах 0,2...0,6 мм, то приведенное выше свидетельствует о том, что производительность их шлифования не должна быть большой. Установлено, что с повышением производительности шлифования кривая $q=f(Q)$ изменяется немонотонно и имеет перегиб в районе

70 мм³/мин (критическая производительность). При ее превышении износ кругов резко возрастает. Характерно, что при производительности более 140 мм³/мин начинает интенсивно разрушаться не только узкромочный алмазсодержащий слой, а и твердосплавная пластина (появляются трещины и сколы). Аналогично изменяется и шероховатость обрабатываемой поверхности. При производительности более 70 мм³/мин растет параметр R_{\max} и возникают сколы на кромках пластин. Это обозначает, что при шлифовании фасок твердосплавных пластин необходимо выдерживать производительность шлифования не более чем 70 мм³/мин ($0,1167 \cdot 10^{-8}$ м³/с). Из формулы (3.9) можно установить, что для таких условий ($v_k=20$ м/с) шлифования кругом формы 12A2-25° диаметром 150 мм, алмазами – АС4 63/50 ($Z = 50$ мкм, $H_p=2,8$ Н, $k_{ст}=0,75$), твердого сплава ТТ10К8Б ($H_m = 7650 \cdot 10^6$ Н/м²) минимальная ширина узкромочного круга должна составлять – 1,65 мм. Автором [117] за основу был принят вариант свободного рабочего слоя с шириной 2 мм (для диаметра круга 150 мм это является минимумом ширины рабочего слоя, который возможно качественно технологически изготовить, рис. 3.44).



Рис. 3.44. Конструкция узкромочного круга для шлифования упрочняющих фасок многогранных пластин

Поскольку круги узкромочные, то желательно использовать медь-оловянные связки с твердостью ≈ 100 HRB (М2-01, М3-16, МО20-2). Для внешнего диаметра круга в 250 мм, где скорость резания при тех же оборотах будет более высокой, допустимо использование металлополимерных связок – типа В1-13, а ширина рабочего слоя из технологических соображений может быть повышена до 3,5 мм. Зернистость алмазов должна быть небольшой и составлять 50/40 или 63/50, что обосновывается необходимостью

обеспечения, как малой шероховатости поверхности, так и необходимостью снижения величины коэффициента абразивного резания.

Таким образом, для шлифования фасок пластин разработано три варианта конструкций кругов, имеющих следующую характеристику:

12A2-25° 150×2×3×20 АС6 50/40–М2-01–100;

12A2-60° 250×3,5×3×50 АС6 63/50–МО20-2–100;

12A9В 250×3,5×5×50 АС6 63/50–В1-13–100.

Для изготовления таких кругов разработаны чертежи кругов (соответственно черт. ИСМ 14.3956, 14.3993, 14.5411) и чертежи пресс-форм

(соответственно черт. ИСМ 09.4584, 09.4434, 09.5457). Промышленная партия специальных узкокромочных кругов прошла производственные испытания и была внедрена на Луганском заводе коленчатых валов, заводе «Серп и молот» (г. Харьков), Светловодском комбинате твердых сплавов и тугоплавких материалов. Указанные круги по своим эксплуатационным показателям позволили заменить импортные круги фирмы «WENDT» (Германия).

Группа 2 – разработка конструкций и установление характеристик специальных кругов для шлифования граней и радиусов пластин. Процесс шлифования граней и радиусов является наиболее сложной операцией в процессах обработки многогранных пластин, поскольку требует сложной кинематики их перемещения и динамического воздействия на режущую поверхность круга при врезании пластин. При разработке конструкций кругов и установления их характеристик за основу были выбраны: форма кругов 6А2 и диаметры 250 и 350 мм, что определяется специальным шлифовальным оборудованием.

Как было показано выше в таких кругах необходимо использовать полимерные или металлополимерные связки типов В1-11П или В1-13 соответственно. Зернистость алмазов может быть выбрана из диапазона 63/50–100/80. Для прецизионной обработки на станках «Агатон-250», где производительность шлифования в 2 раза меньше, чем при обычной обра-



Рис. 3.45. Конструкция алмазного круга диаметром 250 мм для прецизионного шлифования граней и радиусов пластин

ботке, рекомендуется использовать в кругах (рис. 3.45) зернистость алмазов 63/50 (допустима 80/63). Для обычной обработки на станках МШ-289 или WAM 300/35 – зернистость 80/63 (допустима 100/80). Кроме того, установлено, что для условий упругого врезного шлифования пластин с осцилляцией вдоль режущей поверхности кругов с зернистостью 63/50–100/80 шероховатость поверхности остается на одинаковом уровне [117]. Это объясняется тем, что поверхность пластин при шлифовании формируется достаточно большим количеством зерен, находящихся на плоской рабочей поверхности круга. Такой эффект позволяет использовать в кругах зернистость алмазов не 63/50, а 80/63 и 100/80, что позволяет повысить производительность шли-

фования и снизить износ кругов [117].

При шлифовании пластин по граням и радиусам необходимо выдерживать производительность шлифования не более $1000 \text{ мм}^3/\text{мин}$ ($1,667 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$) [117] и стремиться к повышению скорости круга. Так, для круга 6А2 диаметром 350 мм из формулы (3.9) возможно определить, что для условий шлифования ($v_k = 20 \text{ м/с}$) кругом из АС6 80/63 ($Z = 63 \text{ мкм}$, $H_p = 4,4 \text{ Н}$, $k_{ст} = 0,73$), твердого сплава ТТ10К8Б ($H_m = 7650 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$) минимальная ширина рабочего слоя круга должна составлять – 17,8 мм. Как было указано выше, ширина рабочей поверхности круга для шлифования граней и радиусов должна быть в среднем в 6 раз больше ширины рабочей поверхности круга для шлифования фасок и должна быть равной от 10 до 20 мм [117]. Для прецизионной обработки, когда производительность, как указано выше, в 2 раза ниже – ширина рабочего слоя может составлять и менее 10 мм.

Таким образом, для шлифования граней и радиусов многогранных пластин разработаны два варианта конструкций кругов, имеющих следующие характеристики:

6А2 250×10(8, 20) ×3(6, 10) ×215 – АС6 80/63–В1-13–100 (рис. 3.45),

6А2 350×10(15, 20) ×5(8) ×315 – АС6 80/63–В1-13–100 (рис. 3.46).

Для изготовления таких кругов разработаны их чертежи (соответственно черт. ИСМ № 14.5197, 14.5283, 14.5546) и чертежи пресс-форм (соответственно черт. ИСМ №№ 09.5184, 09.5370, ОШ1463). Промышленная партия специальных кругов прошла производственные испытания и внедрение на Светловодском комбинате твердых сплавов и тугоплавких материалов, Московском опытном заводе и СП «МКТС-Хертель» при шлифовании граней и радиусов твердосплавных пластин. Испытания пока-



Рис. 3.46. Конструкция алмазного круга диаметром 350 мм для шлифования граней и радиусов многогранных пластин

зали, что указанные круги по своим эксплуатационным показателям позволяют заменить импортные круги фирм «Агатон» (Швейцария) и «Вендт» (Германия).

Группа 3 – разработка конструкций и установление характеристики специальных кругов для шлифования опорных поверхностей пластин.
Шлифование опорных

поверхностей является базовой операцией в процессах обработки пластин. При этом, характерным является съём больших объемов материала для того, чтобы ликвидировать недостатки процесса спекания пластин. Поэтому эта операция требует снижения теплонапряженности процесса шлифования. Известно [211], что плотность теплового потока можно представить как $q = P_Z \cdot v_{кр} / S$. Анализ этой зависимости показывает, что снижение плотности потока возможно за счет снижения силы P_Z , и, как нами показано выше, за счет повышения величины коэффициента абразивного резания (использования полимерных связок, технологий электрошлифования и др.) или за счет повышения площади зоны контакта (S), одним из вариантов которого является увеличение ширины режущего слоя круга.

Для условий электрошлифования пластин из вольфрамовых и безвольфрамовых твердых сплавов на станках 3Э731 разработаны специальные круги 6А2SS 250×20×3×76–АС6 160/125–В1-13–100 с замкнутым прерывистым режущим слоем (рис. 3.40). Они позволяют снизить температуру шлифования за счет прерывистого слоя и за счет более качественного поступления технологической жидкости в зону шлифования.

Вариант повышенной ширины режущей поверхности реализуется эффективно при двустороннем групповом шлифовании. Принципы выбора характеристик рабочего слоя кругов являются аналогичными, что и для кругов для шлифования граней и радиусов пластин, однако, поскольку производительность обработки больше, то и зернистость алмазов нужно выбирать из диапазона 100/80–160/125 в зависимости от шероховатости поверхности.

Для реализации этого нами разработаны специальные круги 6А2 диаметром 400 мм. Это позволяет иметь в зоне контакта одновременно до 20 пластин и достигать общей производительности на 1 круг в 3500 мм³/мин ($5,83 \cdot 10^{-8}$ м³/мин). Из формулы (3.9) можно определить, что для этих условий ($v_k = 20$ м/с) шлифование указанным кругом с алмазами АС6 125/100 ($Z = 100$ мкм, $H_P = 5,8$ Н, $k_{ст} = 0,77$), твердого сплава ТТ10К8Б ($H_M = 7650 \cdot 10^6$ Н/м²) минимальная ширина рабочего слоя круга должна составлять – 100,3 мм. Принято – 100 мм.

Другим примером этой группы являются специальные круги 6А2 диаметром 500 мм для станков модели WBM 200/21 (рис. 3.47). Это позволяет иметь в зоне контакта одновременно до 12 пластин, достичь общей производительности на 1 круг в 1950 мм³/мин ($3,25 \cdot 10^{-8}$ м³/с). Из формулы (3.9) можно определить, что для условий шлифования ($v_k = 20$ м/с) указанным кругом с алмазами АС6 125/100 ($Z = 100$ мкм, $H_P = 5,8$ Н, $k_{ст} = 0,77$), твердого сплава ТТ10К8Б ($H_M = 7650 \cdot 10^6$ Н/м²) ширина рабочего слоя должна составлять – 46,1 мм.

Все эти конструкции кругов позволяют при повышенной производительности обработки иметь сниженную теплонапряженность процесса и

отсутствие трещин и сколов в поверхностном слое пластин. Таким образом, для шлифования опорных поверхностей пластин разработаны три варианта конструкций кругов, имеющие следующую характеристику:

6A2 SS 250×20×3×76–AC6 160/125–B1-13–100;

6A2 400×100×3×76–AC6 125/100–B1-13–100;

6A2 500×40×5×380–AC6 125/100–B1-13–100.

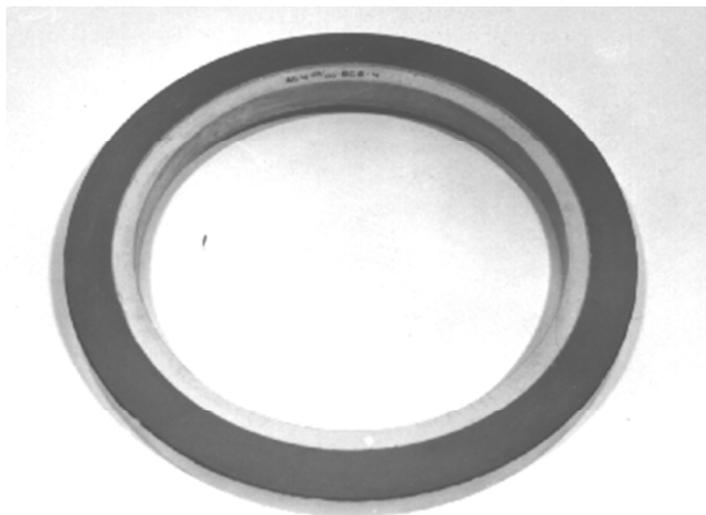


Рис. 3.47. Конструкция алмазного круга диаметром 500 мм для шлифования опорных поверхностей многогранных пластин

Для изготовления таких кругов разработаны их чертежи (соответственно черт. ИСМ №№ 14.4374, 14.3675, 14.5244, 14.3934) и чертежи пресс-форм (соответственно черт. ИСМ №№ 09.4789, 09.5117, 09.5333, 09.4582).

Промышленная партия специальных кругов формы 6A2 диаметром 500 мм прошла производственные испытания и внедрение на СКТС и ТМ (г. Светловодск) и СП «МКТС-Хертель» (г. Москва) при

шлифовании опорных поверхностей твердосплавных пластин. Испытания подтвердили, что указанные круги по своим эксплуатационным показателям позволяют заменить импортные круги фирмы «Вендт» (Германия).

3.6. Обзор конструкций алмазных отрезных кругов и тенденции их развития

Повышение объемов использования строительных и керамических материалов в промышленности требует эффективных методов их обработки, в частности резки – наиболее распространенного метода обработки камня, кирпича, керамической плитки, бетона и т.п. При этом, универсального инструмента для обработки таких материалов не существует, что связано, прежде всего, с большим разбросом свойств обрабатываемых материалов, а также с требованиями, предъявляемыми к форме, качеству и самому процессу резки.

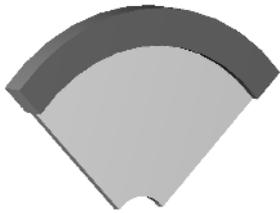
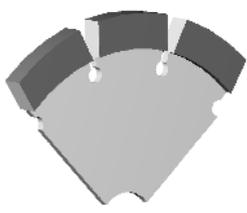
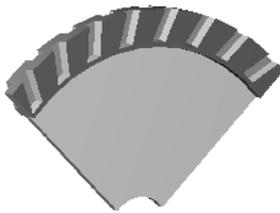
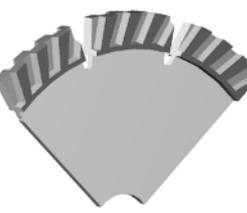
Требования к форме и качеству предъявляют при порезке таких материалов как поделочные и полудрагоценные камни, полупроводники и т.п., когда помимо эффективной и качественной резки необходимо обеспе-

чить минимальную ширину реза. Этим требованиям в значительной степени отвечают алмазные отрезные круги, которые являются наиболее производительным инструментом из всех применяемых при резке. Достаточно высокая жесткость и устойчивость алмазных отрезных кругов при незначительной толщине пропила, малые величины торцового и радиального биений и сравнительно низкие удельные давления на обрабатываемую поверхность, а также высокая размерная стойкость способствовали их широкому распространению.

В настоящее время рынок алмазного инструмента характеризуется большим количеством разнообразных алмазных отрезных кругов. Алмазные отрезные круги можно классифицировать по форме режущей кромки и по форме боковой поверхности алмазоносного слоя (табл. 3.31 и рис. 3.48) [212].

Режущая кромка определяет производительность процесса резки и бывает сплошной или прерывистой. Боковая поверхность алмазоносного слоя влияет на выделение тепла при резке и бывает плоской и волнообразной (табл. 3.31). Различные сочетания формы режущей кромки с формой боковой поверхности алмазного слоя создают всю гамму алмазных отрезных кругов предлагаемых на рынке. В целом, на наш взгляд, классификацию алмазных отрезных кругов с наружной режущей кромкой можно представить в виде, описанном на рис. 3.48. Каждый вид алмазного инструмента из рассмотренной классификации имеет свою геометрию и область применения.

Таблица 3.31. Различные типы режущих кромок алмазных отрезных кругов

Форма боковой поверхности	Форма режущей кромки	
	Сплошная	Прерывистая
Плоская		
Волнообразная		

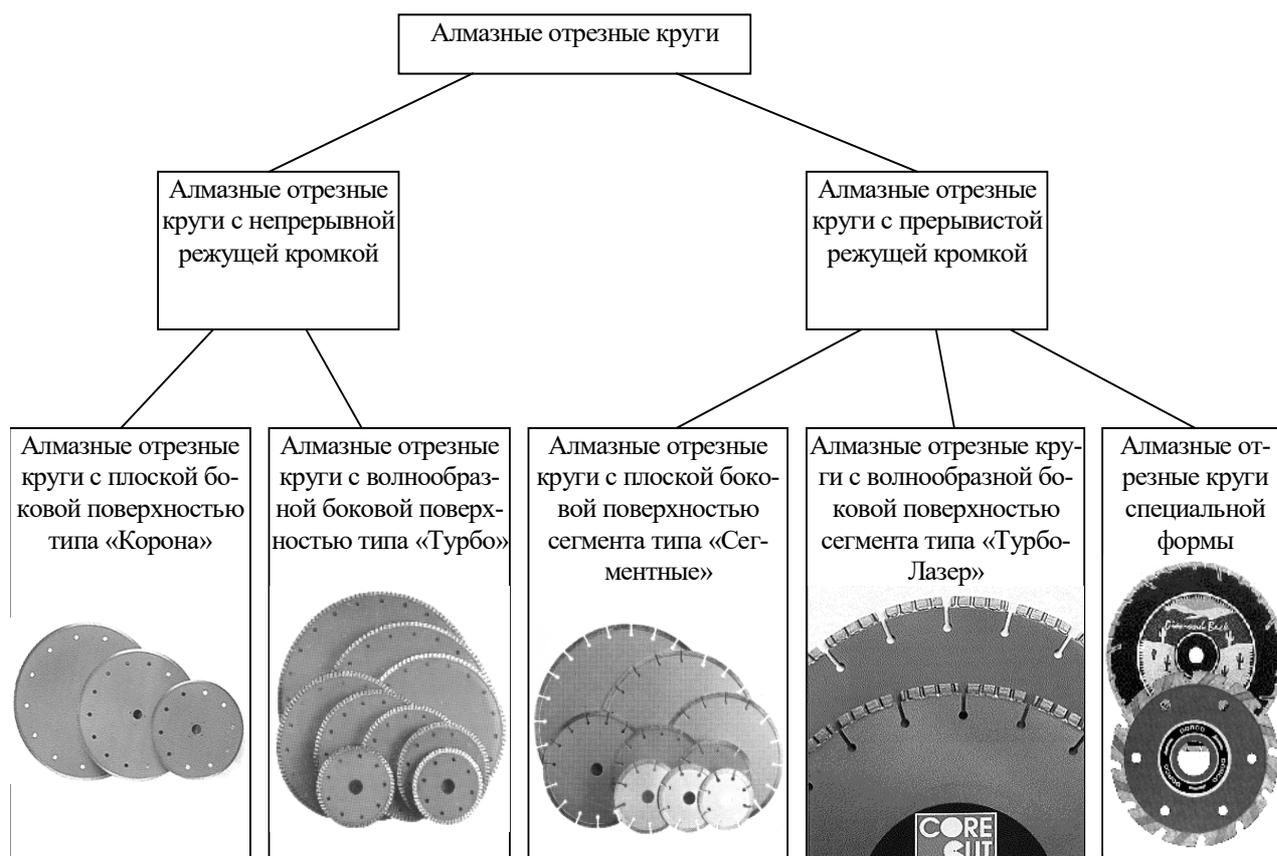
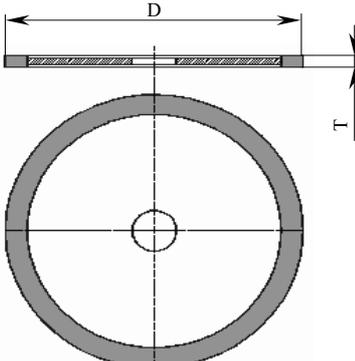


Рис. 3.48. Классификация алмазных отрезных кругов

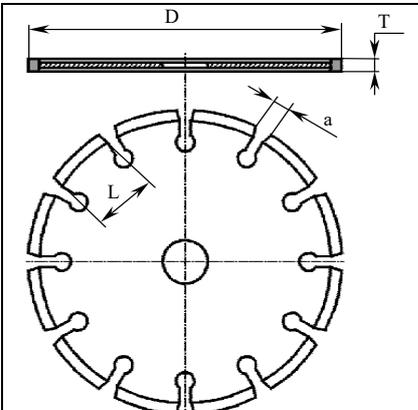
Алмазные отрезные круги со сплошной режущей кромкой и с плоской боковой поверхностью классифицируются как алмазные круги типа «Корона». Круги данного типа производятся различных типоразмеров (табл. 3.32). Могут использоваться для резки, как в стационарных, так и в ручных (переносных) установках, но при этом необходимо осуществлять их работу с применением охлаждающей жидкости. К достоинствам таких кругов можно отнести такие преимущества, как, тонкий рез, низкая стоимость, а также более низкая требуемая мощность станка по сравнению с кругами другого типа.

Таблица 3.32. Алмазные отрезные круги типа «Корона»

	D , мм	T , мм
	50 – 400	0,15 – 2,4

Основными недостатками этих кругов являются возможное засаливание в процессе работы, а также сложность изготовления кругов больших (более 400 мм) диаметров. Для устранения этих недостатков режущий слой круга делают прерывистым, составленным из сегментов, а круги по классификации (рис. 3.48) получили название «Сегментные». Типоразмеры изготавливаемых сегментных кругов приведены в табл. 3.33. Поскольку сегментные круги конструктивно обладают более высокой охлаждаемостью, чем «Корона», (прерывистость резания, турбулентные потоки воздуха, создаваемые сегментами и др.), то их применение возможно как с подачей охлаждающей жидкости, так и без него. Изготавливают путем напайки или приварки сегментов на корпус. В последнее время для этой цели используют лазерную сварку, которая обеспечивает высокую прочность крепления сегмента, что позволяет гарантировать безопасность работы таким алмазным кругом. К их достоинствам относится более высокая производительность и ресурс работы по сравнению с кругами типа «Корона», а также возможность многократного использования корпуса (повторная приварка сегментов). Из-за сложности изготовления корпусов больших диаметров повторное их использование возможно до 15 раз, однако ресурс таких кругов, как правило, ниже на 10–25 %.

Таблица 3.33. Алмазные отрезные круги типа «Сегментный»

	D , мм	T , мм	L , мм	a , мм	n , шт.
	105 – 5000	2,2 – 12	24 – 40	2,0 – 24	8 – 315

Корпуса сегментных кругов имеют, как правило, готовые выступы, на которые при изготовлении круга приваривают алмазосодержащие сегменты. На одном выступе корпуса может располагаться от одного до нескольких сегментов (рис. 3.49). Конструктивно корпуса сегментных кругов могут выполняться с разнообразными по форме межсегментными впадинами. Эти впадины служат как для снижения температуры, так и для уменьшения деформации круга. Форма самих впадин может быть весьма разнообразна, но дно впадины обязательно выполняют радиусным, чтобы уменьшить циклические напряжения, возникающие при работе круга.

Появившись в середине прошлого столетия, сегментные круги в настоящее время имеют наибольший спрос. Это связано как с технологией

изготовления, так и с особенностями процесса резки, осуществляемыми этими кругами. Сегментные круги осуществляют циклический процесс резки, стадии которого соответствуют чередованию выступов и впадин на их режущей кромке. Это способствует снижению температуры в зоне резания, что объясняется не только эффектом прерывистости, но также и снижением сил резания, а значит и эффективной мощности резания. Снижение составляющих силы резания происходит вследствие снижения сопротивления сходу стружки, улучшения процесса стружкообразования и условий удаления шлама, более благоприятного распределения припуска между отдельными зернами алмаза. Наиболее эффективное применение сегментные круги нашли с применением охлаждения, когда в зону резания подается охлаждающая жидкость — преимущественно водные растворы солей.

Для увеличения ресурса на сегментные круги устанавливают замедлители износа (рис. 3.50). Они представляют собой несколько сегментов, от 2 до 4, расположенных наклонно. Благодаря такому расположению они подчищают стенки прорезанной канавки, что в свою очередь снижает общий износ круга. Для уменьшения шума и вибраций, возникающих при работе круга на его корпус наносят антивибрационные прорезы (рис. 3.51).

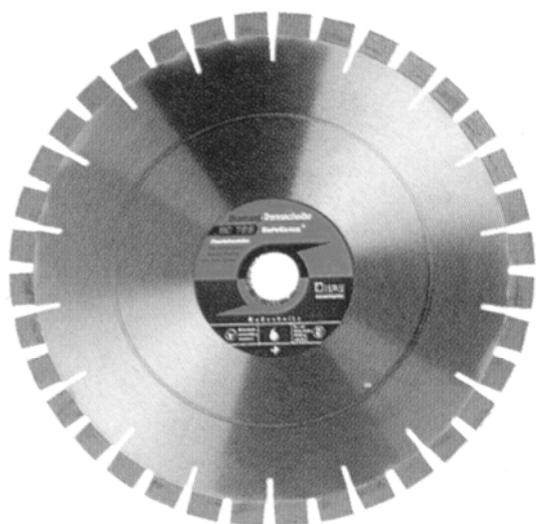


Рис. 3.49. Сегментный круг с парным расположением сегментов



Рис. 3.50. Сегментный круг с замедлителями износа

Наряду с очевидными достоинствами у прерывистых кругов имеются определенные недостатки. Характерной особенностью работы прерывистых кругов является изменение площади контакта изделия и режущей поверхности круга в процессе резки. Периодическое изменение площади контакта приводит к существенному росту вибраций в технологической системе, к появлению ударных нагрузок, которые испытывает рабочая поверхность и сегментный круг в целом. Наличие вынужденных колебаний

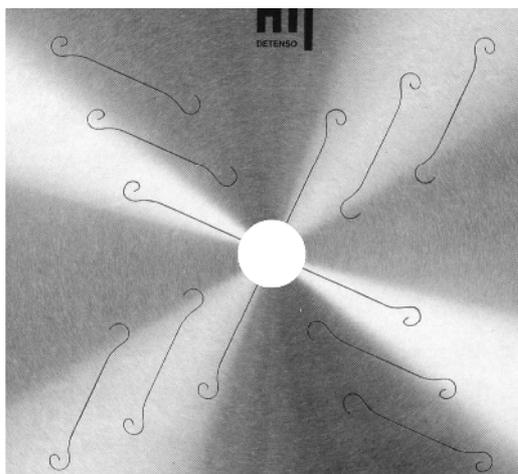


Рис. 3.51. Антивибрационные прорези на корпусе сегментного круга

хотя и незначительно снижает силы резания, однако повышает контактную температуру и увеличивает шероховатость реза.

Количество сегментов на корпусе алмазного круга, как правило, определяется диаметром круга. Эта зависимость для ряда производителей представлена на рис. 3.52. Показательно, что возможное отклонение от такой характерной прямой для некоторых фирм производится только в большую сторону (зона А), т.е. повышают не только прерывистость, но и снижают тем самым промежутки между секторами, снижая динамические

удары в процессе обработки. Обращаем внимание на эту тенденцию, так как кругов, попадающих в зону В нами не обнаружено.

В большинстве случаев при строительстве, перестройке и сносе зданий, а также реставрации старых построек актуальной является дополнительная обработка стен, полов и потолков: проемы для дверей, окон, лиф-

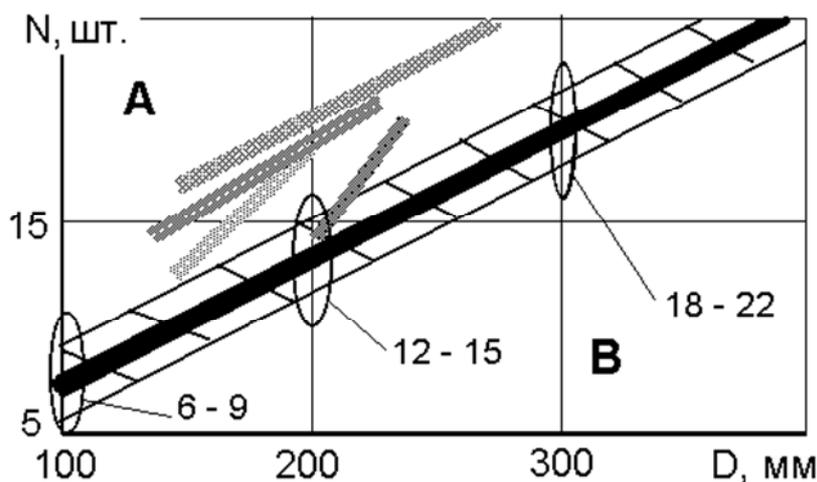
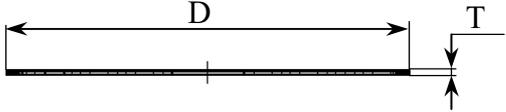
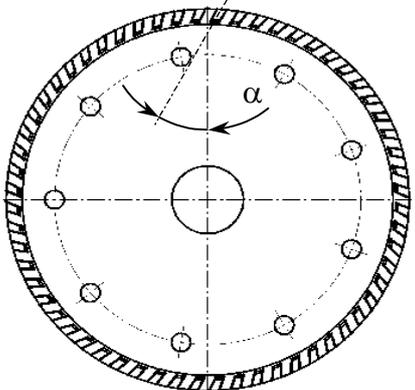


Рис. 3.52. Зависимость количества сегментов от диаметра алмазного круга (заштрихован некоторый разброс данных для различных изготовителей)

тов и лестниц, пазы для гидроизоляции и отверстия для электропроводки. Материалы, которые при этом приходится обрабатывать – от кладки из природного камня до бетона со стальным армированием. Поэтому для таких работ, в особенности с появлением ручных угловых шлифовальных машин («болгарок»),

появилась необходимость в инструменте, который осуществлял высокопроизводительную «сухую» резку — без подвода охлаждающей жидкости. Такой инструмент появился в 80-х годах и получил название «Турбо» (табл. 3.34).

Таблица 3.34. Алмазные отрезные круги типа «Турбо»

	D , мм	T , мм	α , °	n , шт.
	100–400	2,0–2,6	0–35	24–142

В отличие от сегментных кругов эти круги имеют сплошную режущую кромку, что обеспечивает их более плавную работу, но с волнообразной режущей поверхностью (табл. 3.31). Такие круги имеют корпус, на который, методами порошковой металлургии наносится алмазосодержащий слой. Этот слой сплошной по периферии, но имеет канавки на боковой поверхности, что придает ей волнообразную форму и способствует снижению температуры в зоне резания за счет снижения контакта по боковой поверхности.

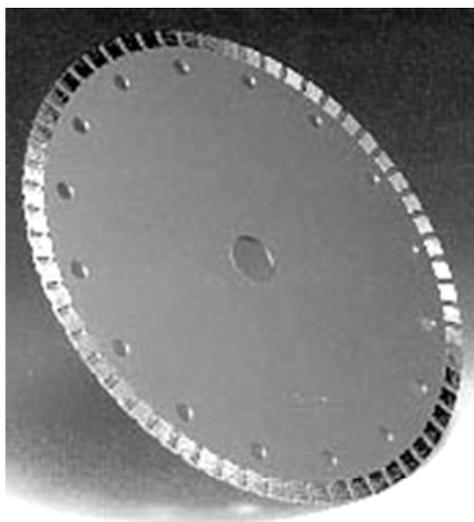


Рис. 3.53. Алмазный круг «Турбо» с прямыми канавками

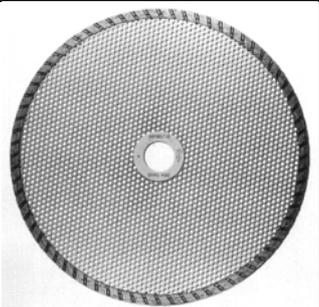
Отличительной особенностью «Турбо» кругов является то, что благодаря наличию канавок на их боковой поверхности осуществляется принудительное прокачивание воздуха в зону обработки. Такого вентилирования в большинстве случаев, наряду с прерывистостью процесса резания, достаточно, чтобы круг при работе не перегревался. Также этот эффект благоприятно влияет на процесс выноса шлама из зоны резания. Угол наклона канавок, как правило, не превышает 35°. Но может быть и равным нулю (рис. 3.53). Корпуса кругов типа «Турбо» могут иметь разнообразную конструкцию (табл. 3.35).

Одним из вариантов комбинированного сочетания описанных выше типов отрезных кругов являются круги типа «Турбо–Лазер» (рис. 3.54). Круги данного типа представляют собой сегментный круг, на боковой поверхности которого нанесены канавки, что придает ей волнообразную форму. Таким образом, эти круги конструктивно объединили два типа

алмазных отрезных кругов — это «сегментные» и «Турбо». Корпуса кругов типа «Турбо–Лазер» могут выполняться как простой, так и волнообразной формы (рис. 3.54). Канавки, расположенные на боковых сторонах сегментов, могут выполняться как прямыми, так и наклонными.

Круги специальной формы (рис. 3.55) используются в особых случаях, когда необходимо иметь чистый рез и равномерный износ круга.

Таблица 3.35. Виды корпусов кругов типа «Турбо»

Корпус сплошной	Корпус с отверстиями	Сетчатый корпус	Волнистый корпус
			

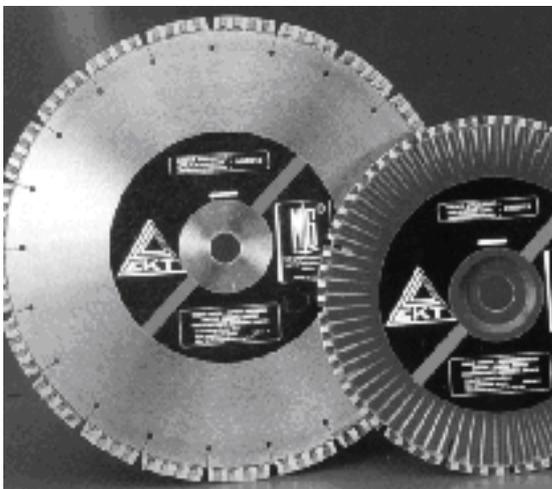


Рис. 3.54. Алмазные круги типа «Турбо–Лазер»



Рис. 3.55. Алмазный отрезной круг специальной формы

Анализ информации по номенклатуре алмазных отрезных кругов, который можно найти в Интернете, научно-технической литературе и материалах-каталогах выставок, а данном случае были использованы информационные материалы фирм стран: Германии – Bosch; Metabo; Wolfcraft; Diewe; Pferd; Италии – Molemab; Россия – Tomal; Интех Диамант; Сплитстоун; ТЗАИ; Кореи – Shinhan diamond; Samwoo; Ehwa; Dorco; Hyo sung

diamond; Японии – Sankyo; Украины – Ди-стар, Новатор, Алкон, а также фирм – Hilti и DeWalt, показывает, что наибольшая информация фирмами-изготовителями и фирмами-продавцами представлена по сегментным кругам и кругам «Турбо», соответственно 53 и 27 %, далее идут круги типа «Корона» (14 %), «Турбо-Лазер» (4 %) и специальные круги (1,5 %). В определенной степени представленные выше данные свидетельствуют о том, что в начале XXI века рынок как раз больше ориентирован именно на первые две позиции в отрезных кругах – сегментные и «Турбо». Собранная информация была нами распределена по регионам и типам отрезных кругов в относительных единицах следующим образом [212]:

Тип алмазного отрезного круга	Регионы		
	СНГ	Европа	Азия
Сегментные	7 %	10,5 %	14 %
Турбо	8,8 %	8,9 %	14 %
Корона	7 %	10,5 %	8,8 %
Турбо-Лазер		3,5 %	3,5 %
Специальный			3,5 %
В целом:	22,8	33,4	43,8

Анализ представленных выше данных свидетельствует о том, что в целом азиатские фирмы более европейских активны на рынке. При этом, больше информации о кругах типа «Корона» мы можем найти в европейских источниках, тогда как информации по кругам «Сегментные», «Турбо» и «Специальные» больше в азиатских источниках.

В целом, анализ информационных данных по отрезным кругам из сверхтвёрдых материалов позволяет выявить две наиболее существенные тенденции в их развитии :

- переход к комбинированным формам кругов типа «Турбо-Лазер» и специальным, сочетающим рез не только по периферии, но и по торцам круга;

- использование потенциальных свойств корпуса в повышении устойчивости и жесткости кругов, например, гофрированных корпусов.

В данном обзоре мы не акцентировали внимание на характеристику рабочего слоя отрезных кругов, тем не менее необходимо обратить также внимание на то, что, производители алмазных отрезных кругов обычно на один типоразмер выпускают несколько марок качества. Например: Standart, Premium, Professional. Эти марки отличаются ресурсами, а следовательно и стоимостью. Например, у Premium ресурс выше, чем у Standart и т.д. В связи с этим, укажем еще также на одну тенденцию, которая как раз может быть характерной для развития кругов типа «Корона», особенно тонкостенных, с толщиной корпуса от 0,4 до 0,8 мм. Производить какие-то

дополнительные операции с корпусом в этом случае довольно сложно, поэтому большее внимание в этом случае необходимо уделять рабочему слою. Необходимо снизить нагрузки на него в процессе резания. Это возможно сделать за счет повышения зернистости алмазов. Однако, возникает проблема в закреплении таких алмазов. Известные в мировой практике технологии изготовления дискового алмазного инструмента обеспечивают, как правило, соотношение толщины режущего слоя к зернистости алмазов в пределах $b/Z \geq 3-4$.

Г Л А В А 4

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ СТМ

4.1. Основные понятия процессов обработки

Прежде чем представить основные понятия технологических процессов обработки, укажем, что под технологией следует понимать совокупность приемов и способов целенаправленной переработки (обработки) средств. При этом к переработанным средствам относятся не только материальные ресурсы (минеральное сырье, металлы, полимеры, продукты сельского хозяйства), но и нематериальные ресурсы (информация, проектные и научные разработки, охрана здоровья, юриспруденция, искусство, финансовые и страховые услуги) [213]. В нашем случае мы будем рассматривать первую часть, связанную с механической обработкой материальных ресурсов.

Обратим внимание на то, что основным условием эффективной механической обработки является обеспечение одной из главных закономерностей процесса резания, а именно, при повышенной температуре в зоне обработки твердость материала режущего инструмента должна в 1,5–2,0 раза превышать твердость материала обрабатываемого изделия [214]. При этом условное напряжение резания характеризует уровень напряжений, возникающих в зоне контакта при резании. При значительных толщинах срезаемого слоя условное напряжение резания мало зависит от толщины срезаемого слоя, так как при тупом угле резания, что характерно для процессов шлифования, работа деформации остается практически без изменений. Ширина срезаемого слоя не влияет на величину фактического угла резания и определяет собой длину слоя материала, поэтому условное напряжение резания практически не зависит от ширины срезаемого слоя [215].

Применительно к процессу шлифования условное напряжение резания, по версии авторов работы [216] определяется зависимостью:

$$\sigma = 2 \cdot R_{cm} / fa, \quad (4.1)$$

где R_{cm} – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, fa – коэффициент абразивного резания ($fa = P_z / P_y$).

В работе [217] приведена аналитическая зависимость для определения условного напряжения резания:

$$\sigma = 2 \cdot \tau_{сдв} \cdot (1 + (1 + fa^2)^{0,5}) / fa, \quad (4.2)$$

где $\tau_{сдв}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг ($\tau_{сдв} \approx 0,5 \cdot R_{cm}$), fa – коэффициент абразивного резания.

При условии $fa < 1$, то есть при абразивной обработке, авторы [216] упрощают зависимость (4.2) и она принимает вид:

$$\sigma = 4 \cdot \tau_{\text{сдв}} / fa.$$

Сделан вывод [216], что для осуществления высокоскоростного шлифования необходимо существенно снижать σ в первую очередь за счет повышения режущей способности круга, применяя эффективные методы его правки, круги из СТМ, характеризующиеся большей остротой режущих кромок, а также за счет снижения трения круга с обрабатываемым материалом.

Коэффициент трения при обработке является показателем концентрации напряжений в материале. С повышением твердости материалов коэффициент трения снижается. От модуля упругости коэффициент трения не зависит. Коэффициент трения снижается с ростом шероховатости при упругом контакте и повышается при пластическом контакте [218].

Согласно гипотезе о двойной природе внешнего трения коэффициент трения равен сумме молекулярной и деформационной составляющей [219]:

$$f = \tau_n / P_r + k\alpha \sqrt{h/R},$$

где τ_n – прочность молекулярной связи на срез при действии на нее средних нормальных напряжений P_r , h – глубина проникновения неровностей, α – коэффициент гистерезисных потерь, k – коэффициент пропорциональности.

Адгезионная составляющая коэффициента трения зависит от свойств контактирующих материалов и температуры контакта [220].

Коэффициент трения алмаза в воздушной среде является низким и составляет 0,05–0,10. С повышением степени разряжения (вакуума) он растет. Так, коэффициент трения алмаза по грани алмаза (111) при давлении газовой среды $1,33 \cdot 10^{-8}$ Па достигает – 0,9. Повышению коэффициента трения также способствует десорбция газов с поверхности алмазных частичек [221].

Граничная энергоемкость применительно к процессам обработки определяется тем, что при поглощении локальными объемами поверхностных слоев инструмента предельной величины энергии упругой деформации происходит их микроразрушение. Трещиностойкость и износостойкость покрытий характеризуется граничной энергоемкостью ΔE тугоплавких фаз. Предельную энергию, запасаемую локальными объемами с критической плотностью дислокаций, определяют как:

$$\Delta E = \int_{T_d}^{T_p} Cp dT, \text{ где } T_d -$$

температура исследования, T_p – температура плавления, Cp – удельная теплоемкость. Значения предельной энергоемкости разных тугоплавких соединений при температуре в 1273 К приведены ниже:

Соединение	TiC	ZrC	HfC	NbN	TiN	ZrN	HfN
ΔE , кДж/моль	129,9	155,8	171,0	103,9	113,9	123,2	125,2

Из этих данных видно, что карбидные фазы имеют большую энергоемкость, чем нитридные [222].

Большая износостойкость при высоких скоростях резания свойственна для твердых сплавов с энергоемкими покрытиями. Другие соединения при 1273 К имеют следующую энергоемкость [223]:

Соединение	WC	NbC	NbC _{0,5}	TiB ₂	Al ₂ O ₃	TiN	TiC
ΔE , кДж/моль	106,9	156,1	128,8	240,5	146,3	113,2	129,2

Нестехиометрия зерен карбидной фазы снижает их энергоемкость [223].

Процесс механической обработки сопровождается микроразрушением, что отражается на физических и механо-химических эффектах. Так, основным источником акустической эмиссии (АЭ) при разрушении микрообразцов из карбида бора является образование микротрещин. Количество импульсов АЭ почти совпадает с количеством трещин. Возникновению микротрещины большего размера соответствует более сильный импульс АЭ. Оценки показывают, что время образования микротрещины является существенно меньшим за период собственных колебаний пьезопреобразователя. В этом случае информацию о выходном импульсе АЭ, генерированной непосредственно растущей трещиной, несет исключительно амплитуда сигнала [224].

При резании новой твердосплавной пластиной наблюдается сигнал АЭ, содержащий значительное количество низкочастотных составляющих. По мере затупления резца сигналы АЭ смещаются в высокочастотную область. Износ при трении характеризуется излучением высокочастотных АЭ-сигналов. Выкрашивание твердосплавной пластины характеризуется резким ростом интенсивности и особенно амплитуды сигналов АЭ [225].

Основной вклад в сигнал АЭ вносит энергия разрушения и микропластическая деформация срезаемого слоя. Энергоемкость других составляющих механической обработки составляет 10–30 % от общей энергоемкости процесса [226].

При правке шлифовальных кругов карандашами МААС АЭ учитывает как особенности разрушения кругов, так и износ карандаша, поскольку связка и зерна разрушаются при контактном взаимодействии по определенной площади поверхности. В случае правки с использованием АТП или однокристалльного алмазного инструмента излучение в виде импульсной последовательности определяется изменением характера разрушения абразивного инструмента [227].

В процессе обработки происходит и механохимическая активация твердых тел. Тепловая теория механохимической активации представляет

собой модель «магмоплазмы». Согласно ей, энергия, выделяющаяся при механическом взаимодействии, превышает теплоту плавления и из-за слабой теплопроводности твердых тел приводит не только к локальному плавлению, но и к перегреву и испарению вещества, тем самым, состоянию плазмы. Срок жизни теплового возбуждения является малым и составляет 10^{-9} – 10^{-10} с. В механохимии принято, что в локальных точках контакта температура достигает точки плавления легкоплавкого вещества. Протяженность тепловой вспышки оценивается величиной 10^{-4} с на площади 10^{-7} – 10^{-9} м², а критическое давление – величиной 1,5–3,0 ГПа [116].

В связи с приведенным выше укажем, что трещиностойкость материала определяется как способность конструкционного элемента в виде образца материала, содержащего трещину или частично поврежденного, выдерживать нагрузку и не разрушаться полностью. По сопротивлению распространению трещин эта способность описывается напряженным состоянием у вершины трещины перед окончательным разрушением – K_{Ic} . В отличие от других механических характеристик эта величина не зависит от размеров изделия, от состояния их поверхностного слоя, от наличия в них дефектов типу пор или включений графита [228].

В работе [229] показано, что при контактировании таких уникальных по своим физико-механическим свойствам материалов как сверхтвердые поликристаллические материалы (ПСТМ), кроме твердости, определяющие влияние на эффективность микроразрушения имеет их динамическая прочность, что характеризуется например, коэффициентом трещиностойкости. Так, производительность шлифования ПСТМ с увеличением K_{Ic} от 4 до 10 МПа·м^{0,5} снижается в 5 раз.

Шлифовочные трещины на инструментальных сталях не имеют определенной ориентации или расположены в виде сетки. Причины их возникновения [230]:

- напряжения растяжения, образующиеся вследствие чрезмерного нагрева при шлифовании и вызванного ним дальнейшего отпуска мартенсита, образованием в тонком поверхностном слое троосто-мартенсита или даже аустенита, тем самым, таких структур которые имеют меньший объем чем мартенсит, сохраняющийся в расположенных ниже слоях;
- преобразование остаточного аустенита в поверхностном слое и образование более хрупких продуктов его преобразования;
- недостаточный отпуск перед шлифованием.

Обратим внимание также и на остаточные напряжения в обрабатываемом изделии после обработки. Существует мнение, что если при обработке формируются остаточные напряжения сжатия, то это вследствие преимущественного воздействия силового влияния, а если следствием обработки являются остаточные напряжения растяжения, то тут преимуще-

ственным является тепловой воздействию. В работе [231] автор приводит доказательства, что тепловое воздействие только повышает или снижает абсолютное значение остаточных деформаций, а в целом остаточные напряжения являются следствием действия сил резания. При шлифовании в подповерхностном слое детали в тангенциальном направлении возникают растягивающие остаточные напряжения, а в осевом – сжимающие. В связи с тем, что остаточные температурные деформации являются значительно меньшими, чем деформации, вызываемыми силами резания, они, преимущественно, не являются определяющими при формировании остаточных напряжений, более того нагрев обрабатываемой поверхности даже может помочь увеличению деформаций, вызываемых силами резания [231].

Укажем, что взаимодействие в контакте инструмент–металл характеризуется внутренней и поверхностной энергией, количественную оценку которых производят по температуре плавления, параметрам диффузии, энергии сублимации, по величине теоретической прочности и другим структурно-нечувствительным величинам. Энергия активации разрушения совпадает с энергией испарения веществ и сопровождается также разрывом межатомных связей. Близость этих величин показывает общность первичных стадий процессов. Внутреннюю энергию кристалла составляет работа, которую необходимо выполнить для его разрушения на не взаимодействующие части. Принято, что точное экспериментальное измерение поверхностной энергии является невозможным, поэтому ее оценивают по характеристикам, которые плотно с ними связаны, например, по удельной энергии раздробления или по константе скорости раздробления. Константа скорости раздробления увеличивается с повышением подвижности атомов в кристаллической решетке, и, тем самым, снижением пластичности [116]. Обратим также внимание на то, что с ростом плотности оксидов стандартная теплоемкость несколько возрастает. При этом наблюдается группирование по валентности металла оксида, а наиболее значительное возрастание наблюдается для оксидов состава Me_2O_3 [71].

Энергия, которая расходуется при разных методах формирования поверхности, в работе [232] представлена следующим образом:

Технологический метод	Удельные затраты энергии, Дж/см ²
Точение	$(1,7-2,5) \cdot 10^3$
Шлифование	$(5,5-7,0) \cdot 10^4$
Электроэрозионная обработка	$(3,5-7,1) \cdot 10^5$
Электроконтактная обработка	$(2,3-4,6) \cdot 10^5$
Электрохимическая обработка	$(4,25-4,35) \cdot 10^5$
Ультразвуковая обработка	$(6,0-36,0) \cdot 10^5$

4.2. Основные понятия процессов шлифования кругами из СТМ

Важным элементом, характеризующим обработку материалов кругами из СТМ, являются автоколебания. Автоколебания при шлифовании обусловлены нелинейной зависимостью силы резания от скорости внедрения зерна в обрабатываемый материал, тем самым, наличием участков «отрицательного трения». Амплитуда автоколебаний зависит от упруго-демпфирующих характеристик упругой системы, состояния рабочей поверхности круга, обрабатываемости материала и режимов резания. Амплитуда автоколебаний является обратно пропорциональной собственной частоте упругой системы станка. Амплитуда автоколебаний растет с повышением режимов шлифования, с ухудшением режущей способности круга и обрабатываемости материалу и снижается с увеличением демпфирования в упругой системе [180].

Амплитуда собственных колебаний шлифовальной бабки и заготовки на холостом ходу не должна превышать 3–4 мкм, а при алмазно-электрохимическом шлифовании – 9–10 мкм [181].

Автоколебания при электроабразивном и обычном шлифовании снижают стойкость круга и качество обработанной поверхности. Добавление ультразвуковых колебаний содействует очищению круга от отходов шлифования и самозатачиванию зерен, а также они могут гасить автоколебания, причиной которых является полиномиальная зависимость тангенциальной силы от скорости шлифования. Физическая сущность такого эффекта состоит в том, что в системе устанавливается такой режим периодических колебаний, при котором сумма квадрата амплитуды скорости автоколебаний и двойного квадрата амплитуды скорости вынужденных колебаний остается величиной постоянной. Отсюда следует, что увеличение амплитуды вынужденных колебаний приведет к снижению амплитуды скорости автоколебаний. В работе [233] показано, что чем материал является более труднообрабатываемым, тем для погашения автоколебаний необходима более высокая амплитуда ультразвуковых колебаний. В процессе электроабразивного шлифования необходима более низкая амплитуда ультразвуковых колебаний. Причем со снижением доли материала, срезаемого механическим резанием, погашение автоколебаний и увеличение стойкости круга и качества обработанной поверхности будет иметь место при более низкой амплитуде ультразвуковых колебаний. Ультразвуковые колебания изделия или шлифовального шпинделя с кругом необходимо возбуждать в тангенциальной плоскости с самого начала обработки, чтобы не возникала волнистость на круге и не снижалась стойкость круга и качество шлифованной поверхности. В целом, амплитуда ультразвуковых колебаний, при которой автоколебания исчезают, может быть уменьшена пу-

тем повышения частоты колебаний и демпфирующих свойств упругой системы. Она должна повышаться по мере затупления круга, а также с ростом доли материала, снимаемого при электроабразивной обработке за счет механического резания зернами [233].

Частота собственных колебаний станка в виде частоты собственных колебаний упругой системы станка (например – 3Г71) находится в пределах 0–500 Гц. При вращающемся шпинделе она несколько меньше, что объясняется снижением жесткости системы [180].

Частота собственных колебаний узлов шлифовальных станков находится у пределах 50–500 Гц. Для станков моделей 3Г71 та 3В642 частота автоколебаний шпинделя равна 660–720 Гц, стола – 150–210 Гц. На этих частотах возрастают амплитуда силы резания P_y , высота волн на круге, шероховатость обработанной поверхности, снижается режущая способность круга. При частоте колебаний круга 110–160 Гц на круглошлифовальных станках возможен резонанс в технологической системе. Колебания технологической системы формируют волнистость инструмента. Амплитуда волн увеличивается с возрастанием интенсивности колебаний [181].

Коэффициент шлифования является показателем работоспособности шлифовального абразивного инструмента. В США, Англии, ФРГ, Японии и других странах работоспособность инструмента из СТМ, по аналогии с обычным абразивным, характеризуют отношением объема снятого материала к объему использованного алмазо- или кубонитосодержащего рабочего слоя, а не алмаза или кубонита, как в странах СНГ). Этот показатель имеет название *Grinding Ratio* (коэффициент шлифования) и обозначается буквой – G . Переход от показателей коэффициента шлифования к более принятым в странах СНГ показателям удельного расхода СТМ (q_V , мг/см³) или относительного расхода СТМ (q_P , мг/г) может быть произведен по следующим формулам [127]:

$$G = 8,8 \cdot K \cdot \gamma_M^{-1} \cdot q_P^{-1}, \quad G = 8,8 \cdot K \cdot q_V^{-1};$$

$$q_P = 8,8 \cdot K \cdot \gamma_M^{-1} \cdot G^{-1}, \quad q_V = 8,8 \cdot K \cdot G^{-1},$$

где γ_M – плотность обрабатываемого материала, г/см³, K – относительная концентрация СТМ в рабочем слое круга.

Коэффициент абразивного резания как отношение составляющих усилий резания при шлифовании P_z к P_y ($fa = P_z/P_y$) является важнейшей характеристикой процесса резания при шлифовании (формула (4.1)). В литературе можно встретить его под термином – коэффициент шлифования, что не является правильным. Дело в том, что в теории резания отношение P_z/P_y имеет давно уже название – коэффициент резания. Ничем для шлифования он не отличается. Единственная разница состоит в том, что при шлифовании в отличие от процессов традиционного резания лезвие не одно, а их много, поэтому для шлифования он как был, так и остается –

коэффициент резания, но с одним уточнением – коэффициент абразивного резания, на что вполне правильно указано в учебнике [234]. А *коэффициент шлифования*, это другое понятие, установленное еще ГОСТ 21445-84, и выше это изложено. На это мы обратили внимание для того, чтобы избежать путаницы в терминах.

В работе [235] показано, что при микрорезании отношение P_z/P_y приобретает максимальные значения для мягких и вязких материалов, а минимальные для твердых и хрупких. В целом для всех материалов, чем больше угол заострения алмазного зерна, тем коэффициент стает меньшим и меньшей становится разница между мягкими и твердыми материалами. Выявлено, что для мягких и вязких материалов в зависимости от угла заострения конуса при микрорезании с определенной погрешностью отношения P_z/P_y подчиняются следующей зависимости: $P_z/P_y = 1,8(1 - 2\alpha/\pi)$, где 2α – угол (в радианах) заострения алмазного зерна, имеющего вид конуса, причем для микрорезания твердых и хрупких материалов необходимо такое значение P_z/P_y умножить на коэффициент 0,5. Авторами [236] показано, что с увеличением глубины микрорезания алмазным зерном стали ШХ15 отношение P_z/P_y растет, а это свидетельствует о снижении доли трения в общем процессе резания.

При скольжении алмазных и рубиновых полусфер отношение P_z/P_y является большим от 3 до 10 раз для рубина, который за своим составом и свойствами близок к природному корунду и электрокорунду. Для алмаза это отношение в условиях скольжения без смазки по разным материалам составляет: для меди – 0,15, для армко-железа – 0,09–0,13, для нормализованной стали 45 – 0,06–0,15, для закаленной стали 45 – 0,03–0,07, для чугуна СЧ 40-28 – 0,03–0,06. В ходе исследований [237] установлено, что при скольжении алмазного конуса по образующей цилиндра, изготовленного из стали 45 (скорость скольжения составила 50 м/с), на его вершине возникает хорошо отполированная площадка, у края которой, из-за статических электроразрядов налипают порошок графита. В процессе трения от образца отрываются тонкие металлические пленки, свидетельствующие об усталостном разрушении поверхностных слоев [237].

С увеличением угла заострения зерен и, соответственно снижением переднего угла, отношение P_z/P_y будет возрастать. Данные работы [238], пересчитанные на коэффициент абразивного резания, получены для условий микрорезания алмазным зерном АСК 315/250 (рис. 4.1).

Чим больше отношение сил P_z/P_y отличается от величины коэффициента трения, тем эффективнее режет круг. С повышением скорости резания при обработке твердого сплава и минералокерамики отношение fa снижается. При алмазной обработке стали Р18 повышение скорости приводит к увеличению этого отношения. Отношение fa у кругов на металли-

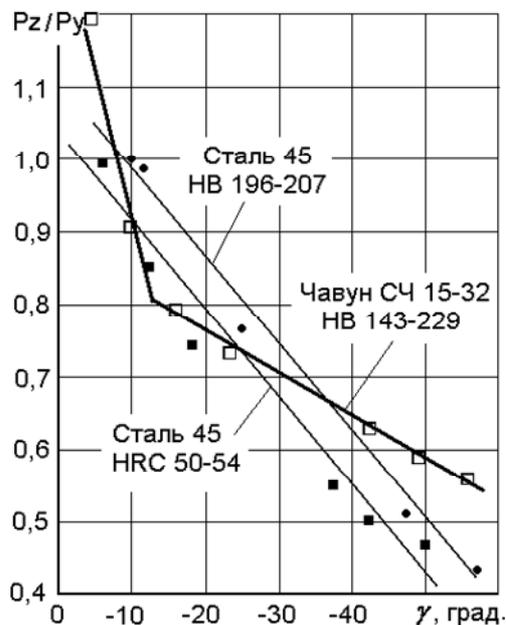


Рис. 4.1. Зависимость отношения P_z/P_y от значения переднего угла алмазного зерна [238]

гач алмазов АС6 до АС15 и зернистости от 100/80 до 200/160 [240].

Для процесса алмазного бесцентрового наружного шлифования изделий из твердых сплавов установлено, что наибольшие значения fa характерны для алмазных кругов на связке М1-04, а наименьшие – для абразивных кругов из карбида кремния (КЗ) [241]. При шлифовании абразивными кругами коэффициент абразивного резания составляет 0,26–0,32 для закаленной и 0,50–0,67 для незакаленной стали [64].

В литературе приведены данные по обработке стальных изделий с использованием кругов из КНБ. Так, в работе [242] показано, что с повышением скорости цапаания стали 45 от 20 до 120 м/с отношение P_z/P_y снижается в 1,7 раза за счет более быстрого снижения составляющей P_z . Логично предположить, что если формирование новой поверхности при цапании и шлифовании происходит в направлении вектора тангенциальной составляющей усилия цапания–шлифования, то именно ее величина становится определяющим фактором начала стружкообразования. В свою очередь, нормальная составляющая, обеспечивая необходимую для микрорезания глубину внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал, деформирует и упрочняет его до степеней деформации, которые являются меньшими, чем начало разрушения. Смысл отношения P_z/P_y лежит в том, что оно оценивает вклад полезной работы резания–диспергирования относительно работы внедрения зерен в обрабатываемый материал и их взаимного трения. Чем большей является величина P_z/P_y , тем более опти-

ческой связке М2-01 больше, чем у кругов на связке В2-01. С ростом поперечной подачи fa увеличивается [206].

Расчеты показывают, что при абразивной обработке хрупких неметаллических материалов (ситаллов) при отношении $P_z/P_y=0,167$ на разрушение обрабатываемого материала приходится менее 15 % подведенной энергии, тогда как при $P_z/P_y=0,286$ эта часть составит 25 %. Это свидетельствует о том, что с точки зрения эффективного использования подведенной энергии лучше чтобы составляющая P_y была бы минимальной [239]. В случае шлифования керамики Силинит-Р отношение P_z/P_y будет повышаться при увеличении глубины шлифования и снижаться при переходе от использования в кру-

мальными являются условия шлифования с точки зрения работы резания и работы трения, которая обычно имеет преимущество в энергетическом балансе шлифования. Как же изменяются значения отношения P_z/P_y ? Так, с ростом зернистости эльбора в кругах на связке В2-01 от 50/40 до 250/200 fa снижается от 0,35 до 0,26. С увеличением концентрации эльбора в кругах на связке КБ от 25 до 100 % fa растет от 0,24 до 0,40, а при дальнейшем повышении концентрации от 100 до 200 % fa снижается от 0,40 до 0,25 [243]. Повышение поперечной подачи при глубинном шлифовании кубонитовыми кругами быстрорежущих сталей приводит к увеличению fa [244]. Для плоского глубинного шлифования стальных изделий с повышением скорости резания коэффициент fa снижается [205].

Известно [245], что при механической обработке в станочной технологической системе возникают упругие перемещения, которые приводят к снижению точности обрабатываемых поверхностей. Следовательно, основными направлениями повышения точности обработки являются повышение жесткости в технологической системе и снижение силовой напряженности процесса резания. Показано [245], что снизить величину упругого перемещения δ , например, при круглом наружном врезном шлифовании, можно за счет снижения постоянной времени образования упругого перемещения в технологической системе, а сама величина этого перемещения определяется как:

$$\delta = \sigma \cdot B_1 \cdot v_d \cdot t / (c \cdot fa \cdot v_k),$$

где σ – условное напряжение резания, fa – коэффициент абразивного резания, c – приведенная жесткость технологической системы, v_k – скорость круга, v_d – скорость детали, B – ширина шлифования, t – глубина шлифования.

В этой формуле есть коэффициент fa и видно, что чем он больше, тем величина упругого перемещения в технологической системе будет меньшей. В свою очередь известно [245], что указанный коэффициент связан с соотношением толщины среза зерном с радиусом его закругления и увеличение этого соотношения повышает и коэффициент fa .

Обратим внимание на то, что при режущем зерне соотношение P_z/P_y характеризует передний угол γ эквивалентного индентора [246]. При этом эквивалентным индентором является индентор правильной геометрической формы, работа которого описывается такой же системой уравнений движения, как и работа реального шлифовального круга. Сила P_z идет на раздробление материала (без трения), а сила P_y – на оттеснение индентора. При затупленных, с площадками износа, зернами, это соотношение снижается и приближается к коэффициенту трения. В процессе шлифования коэффициент абразивного резания может изменяться в пределах от значения

коэффициента при резании и коэффициента при трении, или оставаться неизменным [246].

Угол сдвига при микрорезании является одним из факторов процесса резания зернами СТМ. Так, при микрорезании стали ШХ15 алмазным зерном с передним отрицательным углом в 50° и радиусом округления вершины в 5 мкм при скорости микрорезания в 15 м/с и глубине 0,1 мм среднее значение угла сдвига для алмазной обработки составляет $16,3^\circ$, для алмазно-электрохимической с отрицательной полярностью – $14,5^\circ$, для алмазно-электрохимической обработки с положительной полярностью – $12,9^\circ$ [247]. Угол сдвига при обычном шлифовании – от 8 до 20° [248].

Выступление зерен при шлифовании также является важным фактором, поскольку выступание зерна, и в определенной степени глубина его заделки и устойчивость, является следствием действия трех факторов: геометрического распределения алмазов по высоте, износа их и связки. Чем большей является зернистость, тем большим является выступание. Так, увеличение зернистости в 1,6 раза с 250/200 до 400/315 повышает выступание зерен приблизительно также в 1,6 раза. Увеличение производительности обработки в 2 раза позволяет повесить выступание зерен в 1,3–1,6 раза на малых производительностях и в 1,1–1,2 на больших производительностях. Реальное выступание зерен составляет от 12 до 25 % от значения максимальной зернистости шлифпорошка. Для металлической связки М2-09 повышение прочности зерен с АС6 до АС15 увеличивает на 20–25 % выступание зерен [249]. Снижение времени контакта зерна с обрабатываемым материалом является эффективным элементом сохранения высоты выступления зерен. Со снижением концентрации шлифпорошка в рабочем слое со 100 до 25 % при шлифовании выступание зерен уменьшается. Для 100 % такое выступание составляет около 20 % от значения максимальной зернистости шлифпорошка, при 50 % – ~ 13 %, при 25 % – ~ 8 % [250].

Критическое закрепление зерна характеризует минимальное заглубление зерна в связку, которое еще закреплено в связке и еще может воспринимать нагрузку при резании. Зависит от зернистости СТМ, например КНБ, причем, чем большим является зерно, тем меньшей является необходимая величина критического закрепления. Повышение производительности обработки приводит к снижению развитости рельефа мелкозернистых кругов и повышению ее в крупнозернистых. Как следствие, количество зерен зернистостью 80/63 становится даже меньшим, чем зерен зернистостью 160/125, хотя из опубликованных источников известно, что с увеличением зернистости количество зерен на поверхности круга должно снизиться. Это следует отнести на счет вырыва мелких зерен, для устойчивой работы которых необходима большая величина критического закрепления. По основе расчетов установлено, что отношение величин критического за-

крепления зерен КНБ зернистостей 160/125, 125/100, 100/80, 80/63 равняется 1 : 1,3 : 1,6 : 1,9, и, тем самым, при стационарных процессах обработки режущие свойства зерна 160/125 будут приблизительно в 2 раза использованы больше, чем зерна 80/63 [251].

Под действием усилия шлифования может происходить осаждение зерна в связке. При схеме, когда на зерно эллипсоид ($b = 0,8a$) влияет нормальное усилие P , то величину такого осаждения можно оценить как [252]:

$$\varepsilon = P/(2\mu a p^*),$$

где μ - модуль сдвига материала связки, a - большая полуось эллипсоида, p^* - коэффициент, зависящий от коэффициента Пуассона (ν) связки:

ν	0,25	0,30	0,35	0,40
p^*	2,934	3,019	3,125	3,236

Видно, что увеличение коэффициента Пуассона материала связки от 0,25 до 0,40 приводит к повышению жесткости связки на 10–13 % [252].

Зазор в контакте между кругом и обрабатываемым изделием рассчитывается, согласно [253] из условий размещения срезаемой стружки. При этом, объем зазора должен быть большим за объем стружки: $V_z > k_{ст} \cdot V_{ст}$, где $k_{ст}$ - коэффициент объемного заполнения зазора стружкой ($k_{ст} = 30-200$).

Контактные напряжения в зоне контакта алмазного зерна с материалом при микрорезании зависят от обрабатываемого материала. Так для закаленных сталей склонных к наклепу (диапазон HB , Н/мм² 1170–3290) они составляют $\sigma_k = 1,22 \cdot HB$, Н/мм² [183, 254]. Интенсивность напряжений при шлифовании стали 12Х18Н10Т определена как 2,2 ГПа. При высоких температурах и со снижением толщин среза (возрастание скорости шлифования) напряжения сдвига при стружкообразовании стабилизируются и переходят к диффузионной ползучести, что соответствует теоретическому сопротивлению кристалла на сдвиг, определяемому по формуле [116]: $\tau_{max} = G/2\pi$, где G - модуль сдвига.

Значения модуля сдвига для стали 12Х18Н10Т при температуре контакта составляют 35 ГПа, и, соответственно, τ_{max} будет 6 ГПа. Теоретическая прочность кристалла α -Fe на сдвиг составляет 6,6 ГПа. Таким образом, можно предположить, что при шлифовании стали сопротивление деформации находится в пределах 2,2–6,6 ГПа, причем большие значения из-за дефектности кристаллического состояния реальных сталей являются менее вероятными, хотя и могут быть достигнуты при увеличении скорости шлифования [116].

Работа при шлифовании расходуется как на удаление припуска, так и на преодоление трения в зоне резания. Работа, расходуемая при шлифовании на пластическую деформацию срезаемого слоя, составляет 18–25 % от суммарной работы шлифования [242]. Для плоского глубинного шлифова-

ния стальных изделий удельная работа шлифования с повышением скорости резания увеличивается, а с повышением удельного съема металла — уменьшается. Работа по попутной схеме шлифования приводит к снижению составляющих усилия резания в 1,2–1,6 раза и удельной работы в 1,3–1,7 раза в сравнении со встречной схемой [205].

Зерна электрокорунда белого осуществляют процесс резания с расходом работы в 1,18–1,55 раза меньшим, чем зерна нормального электрокорунда. Зерна нормального электрокорунда имеют в 1,31–1,51 раза меньшую удельную работу, чем зерна циркониевого электрокорунда. Соотношения между удельными работами резания при шлифовании для сталей 40Х, ШХ15 и Р6М5 имеют вид – 1 : 1,4 : 1,7 [255].

Распределение тепла при шлифовании вызвано теплоотводом по четырем направлениям – в круг, обрабатываемый материал, стружку и охлаждающую жидкость. В работе [256] отмечается, что при шлифовании большая часть работы резания превращается в теплоту. При этом, 5–50 % тепла переходит в обрабатываемую деталь, 5–15 % в инструмент и 35–90 % в стружку. На эти соотношения преимущественное влияние оказывает скорость резания.

В работе [216] показано, что температура при шлифовании определяется главным образом условным напряжением резания:

$$\theta = 2 \cdot R_{cm} / (c \cdot \rho \cdot fa),$$

где R_{cm} – предел прочности на сжатие, c – удельная теплоемкость и ρ – плотность обрабатываемого материала, fa – коэффициент абразивного резания.

Доля тепла в изделии зависит от режимов обработки и характеристики круга и колеблется в пределах 10–34 % от общего количества тепла. Меньшие значения относятся к металлическим связкам и обработке с охлаждением, большие – к «сухому» шлифованию кругами на полимерных связках [257]. При абразивном шлифовании распределение тепла является следующим: в изделие идет от 57 до 84 %, в шлифовальный круг – от 11 до 43 %, в стружку – от 3 до 20 %, в смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) – от 4 до 13 % [258]. Общее количество тепла при абразивном шлифовании оценивается по количеству тепла в стружке: 4,187 кДж/г при внешнем круглом шлифовании с продольной подачей и 8,374 кДж/г при врезном. Это значительно больше, чем при сверлении (0,29–0,42 кДж/г) и фрезеровании 0,50 кДж/г) [259].

Увеличение теплопроводности круга не влияет на общее количество тепла, а только изменяет тепловой баланс в зоне резания: повышает долю тепла, идущего в круг, и снижает количество тепла, идущего в деталь. Так, при плоском шлифовании титанового сплава ВТ3-1 – при $\lambda = 2,236$ Вт/(м·К) 82 % тепла идет в деталь, 9 % идет в круг, 5 % в СОТС, 4 % в стружку. При

$\lambda=4,472$ Вт/(м·К) – 70 % тепла идет в деталь, 21 % идет в круг, 5 % в СОТС, 4 % в стружку, а при $\lambda= 8,141$ Вт/(м·К) 62 % тепла идет в деталь, 30 % идет в круг, 5 % в СОТС, 3 % в стружку [259].

При работе алмазным зерном в него уходит значительно большее количество тепла (20–40 %), чем в зерна абразива (5–18 %), поэтому температура на вершинах абразивных зерен имеет высокие значения (1000–1500 °С), в то же время, как на вершинах алмазных зерен при одинаковых условиях (300–500 °С). При шлифовании обычным абразивом в деталь уходит 40–80 % тепла и в стружку 42–15 %, а при работе алмазным зерном – 35–65 % и 15–25 % соответственно [18].

При обработке пластмасс резанием источниками тепловыделения являются: трение – 60 %, деформация – 30 %, механохимические преобразования в полимере – 10 %. Каналами отвода теплоты от зоны резания являются: режущий инструмент – 90 %, стружка – 4 %, изделие (пластмасса) – 6 % [260].

Увеличение демпфирования в технологической системе вызывает снижение теплонапряженности процесса шлифования. Снижение динамической жесткости резания является эффективным способом снижения теплонапряженности процесса шлифования [180].

Теплоотдача зерна в связку является важным элементом регулирования температуры в зоне обработки при шлифовании. Известно [46], что тело, которое имеет среднюю температуру поверхности $\Theta_{\text{ср}}$, отдает в среду с температурой Θ_0 следующее количество тепла: $Q=(\Theta_{\text{ср}}+\Theta_0)/R$, где R – термическое сопротивление тела. Для тела с коэффициентом изотермичности α , находящимся в массиве: $R \approx \frac{1}{2\pi\lambda_1 x} \ln \frac{2,94}{\alpha}$, где λ_1 – коэффициент теплопроводности массива (связки), в котором находится зерно, x – максимальный размер зерна.

Коэффициент теплопроводности связки значительно больше влияет на темп изменения температуры зерна при шлифовании торцом круга, чем его периферией. Круги на полимерных связках имеют коэффициенты теплопроводности, которые колеблются в пределах 0,8–2,5 Вт/(м·К), и такие колебания могут привести при обработке торцом круга к изменениям темпа увеличения температур приблизительно на 29 %, а при плоском шлифовании получаем изменение темпа всего на 8 %. Соответственно, теплофизические характеристики для кругов типа 12А2-45° являются значительно более важными, чем для кругов 1А1. Исследования показывают также то, что при отношении коэффициента теплопроводности связки к теплопроводности абразиву больше 0,1, первый практически не влияет на изменение температуры режущих зерен. Это означает, что с точки зрения тепло-

физики процесса, обеспечение величины λ_1 большей 15 Вт/(м·К) не имеет смысла. Для мелкозернистых кругов величина λ_1 имеет большее значения, чем для крупнозернистых. При равных условиях круги из КНБ менее чувствительны к изменению теплопроводности связки, чем алмазные. Однако при тяжелых условиях работы, например при большой длине реза и для кругов из КНБ, теплофизические свойства связки уже имеют существенное значение [46].

4.3. Положение о критической производительности шлифования

Критическая производительность при шлифовании вызвана формоизменениями режущей поверхности круга при шлифовании и характеризует переход от шлифования с резервом площади рабочей поверхности круга к шлифованию с отсутствием такого резерва [62]. С учетом изменений профиля рабочей поверхности круга в радиальном и окружном направлении реальная площадь режущей поверхности круга, ответственная за сьем материала за оборот круга при жестком торцевом шлифовании, снижается до 40 % от общей. А следовательно, если далее повышается производительность обработки возникает недостаток площади режущей поверхности и, как следствие, возрастают нагрузки в зоне контакта. Таким образом, на кривой «производительность–износ» (рис. 4.2) можно наблюдать две зоны: стабильного износа (С), когда на поверхности круга в радиальном направ-

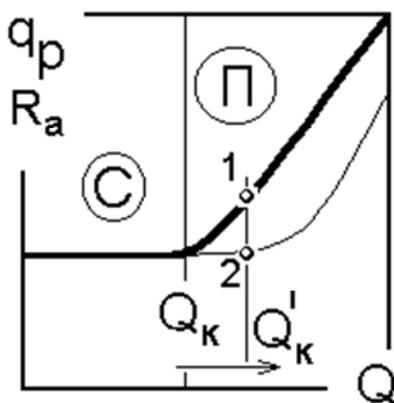


Рис. 4.2. Характерная зависимость износа круга (q_p) и шероховатости обработанной поверхности (Ra) от производительности обработки при шлифовании с продольной подачей [62]

лении еще происходят определенные формоизменения, и повышенного износа (П), где отсутствует какое-либо формоизменение режущей поверхности, разделенные перегибом кривой $Q-q_p$. На такие изменения режущей поверхности круга почти не обращается внимание, поэтому в большинстве случаев исследователи для экспериментов берут круг не с исходной формой, а с любой другой. Работают, как правило, игнорируя формоизменения, в широком диапазоне производительностей (в том числе, и в зоне П) и, как следствие, износ круга у них растет с повышением производительности. Вести поиск путей снижения износа кругов для конкретной производительности при таком подходе невозможно, поскольку выход только один — снижение производи-

тельности. В работе [62] предложен другой подход, на основе учета формоизменений, сформулированный в следующем положении.

Характерный перегиб кривой «производительность шлифования – износ круга» при торцевом шлифовании с продольной подачей является границей между зоной работы круга с наличием явления формоизменения режущей поверхности в радиальном направлении и зоной отсутствия такого явления, а производительность, соответствующая этому перегибу, определена как критическая производительность шлифования.

Данное положение дало возможность вести поиск путей снижения износа круга в направлении повышения значения критической производительности, а это, в свою очередь, позволяет перевести износ круга из т. 1 в т. 2 (рис. 4.2). Реальную возможность это сделать дает анализ полученной на основе этого положения и теории абразивного износа зерен Крагельского формулы для расчета величины критической производительности шлифования. Производительность, соответствующая границе (рис. 4.2) названа критической [62]. Это как раз и связано с той концепцией, которая изложена выше, о том, что с превышением производительности за критическую необходимо принять меры к снижению износа кругов.

Для определения путей повышения износостойкости кругов из СТМ при высоких производительностях рассмотрено влияние самих зерен НТМ на их износ. Известно [261], что разрушение абразивной частички наступит при условии равенства нагрузки, вызывающей разрушение частички, и нагрузки, действующей на нее со стороны обрабатываемого материала или $H_p = P_m$. Нагружение H_p обусловлено механической прочностью абразивного зерна (разрушающей нагрузкой при сжатии). Нагрузку P_m для пластического контакта, имеющего место в данном случае, можно найти из формулы $P_m = A_r \cdot H_M$ [261]. Тогда $H_p = A_r \cdot H_M$, а $A_r = H_p / H_M$.

Известно [262], что интенсивность изнашивания может быть выражена через отношение объема изношенного материала к фактической площади контакта и длины пути изнашивания: $I_h = \Delta V / (A_r \cdot L_1)$. Применительно к приведенным выше условиям интенсивность износа абразивных зерен может быть выражена в следующем виде:

$$I_{ha} = (\Delta V / L_1 \cdot H_M / H_p).$$

Укажем, что в основу этой формулы положено допущение, что отношение $\Delta V / L_1$ для совокупности зерен круга равняется этому же отношению для единичного зерна, поскольку считали [62], что одинаковое количество зерен изнашивалось на величину – ΔV и прошло путь изнашивания – L_1 . Анализ приведенной формулы позволяет утверждать, что интенсивность износа зерен СТМ при заданных материале и производительности обработки определяется их прочностью – H_p . С повышением прочности зе-

рен интенсивность их износа снижается, тем самым снижается и износ круга. Учитывая, что разрушающая нагрузка зерен КНБ, а также алмазов марок АС2–АС6 малых зернистостей почти в 2 раза является меньшей, чем нагрузка вырывания зерен СТМ из металлической связки, необходимо иметь возможность расчета прочности зерен для конкретных условий шлифования. Для решения этого вопроса, с учетом механизма формообразования, изложенного выше, представлен [62] объем изношенных зерен СТМ, принимающих участие с съеме припуска, как произведение линейного износа на площадь круга, занятую зернами. После преобразований, с учетом формоизменения площади режущего слоя круга, он равняется:

$$\Delta V = \pi S_{\Pi} (D - S_{\Pi} / \operatorname{tg} \varphi) \Delta l_3 K / (400 \operatorname{tg} \varphi).$$

Для определения длины изнашивания мысленно разделим, по аналогии с работой [262], поверхность износа на полоски вдоль направления скольжения-резания шириной \underline{b} , где \underline{b} – средневероятная ширина зерна в направлении, перпендикулярном направлению скольжения-резания. Согласно [68] $\underline{b} = 1,125 \cdot Z \cdot \alpha$, где α – коэффициент изометричности зерна. Длина каждой такой полоски – это гипотетический путь изнашивания одного зерна от начала до конца работы круга при условии, что оно изнашивалось без вырыва из связки. Фактически это сумма путей изнашивания зерен на определенной полосе ГРК круга. В целом, длину пути изнашивания можно представить в виде: $L_1 = \Delta l \cdot k_3 \cdot k_{\Pi} \cdot k_d$ где Δl – длина контакта, $k_3 = S_{\Pi} / (1,125 \cdot Z \cdot \alpha \cdot \sin \varphi)$ – отражает количество зерен СТМ, расположенных на образующей главного режущего конуса круга, принимающих участие в процессе изнашивания; $k_d = b v_k / (\pi D S_{\Pi})$ – отражает суммарную длину дуги изнашивания за один проход круга; $k_{\Pi} = V_M / (S_{\Pi} h b)$ – отражает суммарное число проходов по обрабатываемой поверхности. В общем виде длина пути изнашивания равна:

$$L_1 = v_k V_M \left(D - \frac{2S_{\Pi}}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \arcsin \left(\frac{h}{D - \frac{2S_{\Pi}}{\operatorname{tg} \varphi}} \right) / (0,5625 k_{CT} D S_{nod} h Z \sin \varphi).$$

Для перехода от полосок изнашивания зерен СТМ к содержанию их в круге, на основе соответствия интенсивностей износа принято допущение, что $I_{ha} = q_p \cdot \gamma_M / \gamma_{HTM}$. С его учетом, а также сведением выражений, приведенных выше, с помощью преобразований получено уравнение для расчета критической производительности шлифования:

$$Q = k_F k_H k_{\text{пер}} \frac{S_{\Pi} \left(D - \frac{2S_{\Pi}}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \arcsin \left(\frac{h}{D - \frac{2S_{\Pi}}{\operatorname{tg} \varphi}} \right)}{0,5625 \alpha D \sin \varphi} \cdot \frac{H_P \cdot v_k}{Z \cdot H_M}.$$

В работе [62] дополнительно указано, что при выводе этой формулы были приняты допущения, которые в определенной степени не учитывали указанные в разделе 3 формоизменения режущей поверхности круга и реальный наклон зерен в режущем слое круга. Поэтому, это дополнительно учтено введением коэффициента неполного использования режущей поверхности круга за его оборот ($k_F = 0,4$ – для жесткого торцевого шлифования, $k_F = 0,55$ – для упругого и врезного торцевого шлифования), а также коэффициентом k_H , учитывающим снижение реального количества зерен, ответственных за сьем припуска, вызванного их реальным наклоном в рабочем слое, и коэффициентом k_{cp} , учитывающим снижение величины сечения среза зерном, вызванное его наклоном.

Из представленного выше уравнения можно получить уравнение, отражающее для конкретной производительности критическую, или оптимальную скорость вращения круга:

$$v_k = \frac{0,5625 k_{CT} D \sin \varphi}{k_F k_H k_{пер} S_{II} (D - \frac{2S_{II}}{\operatorname{tg} \varphi}) \arcsin(\frac{h}{D - 2S_{II} / \operatorname{tg} \varphi})} \cdot \frac{Q \cdot Z \cdot H_M}{H_P}$$

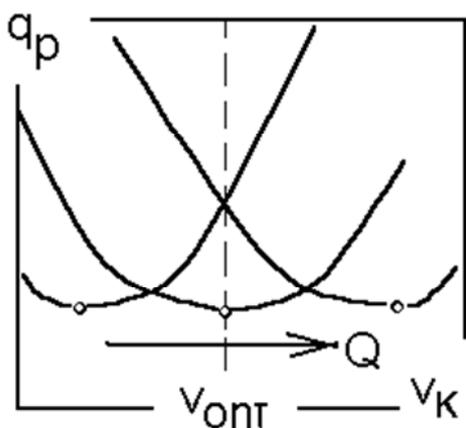


Рис. 4.3. Типичная зависимость относительного расхода СТМ от скорости круга

Рассмотрим некоторые особенности влияния скорости круга на показатели шлифования, представленные в этой формуле и рис. 4.3. Кривая «скорость–износ» имеет классическую экстремальную форму. Скорость, при которой наблюдается минимальный износ круга, принимается исследователями в качестве оптимальной (рис. 4.3). Так, например, при глубинном электрошлифовании быстрорежущих сталей такой скоростью является 30 м/с [71]. Снижение v_k относительно критической приводит к образованию устойчивого треугольного профиля режущей поверхности круга, о чем можно судить по стабилизации угла наклона главного режущего конуса. При этом возрастает толщина среза на оборот круга, что приводит к увеличению нагрузок на режущие зерна, снижению величины промежутка между кругом и обрабатываемым материалом, ухудшению условий размещения стружки в нем и, как следствие, повышению износа круга. Анализ формулы расчета скорости показывает, что с ростом производительности шлифования оптимальная скорость резания сдвигается в

Рассмотрим некоторые особенности влияния скорости круга на показатели шлифования, представленные в этой формуле и рис. 4.3. Кривая «скорость–износ» имеет классическую экстремальную форму. Скорость, при которой наблюдается минимальный износ круга, принимается исследователями в качестве оптимальной (рис. 4.3). Так, например, при глубинном электрошлифовании быстрорежущих сталей такой скоростью является 30 м/с [71]. Снижение v_k относительно критической приводит к образованию устойчивого треугольного профиля режущей поверхности

большую сторону, а при снижении – в меньшую (рис. 4.3), т.е. чем выше нагрузка на режущий слой, тем больше сдвигается оптимальный минимум скорости резания в область более высоких скоростей. Следовательно, эксперименты по определению оптимальной скорости резания при шлифовании обязательно должны быть связаны с учетом формообразования режущей поверхности круга.

4.4. Межэлектродный промежуток при электрошлифовании кругами из СТМ

Межэлектродный промежуток (МЭП) при электрошлифовании кругами из СТМ определяется с учетом коэффициента критического удержания зерна в связке круга (ε), средневероятной толщины срезаемого кругом слоя ($\overline{a_z}$) и глубины электрохимического растворения (Δ) материала [117].

При электрохимическом шлифовании характерным является возникновение электрохимической ячейки, включающей поверхности круга, обрабатываемого изделия и технологическая среда. Для анализа электрохимических процессов, происходящих в ячейке, необходимо определить ее основные параметры, среди которых наиболее важной является величина межэлектродного промежутка. Традиционно она исследователями принимается равной 0,2...0,3 от среднего размера зерен СТМ в круге или величины их выступания над поверхностью связки [263]. Однако в этих случаях не учитывается толщина срезаемого слоя, а это приводит к определенным погрешностям при определении плотности тока электрохимической составляющей.

Для случая плоского торцевого шлифования МЭП рассчитывали [117] по формуле: $\delta = \overline{x}(1-\varepsilon) - \overline{a_z} + \Delta$. Величину $\overline{a_z}$ определяли, исходя из следующего. Производительность шлифования равна произведению средневероятного объема срезаемого слоя V_z на количество зерен, принимающих участие в процессе резания за единицу времени: $Q = V_z \cdot z$. Приняли ширину срезаемого слоя, как $\overline{b_z} = 2\overline{a_z} \operatorname{tg}(\beta/2)$ и тогда его средневероятный объем как $V_z = 2\overline{a_z}^2 h \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)$. Количество зерен, принимающих участие в процессе резания за единицу времени определяется из уравнения $z = n_p \cdot S_K \cdot n$. Средневероятное количество активных режущих зерен на единице поверхности круга можно определить по формуле [264]:

$$n_p = 5,65 \cdot 10^{-3} \beta^* K (1-\varepsilon) / (\overline{x}^2 \sqrt{v}),$$

где $v = 3,18 \cdot 10^{-2} v_k B h K (1 - \varepsilon)^3 / Q$ – безразмерная характеристика процесса шлифования [264]. С учетом приведенных выше уравнений и преобразований определили средневероятную толщину срезаемого слоя [117]:

$$\bar{a}_Z = 2,538 \bar{x} \left(\frac{Q}{K v_k B h} \right)^{0,25} \left(\frac{D \operatorname{ctg}(\beta/2)}{\beta^* (D - B)} \right)^{0,5} (1 - \varepsilon)^{0,25}.$$

Величину линейного электрохимического растворения определили [117], исходя из следующих допущений. Считали, что за оборот круга глубина растворения равняется разнице между конечным (δ_k) и начальным (δ_0) МЭП. Согласно [265], время удаления материала за счет анодного растворения и увеличения МЭП равно:

$$\bar{a}_Z = 2,538 \bar{x} \left(\frac{Q}{K v_k B h} \right)^{0,25} \left(\frac{D \operatorname{ctg}(\beta/2)}{\beta^* (D - B)} \right)^{0,5} (1 - \varepsilon)^{0,25},$$

где $\delta_T = 0,5(\delta_k - \delta_0)$ – текущий МЭП. После преобразований это уравнение будет в виде $\tau_a = \Delta / (\eta \varepsilon_V j_{EX})$. Поскольку время анодного растворения в условиях непрерывного съема материала при электрошлифовании не превышает $\tau \leq \pi D / v_k$, то в окончательном виде уравнение для определения величины электрохимического съема будет в виде: $\Delta = \pi \eta \varepsilon_V j_{EX} D / v_k$.

С учетом приведенных выше уравнений и преобразований получаем формулу для расчета величины МЭП применительно к условиям электрохимического шлифования кругами из СТМ:

$$\delta = \bar{x} [1 - \varepsilon - 2,538 \left(\frac{Q}{K v_k B h} \right)^{0,25} \left(\frac{D \operatorname{ctg}(\beta/2)}{\beta^* (D - B)} \right)^{0,5} (1 - \varepsilon)^{0,25}] + \pi \eta \varepsilon_V j_{EX} D / v_k, \text{ м}$$

Анализ формулы показывает, что величина МЭП при плоском шлифовании торцом круга определяется зернистостью (\bar{x}) и относительной концентрацией (K) зерен НТМ, коэффициентом заглубления зерна в связку (ε), производительностью обработки (Q), скоростью вращения круга (v_k), размерами его режущей поверхности. С ростом производительности шлифования, коэффициента заглубления и угла заострения (β) зерен промежуток уменьшается, в то же время как повышение зернистости – его увеличивает. В формулу также входят: коэффициент распределения зерен (β^*), толщина обрабатываемого изделия (h), внешний диаметр (D) и ширина режущей поверхности (B) круга, а также показатели электрохимического растворения: электрохимический эквивалент обрабатываемого материала (ε_V), плотность электрохимического тока в промежутку между электродами (j_{EX}) и значения выхода по току (η).

4.5. Расчет плотности общего технологического тока при электрошлифовании кругами из СТМ

Расчет плотности общего технологического тока при электрошлифовании базируется на расчетах его составляющих – плотностей электрохимического и электроконтактного токов.

Расчет плотности электрохимического тока при электрошлифовании кругами из СТМ основывается на том, что плотность тока в промежутке между электродами составляет:

$$j_{EX} = \frac{U - (\Delta\varphi_a + \Delta\varphi_k)}{\delta} \chi, \text{ А/м}^2, \text{ где } (\Delta\varphi_a + \Delta\varphi_k) -$$

стандартные потенциалы электродов, χ – электропроводность электрохимической ячейки между электродами, U – величина электрического напряжения между электродами, δ – межэлектродный промежуток.

Плотность тока электрохимической составляющей определена [117] в виде:

$$j_{EX} = \frac{-xN + \sqrt{(xN)^2 + 4M[U - (\Delta\varphi_a + \Delta\varphi_k)]\chi}}{2M}, \text{ А/м}^2$$

где, для снижения громоздкости, введены показатели

$$N = 1 - \varepsilon - 2,538 \left(\frac{Q}{Kv_k Bh} \right)^{0,25} \left(\frac{D \operatorname{ctg}(\beta/2)}{\beta^* (D-B)} \right)^{0,5} (1 - \varepsilon)^{0,25} \quad \text{и} \quad M = \pi \eta \varepsilon_V D / v_k.$$

В эти уравнения входят зернистость (\bar{x}) и относительная концентрация (K) СТМ, коэффициент заглубления зерна в связку (ε), производительность обработки (Q), скорость вращения круга (v_k), угол заострения (β) зерен СТМ, коэффициент распределения зерен (β^*), толщина обрабатываемого изделия (h), внешний диаметр (D) и ширина режущей поверхности (B) круга, а также показатели учета электрохимического растворения: электрохимический эквивалент обрабатываемого материала (ε_V), плотность электрохимического тока в промежутке между электродами ($j_{эx}$) и выход по току (η).

Рассмотрены конкретные примеры [117] определения плотности электрохимического тока при электрохимическом шлифовании стали Р6М5 кругами из КНБ. Исходные данные: круг 12А2-45° 150×10×3–КР 100/80–М2-12Е–100; $Q = 2 \cdot 10^{-8}$ м³/с; $h = 0,008$ м; $v_k = 30$ м/с; $\varepsilon = 0,8$; $x = 9 \cdot 10^{-5}$ м; $U = 8$ В; электролит (масс. %) – NaNO₃ – 5,0, NaNO₂ – 0,5, остальное – вода; $(\Delta\varphi_a + \Delta\varphi_k) = 0,220 + 0,353 = 0,563$ В; $\varepsilon_V = 0,241 \cdot 10^{-10}$ м³/(А·с); $\beta^* = 1,1$; $\beta = 109^\circ$; $\chi = 1,116$ Ом⁻¹м⁻¹; $\eta = 0,1$. Расчетная плотность электрохимического тока, рассчитанная по указанной выше формуле, равна $0,523 \cdot 10^6$ А/м². Реальная плотность технологического тока для условий

глубинного электрохимического шлифования стали Р6М5, определенная в эксперименте [117] составляет $3,893 \cdot 10^6$ А/м² и, таким образом, доля электрохимического тока в общем технологическом токе составляет 13,4 %. Данные по расчету соотношения доли расчетного электрохимического тока в экспериментальном технологическом при электрохимическом шлифовании быстрорежущей стали Р6М5 кругами из КНБ с использованием разных составов электролитов приведены в табл. 4.1 [117], из которой видно, что доля электрохимическом токе в общем технологическом составляет только 8–15 %, что подтверждается также независимыми экспериментальными данными работы [266].

Расчет плотности электроконтактного тока при электрошлифовании кругами из СТМ базируется на том, что при электрохимическом шлифовании кругами из СТМ непосредственный пробой промежутка является небольшим, а определяющим является инициирование разрядов стружкой [71].

Таблица 4.1. Соотношения электрохимического расчетного и общего технологического тока при электрохимическом шлифовании кругами из КНБ в разных водных электролитах (12А2-45° 150×10×3–ЛКВ10–МО13Э–100, $v_K = 30$ м/с; $S_{пр} = 0,4$ м/мин; $S_{ш} = 0,5$ мм/дв.х.; $U = 8$ В)

Состав электролита и содержание солей в масс. %	Технологический ток, А	Плотность технологического тока, $\cdot 10^6$ А/м ²	Расчетная плотность электрохимического тока, $\cdot 10^6$ А/м ²	Доля электрохимического тока в общем, %
NaNO ₃ 5,0 NaNO ₂ 0,5	165	3,667	0,465	12,7
NaNO ₃ 5,0 NaNO ₂ 0,3 Na ₂ CO ₃ 0,5 Глицерин 2,1	160	3,555	0,362	10,2
NaNO ₃ 5,0 NaNO ₂ 3,0 Na ₂ B ₄ O ₇ 1,0	185	4,112	0,343	8,3
NaNO ₃ 5,0 NaNO ₂ 2,0 Na ₂ HPO ₄ 3,0	120	2,667	0,379	14,2
NaNO ₃ 5,0 NaNO ₂ 3,0 Na ₃ PO ₄ 2,0	125	2,777	0,426	15,3

Принято, что для таких условий характерными являются контактно-дуговые разряды и этот процесс необходимо рассматривать с позиций триботехники скользящих электрических контактов и возникновения при этом «мостиковой» эрозии при микродуговых разрядах.

Для повышения износостойкости кругов при электрошлифовании необходимо воздействовать на интенсивность электроэрозионных явлений в зоне обработки. В идеальном случае необходимо стремиться к достижению равенства величин линейных износов как вершин зерен СТМ, так и поверхности связки круга. Выявлено [71], что при электрошлифовании, износ последней зависит в значительной степени от электроэрозии, которая определяется величиной технологического тока. Вместе с тем, общий ток состоит не только из электроэрозионного. Именно поэтому, была уточнена [117] концепция электроэрозионного износа связки с учетом положения о триботехнике скользящих электрических контактов. Для этого, был введен показатель, учитывающий контактную поверхность круга через величину площади поверхности связки – $S_{св}$. Кроме того, также были определены показатели, учитывающие долю энергии, идущую на разогрев и расплавление материала контактов при непосредственном контакте стружки со связкой (α_e), и долю энергии на дуге, возникающей между контактными поверхностями при их сближении или расхождении (β_e). Это дало возможность получить формулу для расчета электроконтактной составляющей общего технологического тока:

$$I = \frac{\sqrt{(\beta_e U)^2 + 2 \cdot 10^{-2} k_{ee} \gamma_{3B} \gamma_M \alpha_e q_P R_K Q [c(T_{nl} - T_{3B}) + L] S_{3B} S / P_a - \beta_e U}}{2 \alpha_e R_K}.$$

Для более удобного пользования этой формулой учтено, что $S_{св} = S_K \cdot k_{св} \cdot k_e \cdot k_k$, а коэффициент площади рабочей поверхности круга, которую занимает только связка равен – $k_{св} = 1 - K/400$. Принимая также во внимание связь P_a с относительной концентрацией СТМ через объем абразивсодержащего слоя после преобразований приведенная выше формула приобретает вид:

$$I = \frac{\sqrt{(\beta_e U)^2 + 2,27 \cdot K^{-1} k_{ee} \gamma_{3B} \gamma_M \alpha_e q_P R_K Q [c(T_{nl} - T_{3B}) + L] k_e (1 - K/400) k_K - \beta_e U}}{2 \alpha_e R_K}.$$

Из этой формулы получена зависимость для расчета плотности электроконтактного тока:

$$j_{ee} = \frac{\sqrt{(\beta_e U)^2 + 2,27 \frac{1}{K} \alpha_e k_k k_{ee} k_e \gamma_{3B} \gamma_M q_P Q R_K [c(T_{пл} - T_{3B}) + L] (1 - \frac{K}{400}) - \beta_e U}}{2 \alpha_e R_K S_K k_k (1 - K/400)},$$

где U – напряжение источника технологического тока, B , k_k , k_c , k_{ee} – коэффициенты, учитывающие соответственно долю режущей поверхности круга, ответственную за сьем припуска, содержание электропроводных компонентов в связке, долю электроэрозионного разрушения связки; c и L – удельная массовая теплоемкость и скрытая теплота плавления материала связки; $T_{пл}$ и $T_{св}$ – температура плавления и средняя температура связки при электрошлифовании.

Физическая модель электроконтактных процессов при электрошлифовании, представленная этой формулой, имеет некоторые допущения, на которые необходимо указать для ее дальнейшего усовершенствования:

– напряжение на столбе дуги заменено при расчетах на величину напряжения холостого хода из диапазона 4–12 В;

– принято, что износ связок на основе Cu–Sn и Cu–Sn–Sb, плавящиеся с выделением продуктов плавления в виде шариков, происходит преимущественно за счет электроконтактных процессов ($k_{эз} = 1$), а износ связок на основе Cu–Al–Zn, имеющих трещины и поры в лунках разрядов, происходит как за счет электроконтактных процессов, так и за счет механического разрушения ($k_{эз} = 0,5$);

– определение значений коэффициентов α_3 и β_3 требуют отдельного детального исследования. По мнению [117], принятые значения (табл. 4.2) подтверждаются следующими соображениями. Известно [267], что при малых плотностях тепловых импульсных потоков ($<10^{11}$ Вт/м²) металл удаляется преимущественно расплавленном состоянии. При больших плотностях ($>10^{11}$ Вт/м²) повышается доля парообразной фазы и происходит более интенсивный выброс материала с поверхности. В случае электрошлифования инструментальных материалов плотность импульсного теплового потока находится в диапазоне $(0,2–1,2) \cdot 10^{11}$ Вт/м², или на границе, где $\alpha_3 = \beta_3 = 0,5$. Однако, в зависимости от конкретных условий обработки коэффициент β_3 может значительно разниться (табл. 4.2), в особенности при использовании связок на основе Cu–Al–Zn.

Сумма плотностей электрохимического и электроконтактного токов $j_m = j_{эх} + j_{эз}$ составляют плотность общего технологического тока. Для проверки возможности использования приведенных выше формул при расчетах плотностей тока проведено [117] их определение применительно к условиям электрошлифования стали Р6М5 кругом 12А2-45° 150×10×3–КР 100/80–М2-12Э–100 при производительности обработки $Q = 2,0 \cdot 10^{-8}$ м³/с, напряжении $U = 8$ В, относительном расходе КНБ $q_p = 1$ мг/г. При этом электросопротивление круга составляет $R_k = 3,4 \cdot 10^{-3}$ Ом, плотности – $\gamma_{Р6М5} = 8,1 \cdot 10^3$ кг/м³, $\gamma_{М2-12Э} = 7,06 \cdot 10^3$ кг/м³, $k_3 = 0,88$, удельная теплоемкость связки $c = 0,30$ кДж/(кг·К), скрытая теплота (L) и температура ее

плавления ($T_{пл}$) – 83 кДж/кг и 933 К соответственно. Известно [267], что прирост температуры электрода даже при электроэрозионной обработке не превышает 65 градусов и находится в диапазоне от 45 до 65 градусов, поэтому, за величину $T_{св}$ принимаем температуру 328 К.

Таблица 4.2. Влияние условий электрошлифования на значения коэффициентов $\alpha_э$, $\beta_э$, $k_{ээ}$ [117]

Условия электрошлифования	$\alpha_э$	$\beta_э$	$k_{ээ}$
Глубинное шлифование кругами из СТМ на связках с основой:			
Cu–Sn, Cu–Sn–Sb	0,5	0,500	1,0
Cu–Al–Zn	0,5	1,000	0,5
Упругое шлифование:			
кругами из КНБ на связках с основой Cu–Sn, Cu–Sn–Sb	0,5	0,500	1,0
алмазными кругами на связках с основой Cu–Al–Zn	0,5	0,375	0,5
алмазными кругами на связках с основой Cu–Sn, Cu–Sn–Sb	0,5	0,125	1,0
Многопроходное шлифование кругами из КНБ	0,5	1,000	1,0
Электроискровое шлифование кругами из КНБ	0,5	0,750	0,5

Расчеты дают значения $j_{эх}=0,523 \cdot 10^6$, а $j_{ээ}=3,669 \cdot 10^6$ А/м². Суммарная расчетная плотность тока составляет $4,192 \cdot 10^6$ А/м², а экспериментальная для этих условий составляет $3,893 \cdot 10^6$ А/м². Погрешность равна 7,7 %, что можно признать удовлетворительным. Другие варианты сравнения расчетных данных с экспериментальными для конкретных условий обработки представлены в табл. 4.3. Приведенное выше свидетельствует о том, что полученные зависимости могут быть применены для оценки интенсивности электропроцессов при электрошлифовании.

Следует также обратить внимание на то, что, как вытекает из предложенной модели, величина тока и износ круга при электрошлифовании в определенной степени зависят от следующих физических свойств связок: электропроводности, теплоемкости и показателей энтальпии – температуры плавления и скрытой теплоты плавления. Изменяя указанные свойства, можно создавать более износостойкие связки для кругов из СТМ [117].

Таблица 4.3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по определению плотности общего технологического тока (12А2-45° 150×10×3–ЛКВ10–М013Э–100, $v_k=30$ м/с; $S_{пр}=0,4$ м/мин; $S_{п}=0,5$ мм/дв.х.; $U=8$ В)

Состав электролита и содержание солей в масс. %	Экспериментальная плотность технологического тока, $\cdot 10^6$ А/м ²	Расчетные плотности, $\cdot 10^6$ А/м ² , токов		
		электроконтактного	электрохимического	общего
NaNO ₃ 5,0 NaNO ₂ 0,5	3,667	3,238	0,465	3,703
NaNO ₃ 5,0 NaNO ₂ 0,3 Na ₂ CO ₃ 0,5 Глицерин 2,1	3,555	3,452	0,362	3,814
NaNO ₃ 5,0 NaNO ₂ 3,0 Na ₂ B ₄ O ₇ 1,0	4,112	4,005	0,343	4,348
NaNO ₃ 5,0 NaNO ₂ 2,0 Na ₂ HPO ₄ 3,0	2,667	2,452	0,379	2,831
NaNO ₃ 5,0 NaNO ₂ 3,0 Na ₃ PO ₄ 2,0	2,777	2,397	0,426	2,823

Г Л А В А 5

ПРОЦЕССЫ ШЛИФОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Структура производства и потребления кругов из СТМ на начало XXI века по данным работы [268] составляла:

- для лезвийных режущих инструментов: 35–50 % – быстрорежущие стали, 40–50 % – твердые сплавы (преимущественно вольфрамокобальтовые) и 15–20 % – керамика и СТМ;
- для штампов, оснастки, инструментов общемашиностроительного употребления: 80–85 % – инструментальные стали, 15–20 % – твердые сплавы (преимущественно безвольфрамовые) и керамика.

5.1. Обработка инструментальных и быстрорежущих сталей

Доля стальных инструментов для обработки резанием в Украине и странах СНГ составляет от 70 до 75 % от общего количества инструментальных материалов, в США и Германии – приблизительно 50 %, в Японии приблизительно 30 %, остальное составляют твердые сплавы, режущая керамика и СТМ [268]. Наряду с режущими, существует большая группа инструментов в виде штампов, пресс-форм, слесарно-монтажных, измерительных и др. Общий объем такой группы составляет в разных странах 80–95 %, а потребность в сталях для них в 5–6 раз больше, чем быстрорежущих [268].

Для повышения прочности и улучшения большинства других характеристик сталей используют легирование: в СНГ – марганцем, никелем, хромом, в США – молибденом, ниобием, ванадием. Последнее время азот наряду с углеродом играет роль упрочнителя твердого раствора и, в значительной степени, выступает в качестве заменителя никеля [269].

Первыми изобрели быстрорежущую сталь Тейлор и Уайт, которые в 1900 году подали патентную заявку на быстрорежущую сталь, содержащую 1,85 % углерода, 3,8 % хрома и 8 % вольфрама. Хотя до этого уже была известна сталь Мушета с 5 % вольфрама, но первым принадлежит приоритет в создании сталей с закалкой до высоких температур, что позволяло выдерживать высокую температуру резания. Еще Тейлору было известно, что вольфрам может быть заменен молибденом в соотношении 1 : 2, тем не менее молибденовые стали получили развитие только в условиях острой нехватки вольфрама [270].

Состав сталей влияет на их свойства, так увеличение содержания Мо приблизительно до 5 % повышает их теплопроводность на 40–50 %. Увеличение содержания Со не оказывает существенного влияния на теплопроводность закаленной стали. Чем больше вольфрама содержит сталь, тем меньше его в твердом растворе и тем ниже ее теплопроводность [271].

По современной классификации инструментальных сталей быстрорежущие стали относятся к группе теплостойких сталей, приобретающих высокую твердость, прочность, износостойкость, как следствие двойного упрочнения: мартенситного при закалке и дисперсионного твердения при относительно высоком отпуске с выделением упрочняющих фаз [230]. В зависимости от степени легирования стали делятся на 3 группы: *умеренной теплостойкости* – вольфрамовые (P18) и вольфрамо-молибденовые (P6M5); *повышенной теплостойкости* – высокованадиевые (P6M5Ф3), кобальтовые (P6M5K5), высокоуглеродные (A11P3M3Ф2); *безвольфрамовые стали* (EK41, EK42). Приблизительный объем использования быстрорежущих сталей в современном производстве составляет: P6M5 – 65–75 %, P6M5Ф3 – 10 %, P6M5K5 – 7–10 %, остальное – 10–15 % – сложно- и экономнолегированные стали. Однако, широкое использование таких сталей сдерживается их худшей, в сравнении с P18, шлифуемостью, являющейся важнейшим технологическим свойством инструментальных сталей, определяющим качество готового инструмента, тогда как стоимость стали и ее термической обработки не превышает 10–20 % [230]. Особенно неудовлетворительна шлифуемость у сталей с повышенным содержанием карбида ванадия, например: P6M5Ф3 (коэффициент шлифуемости относительно стали P18 – 0,4), или A11P3M3Ф2 – 0,3. Это объясняется тем, что карбиды ванадия VC и V₄C₃ имеют твердость (HV ≈ 28 ГПа), которая превышает микротвердость зерен электрокорунда белого (20–22 ГПа). Как следствие, наблюдается быстрый износ кругов, необходимость их частой правки и снижение производительности шлифования. Таким образом, качественная и производительная обработка быстрорежущих сталей должна ориентироваться на применение абразивов высокой твердости (HV ≈ 100 ГПа) – алмазов и кубического нитрида бора. Применение алмазов позволило достичь более высокой производительности и качества обработки, однако расход алмазов остается достаточно высоким. Установлено [272], что тут имеет место взаимодействие железа с алмазом, графитизация поверхностных слоев алмаза и последующая диффузия углерода из графита в железо. Кроме того, реальные карбиды в структуре быстрорежущей стали имеют дефицит ≈ 15 % по углероду. Так, например, карбид вольфрама Fe₄W₂C имеет реальную формулу Fe₂W₂C, а карбид ванадия VC имеет реальный состав V₄C₃ [230]. Недостаток атомов углерода приводит к интенсивному карбидообразованию в структуре поверхностного слоя быстрорежущих

сталей при алмазном шлифовании, и, следовательно, к интенсивному износу алмазных кругов.

Одним из вариантов повышения обрабатываемости быстрорежущих сталей – изготовление их методом порошковой металлургии. Порошковая металлургия инструментальных сталей, появившаяся в 1960–1970-х годах, осуществила в определенной степени переворот в производстве сталей, ощутимо повлияв на их марочный сортамент и кардинальное улучшение структуры металла. Порошковые быстрорежущие стали имеют ряд преимуществ в сравнении с аналогичными сталями традиционного способа производства, главными из которых являются: повышенная технологическая пластичность; пониженная склонность к росту зерна аустенита; равномерное распределение мелкодисперсных карбидных фаз размером до 2–3 мкм; более высокий уровень твердости, прочности и красностойкости; улучшенная шлифуемость; сниженная склонность к изменению линейных размеров при термообработке; более высокая стойкость и износостойкость режущих инструментов. На ВАТ «Днепроспецсталь» введен в действие один из наибольших в мире цех по производству порошковых быстрорежущих сталей. Сегодня на территории СНГ – это единственное производственное предприятие, которое производит и поставляет широкую гамму порошковых быстрорежущих сталей, которые соответствуют требованиям ГОСТ 28393-89, DIN 17350, ASTM A600, ERASTEEL, BOHLER, CRUCIBLE и другим зарубежным стандартам (табл. 5.1) [273].

Таблица 5.1. Перспективные марки порошковых быстрорежущих сталей, производимых в Украине, и их зарубежные аналоги

№ п/п	Марка стали по ГОСТ, ДСТУ	Зарубежный аналог	
		Обозначение аналога	Стандарт
1	P9M4K8-МП	Аналогов нет	ГОСТ 28393-89
2	P12MФ4K5-МП	S 12-1-4-5-PM (1.3202-PM)	DIN 17350
3	P12MФ5K5-МП	T15-PM	ASTM A 600
4	P9M2Ф5K6-МП	Аналогов нет	ТУ 14-19-55-89
5	P6M5Ф3K8-МП	ASP 2030	ERASTEEL
6	P10M2Ф5K8-МП	S 390-PM	BOHLER
7	P10M3Ф4K8-МП	S 390-PM-MOD	BOHLER
8	P10M5Ф3K9-МП	M48-PM	ASTM A 600
9	P2M10ФK8-МП	M42-PM	ASTM A 600
10	P12M3K5Ф2-МП	Аналогов нет	ГОСТ 28393-89
11	P12M3K8Ф2-МП	Аналогов нет	ТУ 14-1-2804-79
12	P12M3K10Ф3-МП	Аналогов нет	ТУ 14-1-3647-83
13	P6M7Ф6K10-МП	ASP 2060	ERASTEEL
14	P10M4Ф3K10-МП	S 10-4-3-10-PM (1.3207-PM)	DIN 17350

Для реализации преимуществ порошковых быстрорежущих сталей технология их производства должна обеспечивать высокое качество металла, а именно отсутствие или минимальное развитие дефектов, присущих методу порошковой металлургии. Главным условием при этом является высокое качество газораспыленного порошка, компактного металла, полученного методом горячего газостатического прессования (ГГП) капсул с порошком, и деформированного металла, полученного методомковки, прокатки, калибровки. Основные параметры качества распыленного порошка – однородность химического состава, низкое содержание кислорода (менее 0,02 %), минимизированная загрязненность неметаллическими включениями и „сторонними” частичками, а также дисперсность порошковых частичек. В УкрНИИ Спецстали разработана новая технология опытного производства мелкодисперсных газораспыленных порошков (содержание фракции $< 50 \text{ мкм} \sim 60 \%$) из специальных сталей и сплавов, в т.ч. быстрорежущих (рис. 5.1) [273].

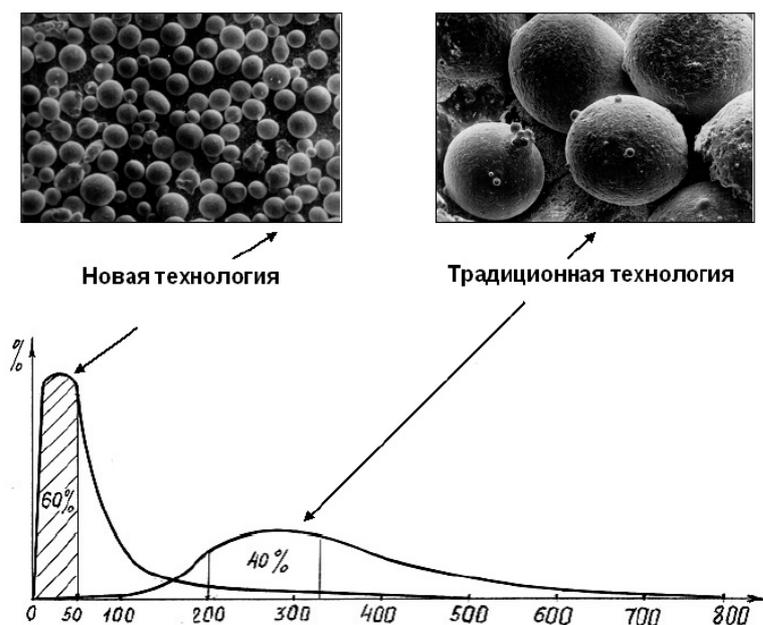


Рис. 5.1. Дисперсность газораспыленного порошка из быстрорежущей стали типа Т15-РМ, полученной по новой технологии ГП «УкрНИИ Спецсталь» и традиционной технологией ОАО «Днепрспецсталь» [273]

отдельные (большие) порошковые частички с неразбитой карбидной сеткой и выделением карбидов на их границах, вокруг которых расположены деформированные (более мелкие) частички с равномерным распределением карбидных фаз (рис. 5.2, а). Деформационный передел прессовок (ковка, прокатка, калибровка) приводит к таким изменениям микроструктуры:

В производстве порошковых быстрорежущих сталей ОАО «Днепрспецсталь» применяют газораспыленный порошок фракции $< 800 \text{ мкм}$, подвергающийся ГГП с последующей деформацией прессовок на прутки, дуги, шайбы разного профильного сортамента. Прессовки имеют 100%-ную плотность с отсутствием таких дефектов как серная и кислородная ликвация, но их структура имеет определенную неоднородность: присутствуют

- при суммарной степени деформации в 25–50 % сохраняются крупные порошковые частички с недостаточно разбитой карбидной сеткой и по границах которых и сосредоточены более крупные карбиды (рис. 5.2, а);
- при степени деформации в 70–75 % исчезает исходная карбидная сетка и отдельные порошковые частички выделяются только окружением карбидов;
- полностью однородная структура металла достигается при степени деформации 85 – 95 % и более (рис. 5.2, в).

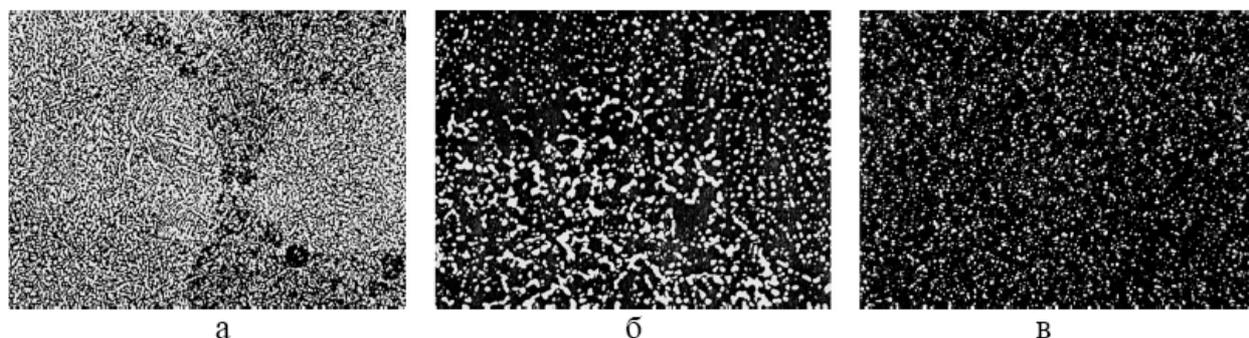


Рис. 5.2. Влияние степени деформации прессовок, полученных методом ГГП (а) на микроструктуру порошковой быстрорежущей стали Р12М3К8Ф2-МП при суммарной степени деформации в 25–50 % (б) и 85–95 % (в), увеличение 500 [273]

Исследования физико-механических свойств показали, что прочность порошковых быстрорежущих сталей повышается при увеличении суммарной степени деформации до 70 %, и далее не изменяется. При обработке деталей из жаропрочных и титановых сплавов стойкость инструментов из этих сталей повышается в 1,5–2,5 раза в сравнении с инструментами из аналогичных марок быстрорежущих сталей традиционного производства [273].

Ниже нами приведены составы и физико-механические свойства наиболее распространенных марок быстрорежущих сталей.

Р2М5 – химический состав, масс. %: углерод – 0,95–1,05; хром – 3,8–4,3; вольфрам – 1,7–2,3; молибден – 4,8–5,3; ванадий – 0,9–1,3, железо – остальное [274].

Р3М3Ф4К5 – химический состав, масс. %: углерод – 1,30–1,40; хром – 3,8–4,4; вольфрам – 3,0–3,5; молибден – 3,0–3,5; ванадий – 3,4–4,1; кобальт – 5,0–6,0, железо – остальное [274].

Р6М5 – химический состав, масс. %: углерод – 0,80–0,88; хром – 3,8–4,3; вольфрам – 5,5–6,5; молибден – 5,0–5,5; ванадий – 1,7–2,1, железо – остальное. Термообработка – закалка: 1200–1240 °С, отпуск: 530–550 °С [275].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 8,1 [276]; твердость, *HRC* – 63–65; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,6–3,6 [71]; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 16,3 [129]; теплопроводность, Вт/(м \cdot К) – 33,0–35,5 [277]; коэрцитивная сила, А/м – 32; магнитное насыщение, *T* – 1,67; удельное электросопротивление, мкОм \cdot м – 0,50 [276]; красностойкость (не менее чем 58 *HRC*), °С – 620; электрохимические эквиваленты: массовый $\cdot 10^{-6}$ кг/(А \cdot с) – 0,195 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А \cdot с) – 0,241 [71].

Маркирование зарубежных аналогов: ФРГ – S 6-5-2; Франция – 4301 (Z85WDCV 06-05-04-02); Италия – X82WMo0605KU; Швеция – 2722; Япония – SKH9; США – M2; Чехия – 19830; Польша – SW7M [278].

Р6М5К5 – химический состав, масс. %: углерод – 0,80–0,88; хром – 3,8–4,3; вольфрам – 6,0–7,0; молибден – 4,8–5,3; ванадий – 1,7–2,1; кобальт – 4,8–5,3, железо – остальное. Термообработка – закалка: 1200–1240 °С, отпуск: 540–560 °С [275].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 8,2 [71]; твердость, *HRC* – 63–66; горячая твердость (при 550 °С), *HRC* – 56,5; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,7–3,5 [279]; ударная вязкость, МДж/м² – 0,20–0,28 [276]; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А \cdot с) – 0,203 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А \cdot с) – 0,247 [71]; красностойкость (не менее чем 58 *HRC*), °С – 625; шлифуемость (для Р18 – 1,0) – 0,90–1,05 [279].

Маркировка зарубежных аналогов: ФРГ – S 6-5-2-5; Франция – 4371 (Z85WDKCV 06-05-05-04-02); Швеция – 2723; Япония – SKH55; США – M35; Чехия – 19852 [278].

Р6М5Ф3 – химический состав, масс. %: углерод – 0,96–1,05; хром – 3,8–4,3; вольфрам – 5,7–6,7; молибден – 5,5–6,0; ванадий – 2,2–2,6, железо – остальное. Термообработка – закалка: 1200–1240 °С, отпуск: 530–550 °С [275].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 8,1; твердость, *HRC* – 64–66; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,2–3,4; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А \cdot с) – 0,194 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А \cdot с) – 0,239; красностойкость (не менее чем 58 *HRC*), °С – 630 [71].

Применение – чистовая и получистовая обработка легированных конструкционных сталей [275].

Р9К5 – свойства: твердость, *HRC* – 63–66; горячая твердость (при 550 °С), *HRC* – 56,0; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,25–2,70; ударная вязкость, МДж/м² – 0,20–0,26; красностойкость (не менее чем 58 *HRC*), °С – 630; шлифуемость (для Р18 – 1,0) – 0,45–0,50 [279].

Р9М4К8 – быстрорежущая сталь повышенной производительности для обработки труднообрабатываемых материалов, химический состав, масс. %: углерод – 1,00–1,10; хром – 3,0–3,6; вольфрам – 8,5–9,5; молибден –

3,8–4,3; ванадий – 2,1–2,5; кобальт – 7,5–8,5, железо – остальное. Термообработка – закалка: 1200–1240 °С, отпуск: 550–570 °С [275].

Свойства: твердость, *HRC* – 64–68; горячая твердость (при 550 °С), *HRC* – 58,0; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,25–2,75; ударная вязкость, МДж/м² – 0,19–0,28; красностойкость (не менее чем 58 *HRC*), °С – 635; шлифуемость (для Р18 – 1,0) – 0,50–0,55 [279].

Р12Ф3 – химический состав, масс. %: углерод – 0,94–1,04; хром – 3,5–4,0; вольфрам – 12,0–13,0; молибден – 0,5–1,0; ванадий – 2,5–3,0, железо – остальное. Термообработка – закалка: 1230–1270 °С, отпуск: 550–570 °С. Применение – для обработки вязких аустенитных нержавеющей сталей [275].

Р12Ф4К5 – быстрорежущая сталь повышенной производительности с химическим составом, масс. %: углерод – 1,25–1,40; хром – 3,7–4,2; вольфрам – 12,5–14,0; молибден – 0,5–1,0; ванадий – 3,2–3,8; кобальт – 5,0–6,0, железо – остальное. Термообработка – закалка: 1220–1260 °С, отпуск: 550–570 °С [275].

Свойства: твердость, *HRC* – 64–67; горячая твердость (при 550 °С), *HRC* – 57,0; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,1–2,6; красностойкость (не менее чем 58 *HRC*), °С – 635; шлифуемость (для Р18 – 1,0) – 0,15–0,30 [279].

Р12Ф2М3К8 – быстрорежущая сталь повышенной производительности для обработки труднообрабатываемых материалов и обычных конструкционных сталей на высоких скоростях резания, химический состав, масс. %: углерод – 0,95–1,05; хром – 3,8–4,4; вольфрам – 11,0–13,0; молибден – 2,8–3,4; ванадий – 1,8–2,4; кобальт – 7,5–8,5, железо – остальное. Термообработка – закалка: 1210–1250 °С, отпуск: 550–570 °С [275].

Свойства: твердость, *HRC* – 64...68; горячая твердость (при 550 °С), *HRC* – 58,5; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,35–2,75; ударная вязкость, МДж/м² – 0,18–0,27; красностойкость (не менее чем 58 *HRC*), °С – 635; шлифуемость (для Р18 – 1,0) – 0,45–0,70 [279].

Р18 – химический состав: масс. %: углерод – 0,7–0,8, вольфрам – 17,5–19,0, хром – 3,8–4,5, ванадий – 1,0–1,1, железо – остальное [276].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 8,7 [116, 276, 280, 281]; твердость, *HRC* – 62–64 [281]; твердость, *HV*, ГПа – 12,8...13,7 [116]; модуль упругости, ГПа – 215–220 [116, 281]; предел прочности при изгибе, ГПа – 3,0 [276, 281]; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,8 [276, 280]; предел прочности при растяжении, ГПа – 1,9 [280]; предел прочности при кручении, ГПа – 1,7 [276, 280]; вязкость разрушения, МДж/м² – 40 [276]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 21 [18, 280]; удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) – 460 [280]; коэрцитивная сила, А/м – 49; максимальная магнитная проницаемость, Г/м $\cdot 10^{-5}$ – 13; остаточная индукция, *T* – 8,6; магнитное насыщение, *T* – 1,6;

удельное электросопротивление, мкОм·м – 0,57 [276]; КЛТР, 10^{-6} град⁻¹ – 11 [116, 280]; теплостойкость, °С – 620 [281]; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,212 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,247 [71]; температура плавления, К – 1780 [116].

Маркировка зарубежных аналогов: Франция – 4201 (Z80WCV 18-04-01); Швеция – 2750; Япония – SKH2; США – T1; Польша – SW18 [278].

A11P3M3Ф2 – быстрорежущая сталь с повышенным содержанием углерода, предназначенная преимущественно для машинных и ножовочных полотен [275]. В сталь дополнительно введен азот, положительное влияние которого – снижение склонности стали к росту зерен при нагреве, тем самым повышается красностойкость [274]. Термообработка – закалка: 1180–1220 °С, отпуск: 540–560 °С. Химический состав, масс. %: углерод – 1,02–1,12; хром – 3,8–4,4; вольфрам – 2,5–3,3; молибден – 2,5–3,0; ванадий – 2,2–2,7; ниобий – 0,05–0,20, азот – 0,02–0,05.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 7,9; твердость, *HRC* – 63–65; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,75–3,73; красностойкость (не менее чем 58 *HRC*), °С – 620 [282]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 23–30 [277]; электрохимические эквиваленты: массовый $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,190 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,241 [71].

В Украине выпускаются также быстрорежущие стали с добавками карбида титана, например, P6M5K5-KT20, где содержится 20 % TiC, так называемые – карбидостали. Свойства карбидосталей: предел прочности при изгибе, МПа – 1400–1700, энергия разрушения, кДж/м² – 30–40, твердость, *HRA* – 86–88, теплостойкость – 650–670 °С. Основное преимущество карбидосталей – наличие матричных карбидов стальной матрицы, высокая твердость при нагреве, незначительное изменение размеров при термообработке, возможность изготовления крупногабаритных заготовок, материал легче сталей на 12 %, твердых сплавов на 50 % [268].

Рассмотрим теперь вопросы обрабатываемости быстрорежущих сталей. Как было указано выше, реальные карбиды в структуре быстрорежущей стали имеют дефицит ≈ 15 % по углероду. Так, например, карбид вольфрама Fe₄W₂C имеет реальную формулу Fe₂W₂C, а карбид ванадия VC имеет реальный состав V₄C₃. Недостаток атомов углерода приводит к интенсивному карбидообразованию в структуре поверхностного слоя сталей при алмазном шлифовании, а, затем, к интенсивному износу алмазных кругов.

Следовательно, ключом к выбору инструмента для обработки быстрорежущих сталей является функция карбидообразования. Исходя из этого, авторами [283] выдвинута гипотеза об углеродной недостаточности карбидов быстрорежущих сталей как показателе их обрабатываемости.

Рассмотрим такую гипотезу на примере сталей, которые широко применяются на предприятиях. Если сравнить два карбида VC и V_4C_3 , то в первом случае один атом ванадия соединяется с одним атомом углерода. Поскольку соответствующие атомные веса составляют 50,95 и 12,011, то одна весовая единица ванадия требует для образования карбида $12,011/50,95$ или 0,235 весовой единицы углерода. В случае образования карбида V_4C_3 масса углерода, необходимая на единицу массы ванадия, составляет 0,176 ед. по массе ($0,7 \times 0,235$). Следовательно, средняя масса углерода, необходимая на единицу массы ванадия для образования карбида типа MC , составляет $(0,176 + 0,235) / 2 = 0,205$ ед. по массе. Другие типы карбидов анализируются аналогичным образом и тогда общая масса углерода, требующаяся для образования карбидов, определяется по зависимости:

$$C = 0,0327 W + 0,0602 Cr + 0,0622 Mo + 0,205 V.$$

Если коэффициенты в приведенном выше выражении разделить на 0,0327, то оно примет вид:

$$L = W + 1,84 Cr + 1,9 Mo + 6,3 V,$$

где L – стехиометрическая функция, пропорциональная массе углерода, требующегося для образования данных карбидов в стали. Железо также образует карбиды, но слабее, чем легирующие элементы и поэтому оно не представлено в приведенной выше зависимости.

Количество углерода, на которое его стехиометрическое содержание превышает действительное, является показателем сродства данной стали к дополнительному углероду. Чем больше эта разница, тем больше «углеродное голодание» стали. В процессе алмазного шлифования сталей зерна

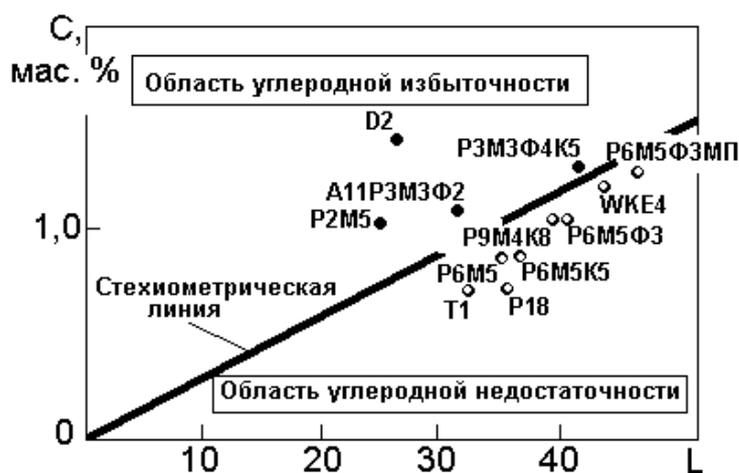


Рис. 5.3. Зависимость стехиометрической функции L от содержания углерода C в отечественных и зарубежных быстрорежущих сталях

алмазов изнашиваются в результате механического истирания и химического взаимодействия, причем последнее при относительно высоком содержании углерода в стали достаточно мало. Зависимость стехиометрической функции L от содержания углерода в различных быстрорежущих сталях приведена на рис. 5.3. Все стали, лежащие выше стехиометрической линии, более богатые углеродом, находятся в области уг-

леродной избыточности. Например, стали P2M5 и A11P3M3Ф2 относительно богаты углеродом, поэтому они не оказывают сильного химического воздействия на алмазные зерна. Такие стали можно обрабатывать алмазными кругами. Остальные, находящиеся в области углеродной недостаточности такими кругами обрабатывать нельзя. Здесь необходимо другое решение. Укажем, что недостатком изложенного выше подхода является то, что он при оценке стехиометрической функции не учитывает возможность образования карбидов железа и влияние температуры в зоне шлифования на степень диффузии. Тем не менее, он обращает внимание на то, что карбид ванадия наряду с высокой твердостью, влияет также на износ алмазных кругов в значительной степени химическим воздействием вследствие его нестроенности по углероду.

Для решения изложенной выше проблемы в свое время и был создан сверхтвердый материал не имеющий природного аналога – кубический нитрид бора (КНБ), известный под торговыми марками: эльбор, кубонит, белбор, *cBN* (см. главу 1). Использование кругов из КНБ позволяет значительно повысить качество обрабатываемого инструмента из быстрорежущих сталей а также снизить износ абразивных кругов.

Технологические процессы шлифования и заточки быстрорежущего инструмента кругами из КНБ (кубонита) в зависимости от наличия или отсутствия охлаждения имеют определенные особенности, изложенные нами ниже.

Рекомендации по процессам шлифования без охлаждения

Последовательность операций. В технологическом процессе заточки быстрорежущего инструмента должна быть следующая последовательность – 1-я операция – заточка (зернистость кубонита 125/100) и 2-я операция – доводка (зернистость кубонита 63/50).

Типоразмеры кругов из кубонита. Наиболее приемлемыми являются следующие типоразмеры:

12A2-45° 150×10×5×32, 12A2-20° 150×10×2×32,
12A2-20° 125×10×2×32, 9A3 150×10×3×32.

Марка кубонита. Для заточки наиболее приемлема марка кубонита – КР (допускается КВ), для доводки возможно применение КР или КВ.

Покрывание зерен кубонита. Для обработки без охлаждения любое покрытие кубонитовых зерен будет негативным, так как при наличии покрытия возрастают усилия резания, температуры в зоне обработки и повышается шероховатость обработанной поверхности.

Зернистость кубонита. В случае необходимости съема больших припусков (повышенное затупление обрабатываемого режущего инструмента) необходимо использовать зернистость кубонита – 160/125, в стандартных

условиях заточки – 125/100, для доводки зернистость кубонита должна составлять – 63/50.

Связка круга. Применительно к обработке без охлаждения целесообразным является использование полимерных связок типа В2-08. Для кругов, где необходимо учитывать повышенную кромкостойкость, например, формы 12R4, целесообразным будет использование связки типа В2-01-1.

Концентрация кубонита. С повышением относительной концентрации кубонитовых зерен режущем слое круге от 25 до 100 % высотные параметры шероховатости поверхности снижаются и после 100 % несколько стабилизируются. С повышением концентрации за 100 % связка становится более твердой и жесткой, вероятность вжатия зерен в связку снижается и следы от единичных зерен становятся более глубокими. В связи с указанным и для заточки и для доводки относительную концентрацию кубонита в кругах целесообразно выдерживать одинаковой – 100 %.

Режимы шлифования. Окружная скорость кругов из кубонита должна быть в пределах 15–20 м/с. Повышение скорости до 30 м/с является нецелесообразным, так как при отсутствии охлаждения это приведет к повышению контактной температуры как при заточке, так и при доводке, что может в свою очередь привести к прижогам или сколам обрабатываемого инструмента. Глубина шлифования – 0,010–0,050 мм. Продольная подача – 0,5–2,0 м/мин.

Рекомендации по процессам шлифования с охлаждением

Переход к обработке с охлаждением, позволяет повысить производительность обработки как минимум в 2 раза, снизить износ кругов из СТМ, как минимум в 2 раза, при гарантированном повышении стойкости режущего инструмента в 1,3 раза. Обеспечивается это тем, что возможным становится использование кругов из кубонита на более износостойких и более высокопроизводительных металлополимерных и металлических связках, создается возможность повышения скорости вращения круга до 30 м/с и формирования условий получения более износостойкой обработанной поверхности инструмента. Становится возможным использование специальных многослойных кругов, которые позволяют 2 операции заточки и доводки совместить в одну и на одной операции сразу получить высококачественную поверхность.

Последовательность операций. При использовании стандартных кругов в технологическом процессе заточки быстрорежущего инструмента применяют следующую последовательность – 1-я операция – заточка (зернистость кубонита 125/100) и 2-я операция – доводка (зернистость кубонита 63/50).

Типоразмеры кругов из кубонита. Наиболее приемлемыми являются следующие типоразмеры:

12A2-45° 150×10×5×32, 12A2-20° 150×10×2×32,
12A2-20° 125×10×2×32, 9A3 150×10×3×32.

Марка кубонита. Для заточки наиболее приемлема марка кубонита – КР (допускается КВ), для доводки возможно применение КР или КВ.

Покрытие зерен кубонита. Возможно использование металлизированного стеклопокрытия кубонитовых зерен, хотя более приемлемым является использование кругов без покрытия зерен кубонита.

Зернистость кубонита. В случае необходимости съема больших припусков (повышенное затупление обрабатываемого режущего инструмента) необходимо использовать зернистость кубонита – 160/125, в стандартных условиях заточки – 125/100, для доводки зернистость кубонита – 63/50.

Связка круга. Возможным является использование металлополимерных связок типа В1-13, а для кругов, где необходимо учитывать повышенную кромкостойкость, например, формы 12R4, целесообразным будет использование связок типа М1-10.

Концентрация кубонита. С повышением относительной концентрации кубонитовых зерен режущем слое круга от 25 до 100 % высотные параметры шероховатости поверхности снижаются и после 100 % несколько стабилизируются. С повышением концентрации за 100 % связка становится более твердой и жесткой, вероятность вжатия зерен в связку снижается и следы от единичных зерен становятся более глубокими. В связи с указанным, и для заточки и для доводки относительную концентрацию кубонита в кругах целесообразно выдерживать одинаковой – 100 %.

Режимы шлифования. Окружная скорость кругов из кубонита должна быть в пределах 20–30 м/с с тенденцией в сторону большей скорости. Глубина шлифования – 0,050–0,025 мм. Продольная подача – 0,5–1,0 м/мин.

Технология шлифования и заточки инструмента из инструментальных сталей на примере плоских ножей бумагорезательных машин. Предназначена для шлифования плоских ножей из инструментальных сталей, применяемых в полиграфической промышленности. Эффективность обеспечивается за счет достижения гарантированной стойкости и долговечности обрабатываемого инструмента, что имеет первостепенное значение для увеличения производительности полиграфического оборудования, получения требуемого качества производимой продукции, сокращения расхода инструментальных и абразивных материалов [284].

Основную номенклатуру составляют плоские ножи из инструментальных сталей: сталь легированная марки 9ХФ (ГОСТ 5950-73) и двухслойная сталь – корпус из стали марки 10 (ГОСТ 1050-60), режущий слой из стали марки 9ХФ. Твердость ножей: *HRC* 52–58 — для ножей из однослойной стали, *HRC* 56-62 — для ножей из двухслойной стали. Шероховатость поверхностей ножей *Ra* 1,25. Основные типоразмеры ножей: длина

350–2000 мм, ширина – 80–160 мм, толщина – 10–14 мм. Исходная (заменяемая) технология включает обработку ножей по задней поверхности под углом β шлифовальными кругами из электрокорунда и доводку режущей кромки брусками из электрокорунда. Достигаются следующие показатели обработки: шероховатость обработанной поверхности Ra 1,25; величина радиуса округления режущей кромки $\beta=10\text{--}15$ мкм. Гарантированная стойкость ножей — не более 3 ч.; количество переточек одного ножа — 60; количество резов обрабатываемой продукции за один период стойкости ножа не превышает 1000. Эксплуатационное требование к ножам из инструментальных сталей (рис. 5.4): шероховатость обработанной поверхности Ra непосредственно на режущей части не более 0,16 мкм, радиус округления режущей кромки $\rho = 3\text{--}5$ мкм, зазубренность режущей кромки

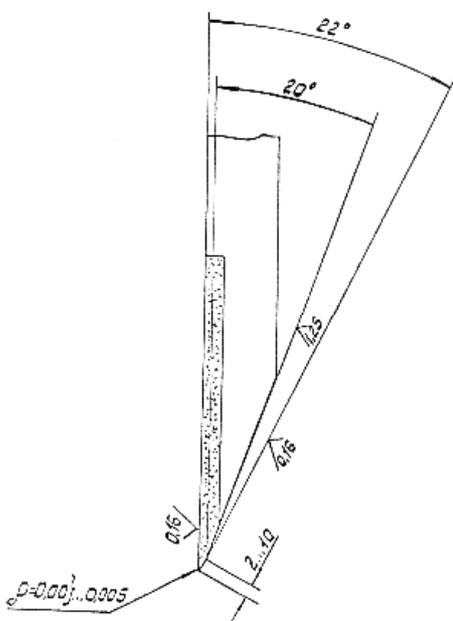


Рис. 5.4. Характеристика заточиваемой части ножей [284]

не допускается, ширина задней поверхности (угол $\beta+2^\circ$) не более 10 мм. Разработанная технология включает выполнение следующих технологических операций:

- Шлифование передней поверхности кругами из кубонита (Ra 0,10–0,16).
- Шлифование задней поверхности кругом из электрокорунда (угол β , Ra 1,25).
- Шлифование задней поверхности кругом из кубонита (угол $\beta+2^\circ$, $h = 3\text{--}5$ мм, Ra 0,10–0,16).
- Доводка режущей кромки брусками из кубонита ($\rho = 3\text{--}5$ мкм).

Обработка ножей производится с применением СОТС, в качестве которой применяют 0,5–1,0%-ный водный раствор кальцинированной соды или водный раствор до 2 % нитрата натрия. Для эффективного использования СОТС применяются специальные устройства.

5.2. Обработка твердых сплавов

Твердые сплавы состоят из зерен карбидов вольфрама, титана и тантала, связанных между собой связующим (кобальтом). После инструментальных сталей твердые сплавы являются наиболее распространенным инструментальным материалом, а у промышленности США и Западной

Европы даже имеют преимущество и их доля составляет 45...57 % от общего объема выпуска [285]. При этом, 90% многогранных режущих пластин в США, Западной Европе и Японии изготавливают из вольфрамкобальтовых твердых сплавов, которые могут иметь кроме того карбиды титана, тантала и ниобия без покрытий, или вольфрамкобальтовые твердые сплавы с покрытиями TiC, Ti(CN), Zr(CN), TiN, Al₂O₃ [286].

Основными характеристиками, определяющими качество спеченных твердых сплавов, являются – плотность, твердость, предел прочности при изгибе, степень пористости, размер зерна карбидной фазы и толщина кобальтовой прослойки. Плотность твердых сплавов состоит аддитивно из плотностей WC и Co. Значения плотности спеченных изделий ниже расчетных на 0,5–3,0 % из-за наличия в сплаве этих дефектов. Твердость характеризуется сопротивлением материала пластической деформации при внедрении индентора. При испытаниях на приборе Роквелл значения твердости практически всех промышленных марок твердых сплавов вкладываются в диапазон 6–8 ед. *HRA*. Поэтому задача установления какой-либо корреляции между твердостью та параметрами макроструктуры твердых сплавов является проблематичной. Например, показатель твердости *HRA* практически не реагирует на уровень пористости. Вместе с тем, между средними показателями твердости и границей текучести при одноосном сжатии наблюдается линейная связь и с ростом твердости граница текучести повышается. В связи с этим, исследования на твердость *HRA* характеризуют средний уровень механических свойств сплавов, но это не является достаточной оценкой качества, поскольку долговечность изделий существенно зависит от наличия внутренних дефектов. Величина коэрцитивной силы твердых сплавов определяется не только количеством, а и состоянием связующей фазы, представляющей собой твердый раствор вольфрам и углерода в кобальте. Трещиностойкость материала определяется как способность конструкционного элемента, содержащего трещину или частично поврежденного, выдерживать нагружение и не разрушаться полностью. Эта способность описывается напряженным состоянием у вершины трещины перед окончательным разрушением – K_{Ic} . В отличие от других механических характеристик эта величина не зависит от размеров изделия, от состояния их поверхностного слоя, от наличия в них дефектов типу пор или включений графита. При прочих равных условиях параметр K_{Ic} может быть критерием состояния связующей фазы. Так, для твердых сплавов эта величина линейно растет с увеличением содержания кобальта в сплаве и повышается с ростом зерна кобальтовой прослойки [228].

Среди свойств твердых сплавов только коэрцитивная сила оказалась единственной характеристикой, связок с которой однозначно характеризует износостойкость сплавов при абразивном изнашивании (по карбиду

кремнию). С возрастанием коэрцитивной силы износостойкость в этом случае линейно растет [287].

Для твердых сплавов характерным является наличие остаточных напряжений в их фазах, вызванных неоднородностью теплофизических свойств фаз, составляющих инструментальный композит (микромеханизм), и неоднородностью свойств поверхностного слоя и глубинных слоев (макротеханизм). Например, в безвольфрамовом твердом сплаве ТН20 после спекания остаточные напряжения в фазе TiC являются напряжениями сжатия и изменяются в диапазоне 0,15–0,30 ГПа, а у цементирующей фазе фиксируются напряжения растяжения 0,03–0,05 ГПа [288].

Расчетные средние остаточные термонапряжения в фазах твердых сплавов WC–Co находятся в диапазонах – для кобальтовой фазы (напряжения сжатия) у BK4 – 1616 МПа, а у BK25 – 1207 МПа; для карбидной фазы (напряжения растяжения) у BK4 – 112 МПа, а у BK25 – 709 МПа. Эти напряжения являются характерными для глубинных слоев. А для поверхностных слоев в целом напряжения являются меньшими приблизительно в 2 раза. В исходном состоянии (после спекания) сплава BK20 у поверхностном слое исследованных пластинок выявлены небольшие (до 300 МПа) напряжения растяжения в кобальте и напряжения сжатия (около 200 МПа) у карбидной фазе [289].

В исходном состоянии (после спекания) твердого сплава карбидная фаза находится под влиянием напряжений сжатия, а кобальтовая – напряжений растяжения. Средние остаточные термонапряжения в фазах твердых сплавов WC–Co находятся в диапазонах – для кобальтовой фазы (напряжения сжатия) у BK6 – 2200 МПа, BK15 – 870 МПа, а BK25 – 530 МПа; для карбидной фазы (напряжения растяжения) у BK6 – 100 МПа, BK15 – 220 МПа, а BK25 – 260 МПа [290].

Покрyтия твердосплавных пластин – для повышения эксплуатационных свойств многогранных пластин и монолитного инструмента из твердых сплавов, инструментальных сталей и керметов применяются современные износостойкие покрyтия. Классификация: *CVD* – покрyтия, нанесенные с помощью химических методов, *PVD* – покрyтия, нанесенные с помощью физических методов, *ND* – алмазное покрyтие [291].

В металлообрабатывающей промышленности Японии доля твердых сплавов с покрyтием составляет около 33 % от общего объема инструментальных материалов [292].

Градиенты контактной температуры при высокоскоростном резании инструментами с фрикционными покрyтиями нитридов и карбидов титана выше в 1,5–3 раза, чем градиенты температур, характерные для инструмента без покрyтия. При этом температура режущего клина как у инструмента с покрyтиями, так и у инструментов без покрyтия различается незначи-

тельно. В то же время, максимальная температура на передней поверхности лезвия с фрикционным покрытием обычно превышает на 15–30 % соответствующую температуру в случае отсутствия покрытия. В клине резания при точении сталей на нормативных режимах резания имеет место высокая теплонапряженность, что соответствует тепловым потокам, равным $(1-20) \cdot 10^6$ Вт/м² и коэффициентам конвективного теплообмена от задней поверхности лезвия инструмента к воздуху $\alpha = (5-40) \cdot 10^3$ Вт/(м·К) [293]. Коэффициенты теплообмена (теплопередачи) в покрытиях: TiN – $(8-9,5) \cdot 10^3$ Вт/(м²·К), TiCN – $(6,5-9) \cdot 10^3$ Вт/(м²·К), TiAlN – $(6-7) \cdot 10^3$ Вт/(м²·К), а это обозначает, что именно последнее обеспечивает достаточно теплоизоляцию [294].

Физико-механические свойства износостойких покрытий [295]:

Покрытие	Микротвердость, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Поверхностная энергия, Дж/м ²	Коэффициент интенсивности напряжений, $K_C \cdot 10^6$, Н/м ²	Коэффициент трещиностойкости*
TiN	21,2	350,9	4,43	1,47	0,77
TiCN	31,1	370,0	5,61	1,85	0,67
TiZrN	41,5	420,0	6,60	2,19	0,44
TiAlN	31,7	350,9	5,69	1,89	0,65
TiFeN	22,7	301,3	4,51	1,50	0,70
TiMoN	38,0	377,4	6,28	2,08	0,76

* Чем меньше коэффициент, тем больше и трещиностойкость

Основные области применения твердых сплавов, %: резание металлов – 68, обработка древесины – 2, бурение – 15, синтез алмазов и других сверхтвердых материалов – 2, волочение – 6, штампы, детали машин, шипы противоскольжения, втулки и др. – 3, остальное – 3 [296].

Ниже приведены характеристики и свойства основных марок твердых сплавов:

ВК2 – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: фаза WC – 98, фаза Co – 2 [297].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 15,0–15,4 [297]; диаметр частичек WC, мкм – 2,0 [298]; твердость, HRA – 90 [297]; модуль упругости, ГПа – 688 [298]; предел прочности при изгибе, ГПа – 0,98 [297]; коэрцитивная сила, кА/м – 15,1–19,9 [228].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1500±20 (в среде водорода), 1420±20 (в вакууме); время выдержки, мин – 40–60 (в среде водорода), 40–60 (в вакууме) [299].

Применение – обработка резанием, волочение [297].

ВКЗ – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: фаза WC – 97, фаза Co – 3 [297].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 15,0–15,3 [300]; диаметр частичек WC, мкм – 1–2 [301]; твердость по Кнуппу, ГПа – 15,9 [302]; твердость, *HRA* – 89,5 [300]; модуль упругости, ГПа – 640–660; коэффициент Пуассона – 0,19 [302]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,176 [300]; предел прочности при сжатии, ГПа – 5,27 [301]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 66,6; теплоемкость, Дж/(кг·К) – 184,2; удельное электросопротивление, мкОм·м – 0,198; КЛТР, 10^{-6} ·град⁻¹ – 5 [280]; коэрцитивная сила, кА/м – 15,9 [298].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1490±20 (в среде водорода), 1420±20 (в вакууме); время выдержки, мин – 40–60 (в среде водорода), 40–60 (в вакууме) [299].

Применение – чистовое точение с малыми толщинами среза, окончательного нарезания резьбы, развертывание отверстий и других аналогичных видов обработки серого чугуна, цветных металлов и их сплавов, пластмасс и других неметаллических материалов (резин, фибры, пластмасс, стекла, стеклопластиков и др.). Резка листового стекла. Сухое волочение проволоки из стали, цветных металлов и их сплавов. Быстроизнашиваемые детали машин, приборов и измерительный инструмент, работающий без ударных нагрузок [300].

Аналог – MC301 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: фаза WC – 94,3, раствор TaNbC – 2,0, фаза Co – 3,7; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,95–15,11; твердость, *HV*, ГПа – 17,2–19,0; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,127; коэрцитивная сила, кА/м – 20,3–24,7 (аналог фирмы «Sandvik» – *HOS*).

ВКЗМ – твердый сплав вольфрамовой группы с мелкозернистой структурой, фазовый состав, масс. %: фаза WC – 97, фаза Co – 3 [297].

Согласно ТУ 48-19-178-84 должно быть: степень пористости, %, не более чем 0,2; содержание графита, %, не более чем 0,2; фаза WC: величина зерна, мкм – до 1, количество зерен, %, не менее чем 50; наличие фазы типа η (двойного карбида вольфрама и кобальта кружевной и озерной форм) не допустимо; пустоты более чем 50 мкм допускаются суммарной протяженностью до 200 мкм.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 15,0–15,3 [10, 297]; твердость, *HRA* – 91 [10, 297, 301]; твердость *HV*, ГПа – 18; модуль упругости, ГПа – 647; коэффициент Пуассона – 0,21 [10]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,1 [10, 301, 303]; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,6 [10, 303]; КЛТР, 10^{-6} ·град⁻¹ – 4 [10]; коэрцитивная сила, кА/м – 19,5–24,2 [228].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1400 ± 20 (в среде водорода), 1400 ± 20 (в вакууме); время выдержки, мин – 30–50 (в среде водорода), 30–50 (в вакууме) [299].

Аналог – МС301 (см. ВК3).

Подгруппа применения по *ISO* – K01–K05. Маркировка ВНИИТС (Россия) – ВТ301. Применение – чистовое точение и растачивание серого чугуна твердостью ≥ 220 *НВ*, цементированных и закаленных углеродных и легированных сталей, сплавов алюминия и других цветных металлов и сплавов, абразивных неметаллических материалов, отбеленных чугунов высокой твердости [304]. Волочение металлов, правка шлифовальных кругов, армирование деталей машин, оснастки и инструмента [297].

ВК4 – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: фаза WC – 96, фаза Co – 4 [297].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,9–15,2 [300]; размер зерна карбида вольфрама, мкм – 2–3 [301]; твердость, *HRA* – 89,5 [228, 300, 301, 303]; модуль упругости, ГПа – 637 [301]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,35 [301, 303]; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,6; теплопроводность, Вт/(м·К) – 50 [303]; коэрцитивная сила, кА/м – 11,1–14,3 [228].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1480 ± 30 (в среде водорода), 1440 ± 20 (в вакууме); время выдержки, мин – 40–60 (в среде водорода), 40–60 (в вакууме) [299].

Применение – черновое точение при неравномерном сечении среза черного и чистового фрезерования, рассверливания и растачивания нормальных и глубоких отверстий, черного зенкерования при обработке чугуна, цветных металлов и их сплавов, титана и его сплавов. Резка листового стекла. Сухое волочение проволоки из стали, цветных металлов и их сплавов. Быстроознашиваемые детали машин, приборов и измерительный инструмент, работающий без ударных нагрузок [300]. Обработка резанием [297].

ВК4В – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: фаза WC – 96, фаза Co – 4 [300].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,9–15,2 [300]; размер зерна карбида вольфрама, мкм – 2–5 [301]; твердость, *HRA* – 88 [300, 301]; модуль упругости, ГПа – 637; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,4; предел прочности при сжатии, ГПа – 5,11 [310]; коэрцитивная сила, кА/м – 7,2–8,8 [228].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1500 ± 30 (в среде водорода), 1460 ± 30 (в вакууме); время выдержки, мин – 50–90 (в среде водорода), 60–80 (в вакууме) [299].

Применение – бурение электро- и пневмосверлами угля, антрацита, неокварцованных сланцев, калийных и каменных солей, бурение ручными и колонковыми электросверлами горных пород с коэффициентом крепости 8 по шкале Протоdjяконова, а также в камнерезных машинах [300].

ВК6 – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: фаза WC – 94, фаза Co – 6. Согласно ТУ 48-19-165-84 должно быть: степень пористости, %, не более чем 0,2; содержание свободного углерода, %, не более чем 0,2; содержание графита, %, не более как 0,5; фаза WC: величина зерна, мкм – 1–2, количество зерен, %, не менее как 50; наличие фазы типа η (двойного карбида вольфрама и кобальта кружевной и озерковой форм) недопустимо; пустоты, более чем 50 мкм допускаются суммарной протяженностью до 200 мкм.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,6–15,0 [300]; усредненный размер частичек WC, мкм – 1–2 [301]; усредненный размер прослойки кобальта, мкм – 0,42 [306]; твердость, *HRA* – 88,5 [300, 301]; твердость, *HV*, ГПа – 15,0 [306]; модуль упругости, ГПа – 628 [301]; коэффициент Пуассона – 0,174 [307]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,65 [301]; предел прочности при сжатии, ГПа – 5,0 [306]; предел прочности при растяжении, ГПа – 0,588; предел прочности при кручении, ГПа – 0,882 [280]; предел текучести, ГПа – 4,4 [307]; предел текучести при непропорциональном удлинении, ГПа – 0,686 [280]; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 12,1 [290]; работа деформации сплава, МДж/м³ – 69; коэффициент энергопоглощаемости, являющийся отношением работы пластичной составляющей к упругой при деформации сплава – 1,0 [306]; теплопроводность, Вт/(м \cdot К) – 60–61; температуропроводность, $\cdot 10^5$ м²/с – 1,97–2,20; теплоемкость, Дж/(кг \cdot К) – 186–193 [308]; удельное электросопротивление, мкОм \cdot м – 0,206; КЛТР, 10^{-6} град⁻¹ – 5 [280]; коэрцитивная сила, кА/м – 10,4–14,0 [228]; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А \cdot с) – 0,292 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А \cdot с) – 0,198 [71].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1420 \pm 40 (в среде водорода), 1400 \pm 20 (в вакууме); время выдержки, мин – 40–60 (в среде водорода), 40–60 (в вакууме) [299].

Подгруппа применения по *ISO* – K15–K25. Аналог – MC321. Применение – получистовое и черновое точение и растачивание при непрерывном резании, чистовая обработка при прерывистом резании, расквашивание и сверлении отверстий, зенкерование и предварительное развертывание серых чугунов твердостью ≤ 250 *HB*, цветных металлов и их сплавов, пластмасс и других неметаллических материалов со средними скоростями резания и сечениями среза [304].

Аналог – MC321 – твердый сплав титановольфрамовой группы с составом, масс. %: фаза WC – 92,0, раствор TaNbC – 2,0, фаза Co – 6,0; плот-

ность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,61–14,86; твердость, *HV*, ГПа – 14,5–16,0; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,323; коэрцитивная сила, кА/м – 13,1–15,5 (аналог фирмы «Sandvik» – H20).

Аналог – MC318 – плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,80–12,96; твердость, *HV*, ГПа – 15,75–17,25; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,47; коэрцитивная сила, кА/м – 15,5–19,9.

Аналог – MC313 – плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,74–14,94; твердость, *HV*, ГПа – 15,05–16,55; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,274; коэрцитивная сила, кА/м – 13,1–17,1.

Аналог – MC312 – плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,79–12,95; твердость, *HV*, ГПа – 17,0–19,4; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,274; коэрцитивная сила, кА/м – 15,9–23,9.

Аналоги: MC321, МК2 (МКТС), K20 (Hertel), H1P (Sandvik). Применение: черновая и получистовая обработка серого та ковкого чугуна. ВК6 с покрытием TiN–TiC/N–Al₂O₃ – MC3210, MA3 (МКТС), GC–3015 (Sandvik). Применение: марка с износостойким покрытием для чистовой и получистовой обработки чугуна, в т.ч. ковкого и с сфероидальным графитом. ВК6 с покрытием TiN–TiC/N–TiN – MC3216, MF3 (МКТС). Применение: марка с износостойким покрытием для фрезерования серого и ковкого чугуна [309].

ВК6В – твердый сплав вольфрамовой группы: содержание кобальта, масс. % – 6, фаза WC – 94; усредненный размер частичек WC, мкм – 4.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,6–15,0 [297, 300]; диаметр частичек WC, мкм – 2–5 [301]; твердость, *HRA* – 87,5 [297, 300, 301]; твердость, *HV*, ГПа – 14,0 [306]; модуль упругости, ГПа – 608 [298]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,8 [301]; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,6; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 15; работа деформации сплава, МДж/м³ – 89; коэффициент энергопоглощаемости, являющийся отношением работы пластической составляющей к упругой при деформации сплава – 1,8 [306]; коэрцитивная сила, кА/м – 6,8–8,0 [228].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1460±60 (в среде водорода), 1440±30 (в вакууме); время выдержки, мин – 50–90 (в среде водорода), 60–80 (в вакууме) [299].

Применение – обработка резанием [297], ударно-поворотное бурение шпуров в горных породах с коэффициентом крепости 8 по шкале Протодь-яконова, зарубки крепких каменных углей с незначительным включением твердых пород [300].

Аналог – B12 (Boart Longueal – Англия) свойства: содержание кобальта, масс. % – 6; усредненный размер частичек WC, мкм – 4; твердость, *HV*, ГПа – 14,2; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 15; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,0; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,6 [306].

Аналог – M1 (Sandvik Hard Materials – Швеция) свойства: содержание кобальта, масс. % – 6,5; усредненный размер частичек WC, мкм – 3; твердость, *HV*, ГПа – 14,4; вязкость разрушения, МПа·м^{0,5} – 15; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,0; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,6 [306].

ВК6КС – твердый сплав вольфрамовой группы: кобальт, масс. % – 6. Свойства: твердость, *HRA* – 89,0 [310]; твердость, *HV*, ГПа – 14,1 [306]; усредненный размер частичек WC, мкм – 3,3; содержание вольфрама в кобальте, % – 7,5 [310]; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,0; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,2 [306]; предел прочности при непропорциональном удлинении, $R_{p0,1}$, ГПа – 3,21; вязкость разрушения, МПа·м^{0,5} – 14,4 [310]; работа деформации сплава, МДж/м³ – 121; коэффициент энергопоглощаемости, являющийся отношением работы пластической составляющей к упругой при деформации сплава – 2,6 [306]; предельная пластическая деформация, % – 1,6; коэрцитивная сила, кА/м – 8,3 [310].

ВК6М – твердый сплав вольфрамовой группы с мелкозернистой структурой, фазовый состав, масс. %: фаза WC – 94, фаза Co – 6 [297].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,8–15,1 [10, 297, 300]; пористость, % – до 0,2 [303]; диаметр частичек WC, мкм – 1,6 [298]; твердость, *HRA* – 90 [10, 297, 300, 301]; твердость *HV*, ГПа – 16,5 [10]; модуль упругости, ГПа – 640 [10, 303]; модуль сдвига, ГПа – 262; коэффициент Пуассона – 0,22 [10]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,35 [10, 311]; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,9 [10, 303]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 50 [303]; КЛТР, 10^{-6} ·град⁻¹ – 5 [10]; коэрцитивная сила, кА/м – 15,9–19,9 [311].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1370±20 (в среде водорода), 1380±20 (в вакууме); время выдержки, мин – 30–40 (в среде водорода), 30–40 (в вакууме) [299]; температура спекания, °С, 1390; время размола, час – 96 [311].

Применение – обработка резанием [297], получистовое точение жаропрочных сталей и сплавов, нержавеющей сталей аустенитного класса, специальных твердых чугунов, закаленного чугуна, твердой бронзы, сплавов легких металлов, абразивных неметаллических материалов, пластмасс, бумаги, стекла. Обработка закаленных сталей, а также сырых углеродных и легированных сталей при тонких сечениях среза при достаточно невысоких скоростях резания. Сухое волочение проволоки из стали, цветных металлов и их сплавов. Легкоизнашиваемые детали машин и приборов, измерительный инструмент, работающий без ударных нагрузок [300].

Аналог – MC313 – твердый сплав титановольфрамовой группы состава, об. %: фаза WC – 90,9, раствор TaNbC – 4,0, фаза Co – 5,1; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,74–14,94; твердость, *HV* – 15,05–16,55; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,27 (аналог фирмы «Sandvik» – H13).

ВК6НС и ВК6НСТ – твердые сплавы вольфрамовой группы.

Подгруппа применения по *ISO* – К15–К25. Маркировка ВНИИТС (Россия) – ВТ321 (для ВК6НС) и ВТ320 (для ВК6НСТ). Применение – получистовое и черновое точение и растачивание при непрерывном резании, чистовая обработка при прерывистом резании, рассверливание и сверление отверстий, зенкерование и предварительное развертывание сырых чугунов твердостью ≤ 250 *HV*, цветных металлов и их сплавов, пластмасс и других неметаллических материалов со средними скоростями резания и сечениями среза. Черновое и получистовое фрезерование сплошных поверхностей из конструкционных материалов и сплавов [304].

ВК6ОМ – твердый сплав ультрамелкозернистой структуры вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 92, Co – 6, TaC – 2 [300].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,7–15,0 [300, 311]; пористость, % – до 0,2 [311]; % зерен размером до 1 мкм – 75 [312]; размер зерен карбида вольфрама, мкм – 1,4 [311]; твердость, *HRA* – 90,5 [300, 311]; микротвердость, *HV*₂₀ – 16,5–18,0 [313]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,2 [311]; удельное электросопротивление, мкОм·м – 0,012 [313]; коэрцитивная сила, кА/м – 22,3–26,3 [311].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1390; продолжительность размола, час – 96 [311].

Подгруппа применения по *ISO* – M05–M15 (K05–K15). Маркировка ВНИИТС (Россия) – ВТ210. Применение – чистовая и получистовая обработка и растачивание; нарезание резьбы, развертывание легированных, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов; сплавов алюминия с большим содержанием кремния и других цветных металлов неметаллических материалов при высоких скоростях резания и малых сечениях среза. Используется для изготовления мелкогабаритного осевого инструмента – сверл, метчиков, разверток [304].

Аналог – МС306 – твердый сплав титановольфрамовой группы состава, масс. %: фаза WC – 93,6, раствор TaNbC – 0,4, фаза Co – 6,0; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,71–14,94; твердость, *HV*, ГПа – 16,65–18,35; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,225; коэрцитивная сила, кА/м – 19,5–23,5 (аналог фирмы «Sandvik» – H10).

Аналог – МС211 – плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,70–14,86; твердость, *HV*, ГПа – 15,9–16,8; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,47; коэрцитивная сила, кА/м – 15,9–24,7.

Аналоги: МС306, МК0 (МКТС), КМ1 (Hertel), Н1Р (Sandvik). Применение: чистовая обработка чугуна, в т.ч. отбеленного, цветных металлов, пластмасс при высоких скоростях резания и малых сечениях среза [309].

ВК6ХОМ – твердый сплав ультрамелкозернистой структуры вольфрамовой группы с легирующей добавкой – Cr₃C₂.

Свойства: коэрцитивная сила, кА/м – 20,1; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,283; твердость, *HRA* – 91; % зерен размером до 1 мкм – 60 [312].

ВК8 – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 92, Co – 8.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,4–14,8 [10, 303, 314, 315]; усредненный размер частичек WC, мкм – 1–2 [301, 315]; степень пористости, %, не более чем 0,2; содержание графита, %, не более чем 0,2; твердость, *HRA* – 87,5–89,0 [316]; твердость, *HV*, ГПа – 14,5 [306]; модуль упругости, ГПа – 590 [301, 303]; модуль сдвига, ГПа – 244; коэффициент Пуассона – 0,22 [10]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,6 [10, 71, 303, 305]; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,5 [10, 303]; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 14 [306]; ударная вязкость, кДж/м² – 58,8 [280]; работа деформации сплава, МДж/м³ – 75; коэффициент энергопоглощения, являющийся отношением работы пластичной составляющей к упругой при деформации сплава – 1,4 [306]; теплопроводность, Вт/(м \cdot К) – 58 [303]; температуропроводность, $\cdot 10^5$ м²/с – 2,4 [18, 115]; удельная теплоемкость, кДж/(кг \cdot К) – 0,167 [18, 116, 280]; удельное электросопротивление, мкОм \cdot м – 0,207 [280]; КЛТР, 10^{-6} град⁻¹ – 5–5,5 [116, 280]; коэрцитивная сила, кА/м – 8,0–14,4 [316]; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А \cdot с) – 0,298 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А \cdot с) – 0,204 [71]; температура плавления, К – 1100 [116]; термостойкость на воздухе, °С – 700 [303].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1400 \pm 50 (в среде водорода), 1400 \pm 20 (в вакууме); продолжительность выдержки, мин – 40–60 (в среде водорода), 40–60 (в вакууме) [299].

Подгруппа применения по *ISO* – М30–М40 (К25–К35). Маркировка ВНИИТС (Россия) – ВТ332. Применение – обдирочное и черновое точение отливок и поковок с раковинами и включениями, черновое строгание высоколегированных сталей и стального литья, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов с низкими скоростями резания и большими сечениями среза. Черновое фрезерование прерывистых поверхностей стальных сплавов, чугунов, цветных металлов и сплавов, неметаллических материалов [304].

Аналог – МС347 – плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,45–14,49; твердость, *HV*, ГПа – 12,1–13,5; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,911; коэрцитивная сила, кА/м – 8,7–11,9.

Аналог – МС241 – плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,15–14,25; твердость, *HV*, ГПа – 11,75–12,15; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,960; коэрцитивная сила, кА/м – 9,1–11,5.

ВК8В – твердый сплав вольфрамовой группы с содержанием кобальта, масс. % – 8.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,4–14,8 [297, 300]; размер зерен карбида вольфрама, мкм – 2–5 [301]; твердость, *HRA* – 86,5 [297, 300, 301]; твердость, *HV*, ГПа – 12,8 [306]; модуль упругости, ГПа – 588–590 [298, 301]; коэффициент Пуассона – 0,22 [298]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,813 [300]; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,0 [306]; ударная вязкость, кДж/м² – 26 [298]; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 16; работа деформации сплава, МДж/м³ – 110; коэффициент энергопоглощения, являющийся отношением работы пластической составляющей к упругой при деформации сплава – 2,2 [306]; коэрцитивная сила, кА/м – 6,0–7,2 [228].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1460±40 (в среде водорода), 1420±30 (в вакууме); продолжительность выдержки, мин – 60–90 (в среде водорода), 60–80 (в вакууме) [299].

Применение – обработка резанием, бурение горных пород [297]; ударно-поворотное, ударно-вращательное и вращательно-ударное бурение шпуров и скважин в горных породах с коэффициентом крепости 14 по шкале Протодряконова [300].

Аналог – В20 (Boart Longyeal – Англия) свойства: содержание кобальта, масс. % – 8; усредненный размер частичек WC, мкм – 10; твердость, *HV*, ГПа – 12,5; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 17; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,7; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,4 [306].

Аналог – М2 (Sandvik Hard Materials – Швеция) свойства: содержание кобальта, масс. % – 9,0; усредненный размер частичек WC, мкм – 5,5; твердость, *HV*, ГПа – 12,15; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 19; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,7; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,3 [306].

ВК8КС – твердый сплав вольфрамовой группы.

Свойства: размер зерен карбида вольфрама, мкм – 3,3; содержание вольфрама в кобальте, % – 6,0; твердость, *HRA* – 88,5 [310]; твердость, *HV*, ГПа – 12,5 [306]; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,1–2,2 [306, 310]; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,9 [306]; предел текучести при непропорциональном удлинении, $R_{p0,1}$, ГПа – 2,8; предельная пластическая деформация, % – 2,1 [310]; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 16 [306, 310]; работа деформации сплава, МДж/м³ – 135; коэффициент энергопоглощаемости, являющийся отношением работы пластической составляющей к упругой при деформации сплава – 3,2 [306]; коэрцитивная сила, кА/м – 7,3 [310].

ВК8НСТ – твердый сплав вольфрамовой группы.

Подгруппа применения по *ISO* – К25–К35 (М20–М30). Маркировка ВНИИТС (Россия) – ВТ331. Применение – черновое точение и растачивание серых чугунов при неравномерном сечении среза и прерывистом реза-

нии, зенкерование и сверление отверстий, обработка цветных металлов и неметаллических материалов, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов в неблагоприятных условиях и нежестком оборудовании. Получистовое фрезерование ковкого чугуна, серого чугуна с шаровидным графитом, высоколегированных нержавеющей и жаропрочных сталей [304].

ВК8ХОМ – твердый сплав ультрамелкозернистой структуры вольфрамовой группы с легирующей добавкой Cr_3C_2 .

Свойства: коэрцитивная сила, кА/м – 22,8; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,453; твердость, *HRA* – 92; % зерен размером до 1 мкм – 86 [312].

ВК10 – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый склад, масс. %: фаза WC – 90, фаза Co – 10.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 14,2–14,6 [10, 297, 300]; усредненный размер частичек WC, мкм – 1–2 [301]; твердость, *HRA* – 87 [10, 297, 300, 301]; твердость, *HV*, ГПа – 13 [10]; модуль упругости, ГПа – 575–590 [10, 301]; модуль сдвига, ГПа – 220; коэффициент Пуассона – 0,22; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,6 [10]; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,12 [317]; вязкость разрушения, $\text{МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ – 11,6 [129]; коэрцитивная сила, кА/м – 8,0–11,1 [228].

Технологические особенности – температура спекания, °C – 1390 ± 30 (в среде водорода), 1380 ± 30 (в вакууме); продолжительность выдержки, мин – 20–30 (в среде водорода), 40–60 (в вакууме) [299].

Применение – волочение, армирование деталей, штамповый инструмент [297]; волочение и калибрование прутков и труб из стали, цветных металлов и их сплавов со средней степенью обжатия, быстроознашиваемые детали машин и приборов, и измерительный инструмент, работающий при ударных нагрузках средней интенсивности [300].

ВК10КС – твердый сплав вольфрамовой группы с содержанием кобальта, масс. % – 10; усредненный размер частичек WC, мкм – 4.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 14,2–14,6 [300]; размер зерен карбида вольфрама, мкм – 3,6; содержание вольфрама в кобальте, % – 6,5 [310]; твердость, *HRA* – 85–87,5 [300, 310]; твердость *HV*, ГПа – 12,0 [306]; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,3; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,6 [306]; предел текучести при непропорциональном удлинении, $R_{p0,1}$, ГПа – 2,26; предельная пластичная деформация, % – 2,3 [310]; вязкость разрушения, $\text{МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ – 17; работа деформации сплава, МДж/м^3 – 151; коэффициент энергопоглощаемости, являющийся отношением работы пластической составляющей к упругой при деформации сплава – 3,6 [306]; коэрцитивная сила, кА/м – 5,0–6,2 [228].

Применение – штамповка, высадка, вытяжки легированных и специальных сталей при ударных нагрузках малой интенсивности [300].

ВК10М – твердый сплав вольфрамовой группы с мелкозернистой структурой, фазовый состав, масс. %: WC – 90, Co – 10.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 14,3–14,6 [300, 311]; размер зерен карбида вольфрама, мкм – 1,8 [310, 311, 318]; содержание вольфрама в кобальте, % – 5,5 [310]; пористость, % – до 0,2 [311]; твердость, *HRA* – 88 [300, 311]; твердость *HV*, ГПа – 12,9 [318]; модуль упругости, ГПа – 600 [298]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,6 [318]; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,9 [318]; предел текучести при непропорциональном удлинении, $R_{p0,1}$, ГПа – 3,36 [310]; предельная пластическая деформация, % – 1,4 [318]; ударная вязкость, кДж/м^2 – 26 [298]; вязкость разрушения, $\text{МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ – 12,5 [310]; удельное электросопротивление, $\text{мкОм}\cdot\text{м}$ – 0,184 [318]; коэрцитивная сила, кА/м – 11,9–15,9 [311].

Технологические особенности – температура спекания, $^{\circ}\text{C}$ – 1370 ± 20 (в среде водорода), 1380 ± 10 (в вакууме); продолжительность выдержки, мин – 20–30 (в среде водорода), 20–40 (в вакууме) [299].

Применение – сверление, зенкерование, развертывание, фрезерование и зубофрезерование стали, чугуна, некоторых труднообрабатываемых материалов и неметаллов цельнотвердосплавным мелкозернистым инструментом [300].

ВК10ОМ – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: фаза WC – 88, фаза Co – 10, карбид тантала – 2 [300].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 14,3–14,6 [300, 310]; размер зерен карбида вольфрама, мкм – 1,4 [311, 318]; пористость, % – до 0,2 [310]; % зерен размером до 1 мкм – 58 [312]; твердость, *HRA* – 88,5 [300, 311]; твердость, *HV*, ГПа – 15,0 [318]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,6; предел прочности при сжатии, ГПа – 5,6; предельная пластическая деформация, % – 1,3 [318]; коэрцитивная сила, кА/м – 15,9–19,9 [311].

Технологические особенности – температура спекания, $^{\circ}\text{C}$, – 1390; продолжительность размола, час – 96 [311].

Применение – черновая и получистовая обработка твердых, легированных и отбеленных чугунов, некоторых марок нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, особенно сплавов на основе титана, вольфрама и молибдена, изготовление монолитного инструмента [300].

ВК10ХОМ – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: фаза WC – 89,2; карбид хрома – 0,8; фаза Co – 10.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 14,4; размер зерен карбида вольфрама, мкм – 1,3 [318]; % зерен размером до 1 мкм – 80 [312]; твердость, *HRA* – 91,5 [312, 318]; твердость, *HV*, ГПа – 14,5; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,17; предел прочности при сжатии, ГПа – 5,73; предельная пластическая деформация, % – 1,2; удельное электросопротивление, $\text{мкОм}\cdot\text{м}$ – 0,253 [318]; коэрцитивная сила, кА/м – 18,5–20,2 [228].

ВК11В – твердый сплав вольфрамовой группы с содержанием кобальта, масс. % – 11; усредненный размер частичек WC, мкм – 4.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,1–14,4; твердость, *HRA* – 86 [300]; твердость *HV*, ГПа – 11,5 [306]; диаметр частичек WC, мкм – 4,8; модуль упругости, ГПа – 565 [298]; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,3; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,5; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 17; работа деформации сплаву, МДж/м³ – 140; коэффициент энергопоглощаемости – 3,3 [306]; коэрцитивная сила, кА/м – 6,4 [298].

Области применения – ударно-поворотное, ударно-вращательное и вращательно-ударное бурение шпуров и скважин в очень крепких и абразивных горных породах с коэффициентом крепости до 18 по шкале Прото-дьяконова [300].

ВК11ВК – среднезернистый твердый сплав вольфрамовой группы с содержанием кобальта для оснащения долот нефтяного бурения [319], фазовый состав, масс. %: WC – 89, Co – 11 [300].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 14,1–14,4 [300]; усредненный размер частичек WC, мкм – 3; твердость, *HRA* – 87,5; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,28; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,13; работа деформации сплава, МДж/м³ – 112; коэрцитивная сила, кА/м – 6,6 [319],

Применение – шарошечное бурение геологоразведочных, эксплуатационных и взрывных шпуров и скважин в вязких, средней твердости и твердых абразивных горных породах с коэффициентом крепости 10 по шкале Прото-дьяконова [300].

ВК12КС – крупнозернистый твердый сплав вольфрамовой группы для оснастки долот нефтяного бурения дробяще-колющего действия: содержание кобальта, масс. % – 12; усредненный размер частичек WC, мкм – 4.

Свойства: усредненный размер частичек WC, мкм – 4,1 [319]; содержание вольфрама в кобальте, % – 5,5 [310]; твердость, *HRA* – 86–87 [310, 319]; твердость, *HV*, ГПа – 11,0 [306]; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,4 [306, 319]; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,65; предел прочности при непропорциональном удлинении, $R_{p0,1}$, ГПа – 2,14; предельная пластичная деформация, % – 2,6 [310]; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 18,0–19,4 [306, 310]; работа деформации сплава, МДж/м³ – 169–172 [306, 319]; коэффициент энергопоглощаемости, являющийся отношением работы пластической составляющей к упругой при деформации сплава – 3,2 [306]; коэрцитивная сила, кА/м – 5,0–5,5 [310, 319].

ВК15 – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 85, Co – 15.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 13,9–14,1 [10, 297, 300]; усредненный размер частичек WC, мкм – 2–2,5 [294]; усредненный размер прослоек

кобальта, мкм – 0,55 [320]; содержание вольфрама в кобальте, % – 8,5 [310]; твердость, HRA – 86,5 [319, 321]; твердость HV , ГПа – 12,3 [320]; модуль упругости, ГПа – 540 [298]; модуль сдвига, ГПа – 180 [10]; коэффициент Пуассона – 0,21 [298]; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,0–2,2 [290, 301, 320]; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,0 [290, 310, 319]; предел текучести при непропорциональном удлинении, $R_{p0,1}$, ГПа – 2,2 [310]; предел текучести, ГПа – 3,2 [307]; вязкость разрушения, $MПа \cdot м^{0,5}$ – 16,5–16,7 [129, 290]; ударная вязкость, $кДж/м^2$ – 34–38 [298, 320]; работа деформации сплава, $МДж/м^3$ – 118 [319]; предельная пластическая деформация, % – 2,6 [310]; теплопроводность, $Вт/(м \cdot К)$ – 65,3–70,3 [10, 111]; коэрцитивная сила, $кА/м$ – 5,6–8,0 [228].

Технологические особенности – температура спекания, $^{\circ}C$ – 1390 ± 50 (в среде водорода), 1390 ± 30 (в вакууме); продолжительность выдержки, мин – 30–45 (в среде водорода), 40–60 (в вакууме) [299].

Согласно ТУ 48-19-165-84 должно быть: степень пористости, %, не более чем 0,2; содержание свободного углерода, %, не более чем 0,2; содержание графита, %, не более чем 0,5; фаза WC: величина зерна, мкм – 1–2, количество зерен, %, не менее 50; наличие фазы типа η (двойного карбида вольфрама и кобальта кружевной и озерковой форм) недопустимо; пустоты более 50 мкм допускаются суммарной протяженностью до 200 мкм.

Применение – обработка резанием, волочение, армирование деталей, штамповый инструмент, бурение горных пород [297]. Ударно-поворотное, ударно-вращательное бурение шпуров и скважин в высшей степени крепких горных пород с коэффициентом крепости до 20 по шкалою Протодяконова, штамповка, высадка, вытяжки углеродистых и качественных сталей при ударных нагрузках малой интенсивности, волочение и прессование прутков и труб из стали при повышенной степени обжатия [300].

ВК15КС – крупнозернистый твердый сплав вольфрамовой группы.

Свойства: содержание вольфрама в кобальте, % – 6,0; усредненный размер частичек WC, мкм – 3,8; твердость, HRA – 86,0; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,61; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,5; предел текучести при непропорциональном удлинении, $R_{p0,1}$, ГПа – 2,06; вязкость разрушения, $MПа \cdot м^{0,5}$ – 20,2; предельная пластическая деформация, % – 3,4; коэрцитивная сила, $кА/м$ – 4,9 [245].

ВК15ХОМ – твердый сплав вольфрамовой группы.

Свойства: усредненный размер частичек WC, мкм – 1,25; плотность, $\cdot 10^3$ $кг/м^3$ – 14,0; твердость, HRA – 90,0; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,13; предел прочности при сжатии, ГПа – 5,07; коэрцитивная сила, $кА/м$ – 16,4 [322].

ВК20 – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 80, Co – 20.

Свойства: диаметр зерна WC, мкм – 1–2 [301]; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 13,4–13,7 [228]; твердость, *HRA* – 84 [300]; модуль упругости, ГПа – 480 [301]; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,3; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,40 [301, 320]; работа разрушения, Дж/см³ – 93; ударная вязкость, кДж/м² – 67 [298]; коэрцитивная сила, кА/м – 4,6–6,0 [228].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1360±30 (в среде водорода), 1360±20 (в вакууме); продолжительность выдержки, мин – 30–45 (в среде водорода), 40–60 (в вакууме) [299].

Применение – штамповка, высадка, обрезка углеродистых и качественных сталей при ударных нагрузках средней и высокой интенсивности [300].

ВК20К – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 80, Co – 20.

Свойства: диаметр зерна WC, мкм – 10,2 [298]; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 13,2–13,4; твердость, *HRA* – 80 [300]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,47 [298], 1,764 [300]; предел прочности при сжатии, ГПа – 2,48; работа разрушения, Дж/см³ – 215; ударная вязкость, кДж/м² – 28 [298].

Применение – объемная штамповка и высадка при обычной и повышенной температуре, углеродистых и специальных сталей при ударных нагрузках высокой интенсивности [300].

ВК20КС – крупнозернистый твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 80, Co – 20.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 13,4–13,7; твердость, *HRA* – 82; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,107 [300]; коэрцитивная сила, кА/м – 3,6–4,2 [228].

Применение – штамповка, высадка, обрезка легированных и специальных сталей при ударных нагружениях средней интенсивности [300].

ВК25 – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 75, Co – 25.

Свойства: усредненный размер частичек WC, мкм – 2,0 [298]; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,9–13,2; твердость, *HRA* – 82 [300]; твердость, *HV*, ГПа – 8,7 [290]; модуль упругости, ГПа – 470–474 [298, 301]; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,10 [290, 301]; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,03 [290, 301]; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 17,8 [290]; коэрцитивная сила, кА/м – 4,8–5,6 [228].

Технологические особенности – температура спекания, °С – 1340±20 (в среде водорода), 1340±10 (в вакууме); продолжительность выдержки, мин – 30–45 (в среде водорода), 40–60 (в вакууме) [299].

Применение – штамповка, высадка, обрезка углеродистых и качественных сталей при ударных нагрузках высокой интенсивности [300].

ВК50 – твердый сплав вольфрамовой группы.

Свойства: размер зерна карбида вольфрама, мкм – 2,2; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 11,34; твердость, *HRA* – 76; модуль упругости, ГПа – 325; коэрцитивная сила, кА/м – 3,4 [321].

ВК98 – твердый сплав вольфрамовой группы.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 8,54; твердость, *HRA* – 56; коэрцитивная сила, кА/м – 0,4; модуль упругости, ГПа – 220 [321].

ВН20 – вольфрамсодержащие твердые сплавы с никелевой связкой (WC+20 % Ni).

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 13,3; твердость, *HRA* – 83; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 20; предел прочности при изгибе, ГПа – 2,2 [323].

Т5К7 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 88, Со – 7, TiC – 5 [280].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,6; твердость, *HRA* – 89,9; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,26; теплопроводность, Вт/(м \cdot К) – 31,8; удельная теплоемкость, Дж/(кг \cdot К) – 217,7; удельное электросопротивление, мкОм \cdot м – 0,213; КЛТР, 10^{-6} град⁻¹ – 5,5 [280].

Т5К10 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 85, Со – 10, TiC – 5 [280]; WC – 85, Со – 9, TiC – 6 [297, 300].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,3–13,2 [10, 297]; твердость, *HRA* – 88,5 [10, 280, 297, 300]; твердость, *HV*, ГПа – 15 [10]; модуль упругости, ГПа – 600 [10, 303]; модуль сдвига, ГПа – 245; коэффициент Пуассона – 0,22 [10]; предел прочности при изгибе, МПа – 1350; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,5 [10, 303]; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 11,2 [222]; КЛТР, 10^{-6} град⁻¹ – 5,5 [10]; электрохимические эквиваленты, массовый $\cdot 10^{-6}$ кг/(А \cdot с) – 0,292 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А \cdot с) – 0,228 [71].

Подгруппа применения по *ISO* – P25-P35. Маркировка ВНИИТС (Россия) – ВТ130. Применение – обдирочное и черновое точение и расточка при прерывистом резании; черновое точение при обработке по копиру; отрезка, получистовое строгание и другие виды обработки углеродистых и легированных сталей в виде поковок, штамповок и отливок по корке и окалине. Черновое фрезерование конструкционных сталей с высоким сопротивлением ударам. Работа в тяжелых условиях на нежестком изношенном оборудовании [304].

Аналог – МС131 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 36,5, раствор TiC–WC – 38,0, раствор TaNbC –

16,0, Со – 9,5; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 11,35–11,51; твердость, *HV*, ГПа – 14,3–15,7; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,372; коэрцитивная сила, кА/м – 9,0–10,8 (аналог фирмы «Sandvik» – *S4*).

Аналоги: МС131, МР3 (МКТС), *P25* (Hertel), *S30T* (Sandvik). Применение: черновая обработка стали и стального литья, прерывистое резание [309].

T5K12 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 83, Со – 12, TiC – 5 [300].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 13,1–13,5; твердость, *HRA* – 87; предел прочности при изгибе, МПа – 1666 [300].

Применение – тяжелое черновое точение стальных поковок, штамповок и отливок по корке с раковинами при наличии песка, шлака и разных неметаллических включений, при неравномерном сечении среза и наличии ударов. Все виды строгания углеродистых и легированных сталей, сверление отверстий в стали [300].

T5K12B – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 83, Со – 12, TiC – 5 [297].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,8–13,3; твердость, *HRA* – 87 [10, 297]; твердость, *HV*, ГПа – 13; коэффициент Пуассона – 0,22 [10]; предел прочности при изгибе, МПа – 1470 [297].

Применение – для тяжелого чернового точения стальных поковок, штамповок и отливок по корке с раковинами, неравномерном сечении среза и наличии ударов, для чернового строгания и фрезерования [297].

T8K7 – твердый сплав титановольфрамовой группы. Микроструктура: содержание свободного углерода, %, не более чем 0,2; фаза WC: величина зерна, мкм – 1–2, количество зерен, %, не менее чем 75 [324].

Согласно ТУ 48-19-140-79 должно быть: степень пористости, %, не более чем 0,2; содержание свободного углерода, %, не более чем 0,2; фаза WC: величина зерна, мкм – 1–2, количество зерен, %, не менее чем 75; наличие фазы типа η (двойного карбида вольфрама и кобальта кружевной и озерковой форм) не допустимо; содержание в масс. %: WC – 85, TaC – 0,5, TiC – 7,5, Со – 7,0.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,8–13,1 [304]; твердость, *HRA* – 90,5–91,5 [324]; предел прочности при изгибе, МПа – 1519; коэрцитивная сила, кА/м – 14,2–17,5 [304].

Подгруппа применения по *ISO* – K15. Маркировка ВНИИТС (Россия) – *BM315*. Применение – универсальная марка для получистового и чернового фрезерования сплошных и прерывистых поверхностей деталей из чугунов, алюминиевых кремнистых сплавов и других цветных металлов, коленчатых валов из легированных чугунов [304].

Аналог – MC318 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 77,3, раствор TiC–WC – 15,4, Co – 7,3; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,80–12,96; предел прочности при изгибе, МПа – 1470 (аналог фирмы «Sandvik» – HM).

Аналоги: MC318, МК8 (МКТС), КМН (Hertel), Н13А (Sandvik). Применение: фрезерование сырых, низколегированных чугунов, алюминиевых сплавов, пластмасс [309].

T14K8 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 78, Co – 8, TiC – 14 [297, 300].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 11,2–12,0 [10, 297]; твердость, HRA – 89,5 [10, 297, 300]; твердость, HV, ГПа – 14–15; модуль упругости, ГПа – 550; модуль сдвига, ГПа – 225; коэффициент Пуассона – 0,21 [10]; предел прочности при изгибе, МПа – 1225–1274 [10, 300]; предел прочности при сжатии, ГПа – 4,0 [10]; ударная вязкость, кДж/м² – 20,2; трещиностойкость, МПа \cdot м^{0,5} – 8,7 [306]; КЛТР, 10⁻⁶ град⁻¹ – 6,0 [10].

Подгруппа использования по ISO – P15-P25. Маркировка ВНИИТС (Россия) – BT120. Применение – получистовое и черновое точение при равномерном сечении среза и непрерывном резании; получистовое и чистовое точение при неблагоприятных условиях работы, получистовая обточка и расточка при обработке по копиру; черновое зенкерование и растачивание. Получистовое фрезерование стальных деталей [304].

Аналог – MC121 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 62,8, раствор TiC–WC – 24,0, раствор TaNbC – 5,0, Co – 8,2; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 11,60–11,79; твердость, HV, ГПа² – 14,75–16,25; предел прочности при изгибе, МПа – 1176; коэрцитивная сила, кА/м – 7,3–9,6 (аналог фирмы «Sandvik» – S2).

Аналоги: MC121, MP2 (МКТС), P20 (Hertel), S2 (Sandvik). Применение: черновая и получистовая обработка стали, а также ковкого чугуна, дающего сливную стружку [309].

T15K6 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 39, раствор TiC–WC – 50, Co – 11; размер зерен основной фракции, мкм: фаза WC – 1–2, раствор TiC–WC – 2–5, толщина прожилков фазы Co – 11 [45]; фазовый состав, масс. %: WC – 79, TiC – 15, Co – 6 [280, 297, 300].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 11,0–11,7 [10, 297]; усредненный размер частичек карбидной фазы, мкм – 2–5 [315]; размер зерен карбидной фазы, мкм: WC – 2,33, TiC – 3,6 [326]; твердость, HRA – 90 [10, 297, 300, 315]; твердость, HV, ГПа – 15–16 [10]; модуль упругости, ГПа – 530 [45, 315]; модуль сдвига, ГПа – 227; коэффициент Пуассона – 0,21 [10]; предел прочности при изгибе, МПа – 1150 [71, 303, 315]; предел прочности при

сжатию, ГПа – 4,3 [45, 315]; предел прочности при растяжении, ГПа – 49; предел прочности при кручении, ГПа – 73,5 [280]; вязкость разрушения, МПа·м^{0,5} – 7,2 [222]; ударная вязкость, кДж/м² – 19,8 [45, 325]; трещиностойкость, МПа·м^{0,5} – 8,5–10,8 [303, 325]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 27,2 [18, 71, 280, 327]; температуропроводность, ·10⁵ м²/с – 1,1 [115]; удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) – 0,209–0,226 [18, 280]; удельное электросопротивление, мкОм·м – 0,399 [280]; КЛТР, 10⁻⁶·град⁻¹ – 5,5–5,6 [10]; коэрцитивная сила, кА/м – 12,2 [45]; электрохимические эквиваленты: массовый, ·10⁻⁶ кг/(А·с) – 0,277 и объемный, ·10⁻¹⁰ м³/(А·с) – 0,243 [71]; теплоустойчивость, °С – 850–900 [281]; термостойкость на воздухе, °С – 600 [303].

Подгруппа применения по *ISO* – P10–P20. Маркировка ВНИИТС (Россия) – ВТ110, а в случае покрытия TiC – ВТ112. Применение – получистовое точение углеродистых, конструкционных и легированных сталей, стального литья при непрерывном резании; чистовая расточка и точение при обработке по копиру; чистовая обработка при прерывистом резании; зенкерование и развертывание с высокими скоростями резания и средними сечениями срезу [304].

Аналог – МС111 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 36,5, раствор TiC–WC – 38,0, раствор TaNbC – 16,0, Co – 9,5; плотность, ·10³ кг/м³ – 10,22–10,68; твердость, *HV*, ГПа – 15,25–16,75; предел прочности при изгибе, МПа – 1127; коэрцитивная сила, кА/м – 8,7–11,9 (аналог фирмы «Sandvik» – S1P).

Аналоги: МС111, МР1 (МКТС), P10 (Hertel), S1P (Sandvik). Применение: черновая и получистовая обработка стали [309].

T15K12 – твердый сплав титановольфрамовой группы.

Аналог – МС146 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 73, раствор TiC–WC – 8,0, раствор TaNbC – 8,0, Co – 11,0; плотность, ·10³ кг/м³ – 13,04–13,20; твердость, *HV*, ГПа – 13,2–14,6; предел прочности при изгибе, МПа – 1764; коэрцитивная сила, кА/м – 9,9–13,1 (аналог фирмы «Sandvik» – S6).

Подгруппа применения по *ISO* – P30–P40. Маркировка ВНИИТС (Россия) – ВТ141. Аналог – МС146. Области применения – особенно тяжелые условия фрезерования конструкционных углеродистых и легированных сталей, стального литья, поковок [304].

T30K4 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 66, Co – 4, TiC – 30 [297, 300].

Свойства: плотность, ·10³ кг/м³ – 9,5–9,8; твердость, *HRA* – 92 [10, 297, 300]; твердость, *HV*, ГПа – 18,0–18,5 [10]; модуль упругости, ГПа – 500 [10, 303]; модуль сдвига, ГПа – 206; коэффициент Пуассона – 0,21 [10]; предел прочности при изгибе, МПа – 900 [280, 303]; предел прочности при

сжатии, ГПа – 4,0 [10, 303]; ударная вязкость, кДж/м² – 19,8 [71]; теплопроводность, Вт/(м·К) – 16,7 [10, 303]; КЛТР, 10⁻⁶·град⁻¹ – 5,0–6,5 [10]; коэрцитивная сила, кА/м – 8,0–13,6 [280]; электрохимические эквиваленты: массовый, ·10⁻⁶ кг/(А·с) – 0,268 и объемный, ·10⁻¹⁰ м³/(А·с) – 0,276 [71].

ТТ7К12 – твердый сплав титанотанталовольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 81, Со – 12, TiC – 4, TaC – 3 [297, 300].

Свойства: плотность, ·10³ кг/м³ – 13,0–13,3; твердость, *HRA* – 87 [297, 300]; модуль упругости, ГПа – 560; предел прочности при изгибе, МПа – 1600 [303]; электрохимические эквиваленты: массовый, ·10⁻⁶ кг/(А·с) – 0,296 и объемный, ·10⁻¹⁰ м³/(А·с) – 0,226 [71].

Аналог – MC146 – твердый сплав титанотанталовольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 77,0, TiC – 4,0, TaC – 6,1, NbC – 1,9, Со – 11,0; плотность, ·10³ кг/м³ – 13,04–13,20; твердость, *HV*, ГПа – 13,2–14,6; предел прочности при изгибе, МПа – 1770 (аналог фирмы «Sandvik» – *S6*).

Применение – черновое точение при неблагоприятных условиях работы; черновое строгание и фрезерование [297]; тяжелое черновое точение стальных поковок, штамповок и отливок по корке с раковинами при наличии песка, шлака и разных неметаллических включений при равномерном сечении среза и наличия ударов. Все виды строгания углеродистых и легированных сталей, тяжелое черновое фрезерование углеродистых и легированных сталей [300].

Аналоги: MC146, MP4 (МКТС), *PVA* (Hertel), *S6* (Sandvik). Применение: черновое точение и фрезерование стали и стального литья по корке при прерывистом резании. ТТ7К12 с покрытиями TiN–TiC/N–Al₂O₃ – MC1460, MA2 (МКТС). Применение: марка с износостойким покрытием для черновой и получистовой обработки стали, в т.ч. нержавеющей. ТТ7К12 с покрытиями TiN–TiC/N–TiN – MC1465, MT2 (МКТС), *CM3*, *CM4* (Hertel), *GS435* (Sandvik). Применение: марка с износостойкими покрытиями для черновой и получистовой обработки стали, стального литья, легированных сталей [309].

ТТ7К12М – твердый сплав титанотанталовольфрамовой группы.

Подгруппа применения по *ISO* – P40. Маркировка ВНИИТС (Россия) – ВТ142. Применение – тяжелое черновое точение стальных поковок и отливок по корке с раковинами и неметаллическими включениями при неравномерном сечении среза и ударами; все виды строгания; работа на нежестком оборудовании. Особенно тяжелые условия фрезерования конструкционных углеродистых и легированных сталей, стального литья, поковок [309].

ТТ8К6 – твердый сплав титанотанталовольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 84, Со – 6, TiC – 8, TaC – 2 [300].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,8–13,3; твердость, *HRA* – 90,5; предел прочности при изгибе, МПа – 1323; коэрцитивная сила, кА/м – 15,9–20,7 [300].

Применение – чистовое и получистовое точение, расточка, фрезерование и сверление серого и ковкого чугуна, непрерывное точение с небольшими сечениями среза стального литья, высокопрочных, нержавеющей сталей, в т. ч. закаленных, обработка сплавов цветных металлов и некоторых марок титановых сплавов при резании с малыми и средними сечениями срезу [300].

Аналог – МС312 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 77,7, раствор TiC–WC – 15,4, раствор TaNbC – 1,0, Co – 5,9; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,79–12,95; предел прочности при изгибе, МПа – 1274 (аналог фирмы «Sandvik» – *HIP*).

Подгруппа применения по *ISO* – K05–K15. Маркировка ВНИИТС (Россия) – ВТ310. Применение – чистовое и получистовое обтачивание и расточка; нарезание резьбы, развертывание серого чугуна твердостью ≥ 220 ед. *HV*, ковкого чугуна, сплавов алюминия и других цветных металлов и сплавов, графита и неметаллических материалов, нержавеющей, жаропрочных и титановых сталей и сплавов, композиционных материалов. Универсальная марка для чистового фрезерования серого, ковкого и отбеленного чугуна, автоматной стали, цветных металлов и сплавов, а также неметаллических материалов [304].

Аналоги: МС312, МК1 (МКТС), *K10* (Hertel), *HIP* (Sandvik). Применение: чистовая и получистовая обработка чугуна, в т.ч. отбеленного, цветных металлов, пластмасс, закаленных сталей при повышенных скоростях [309].

ТТ10К8Б – твердый сплав титанотанталовольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 82, Co – 8, TiC – 3, TaC – 7 [300].

Согласно ТУ 48-19-160-75 должно быть: степень пористости, %, не более чем 0,2; содержание графита, %, не более как 0,5; фаза WC: величина зерна, мкм – 1–2, количество зерен, %, не менее как 50; наличие фазы типа η (двойного карбида вольфрама и кобальта кружевной и озерковой форм) не допустимо; пустоты, более чем 50 мкм не допускаются.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 13,5–13,8; твердость, *HRA* – 89; предел прочности при изгибе, МПа – 1617 [300]; коэрцитивная сила, кА/м – 7,95–11,1; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 8,6 [222].

Аналог – МС221 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 83,3, раствор TiC–WC – 5,2, раствор TaNbC – 6,0, Co – 5,5; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 13,81–13,97; твердость, *HV*, ГПа – 15,5–16,3; предел прочности при изгибе, МПа – 1372; коэрцитивная сила, кА/м – 10,3–13,7 (аналог фирмы «Sandvik» – *SH*).

Аналоги: MC221, MM2 (МКТС). Применение: черновая и получистовая обработка легированной стали, стального литья, марганцовистой и колесной сталей. TT10K8Б с покрытием TiN–TiC/N–Al₂O₃ – MC2210, MA1 (МКТС), CP313E (Hertel), GC3015 (Sandvik). TT10K8Б с покрытием TiN–TiC/N–TiN – MC2215, MT1 (МКТС), CM2 (Hertel), GS425 (Sandvik). Применение: с износостойким покрытием для чистовой и получистовой обработки стали [309].

Подгруппа применения по *ICO* – M20–M30. Маркировка ВНИИТС (Россия) – BT220. Применение – получистовое и черновое точение, растачивание, строгание и сверления ковкого чугуна, серого чугуна с шаровидным графитом, высоколегированной вязкой стали та стального литья, автоматной стали, нержавеющей, марганцовистых сталей и жаропрочных сплавов, в т.ч. при обработке по копиру со средними сечениями среза. Получистовое фрезерование ковкого чугуна, серого чугуна с шаровидным графитом, высоколегированных нержавеющей и жаропрочных сталей [304].

TT20K9 – твердый сплав титанотанталовольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: WC – 67, Co – 9,5, TiC – 9,4, фаза TaC – 14,1 [300].

Согласно ТУ 48-19-140-79 должно быть: степень пористости, %, не более чем 0,2; содержание свободного углерода, %, не более чем 0,1; фаза WC: величина зерна, мкм – 1–2, количество зерен, %, не менее чем 75; наличие фазы типа η (двойного карбида вольфрама и кобальта кружевной и озерковой форм) недопустимо; содержание в масс. %: WC – 67, TaC – 14,1, TiC – 9,4, Co – 9,5.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12,0–12,5; твердость, *HRA* – 91; предел прочности при изгибе, МПа – 1470; коэрцитивная сила, кА/м – 10,4–15,2 [300]; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,296 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,243 [71].

Аналог MC137 – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 60,2, раствор TiC–WC – 19,6, раствор TaNbC – 9,4, Co – 10,8; плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 11,68–11,34; твердость, *HV*, ГПа – 14,85–16,35; предел прочности при изгибе, МПа – 1372; коэрцитивная сила, кА/м – 13,1–15,5 (аналог фирмы «Sandvik» – *SM*).

Подгруппа применения по *ICO* – P15–P30. Маркировка ВНИИТС (Россия) – VM126. Применение – фрезерование деталей из конструкционных и легированных сталей, фрезерование коленчатых валов, глубоких пазов. Сплав высокоуниверсален и имеет высокую стойкость к термоциклическим нагрузкам и хорошо сопротивляется образованию трещин [304].

TT20K9A – твердый сплав титанотанталовольфрамовой группы на основе TT20K9, эксплуатационные свойства которого улучшены за счет

снижения количества свободного углерода и уменьшения размера зерен карбидных фаз. Область применения – фрезерование [324]. Микроструктура: содержание свободного углерода, %, не более чем 0,1; фаза WC: величина зерна, мкм – 1–2, количество зерен, %, не менее чем 75; фаза TiC–WC: величина зерна, мкм – 1–2, количество зерен, %, не менее чем 75.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 12–13; твердость, *HRA* – 91; предел прочности при изгибе, МПа – 1300; коэрцитивная сила, кА/м – 10,3–15,1 [324].

Аналоги: MC137, MP7 (МКТС), P2F (Hertel), SMA (Sandvik). Применение: универсальная марка для фрезерования стали [309].

ТТ21К9 – твердый сплав титанотанталовольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: WC – 69,8, TiC – 8,7, TaC – 12,5, Co – 9.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 11,6–11,9; твердость, *HRA* – 91,0; предел прочности при изгибе, МПа – 1470; коэрцитивная сила, кА/м – 11,1–15,1.

Подгруппа применения по *ISO* – P15–P30. Маркировка ВНИИТС (Россия) – VM125. Применение – фрезерование деталей из конструкционных и легированных сталей, фрезерование коленчатых валов, глубоких пазов. Сплав высокоуниверсален, имеет высокую стойкость к термоциклическим нагрузкам и хорошо сопротивляется трещинообразованию [304].

В случае применения напайных резцов из твердого сплава пайку проводят с помощью серебряного припоя Cr45 с температурой плавления 610 °С, латунного припоя Л62 с температурой плавления 905 °С или припоя АНМц0,6-4-2 с температурой плавления 1050 °С. На износостойкость паяных резцов влияют два основных фактора, связанных с пайкой: высокотемпературный нагрев твердого сплава и внутренние напряжения, имеющиеся в сплаве. Установлено [328], что большая часть снижения режущих свойств приходится на потери от нагрева сплава при пайке (сплав Т5К10, обрабатываемый материал 30ХГСА с твердостью *HRC* 35–38:

Температура нагрева, °С	Износ (мм) по задней грани (механическое крепление)	Температура плавления припоя, °С	Износ (мм) по задней грани (паяное соединение)	Время работы резца, мин
Без нагрева	0,131	–	–	40
610	0,146	610	0,163	
905	0,165	905	0,182	
1050	0,180	1050	0,200	

Наличие припоя влияет и на шлифуемость таких паяных инструментов.

Укажем, что ряд современных твердых сложнолегированных сплавов, обработка которых значительно усложнена. К ним относятся сплавы

легированные карбидами тантала и ванадия: группа ТТК (ТТ20К9, ТТ8К6, ТТ10К8Б и др.) и сплавы типа ОМ (ВК6 ОМ, ВК10 ОМ, ВК10 ХОМ) (ОМ – означает, что твердый сплав дополнительно легирован карбидами VC и TiC. ХОМ – обозначает, что твердый сплав типа ОМ еще дополнительно легирован Cr_3C_2 . ХТМ – обозначает, что твердый сплав типа ОМ еще дополнительно легирован карбидами Cr_3C_2 , TiC и MoC). Преимущественно это связано с тем, что дополнительное легирование карбидами ванадия и титана способствует формированию тонкозернистых твердых сплавов, в которых размер зерен не более 1 мкм. При этом, повышается сопротивление пластическому деформированию сплава, но ухудшается его шлифуемость. Укажем, что в литературе имеются значительные разногласия в рекомендациях по путям достижения эффективной технологии шлифования современных сложнолегированных сплавов. Практически отсутствуют данные по связи свойств твердых сплавов с исходными показателями технологий. Между тем, исследованиями [284] установлено, что описанное выше легирование значительно повышает износ алмазных кругов и шероховатость обработанной поверхности (табл. 5.2).

Таблица 5.2. Сравнительные данные по обрабатываемости твердых сплавов [284]

Марка твердого сплава	Сравнительные коэффициенты (ВК6 – 1,0)		
	Относительный расход алмазов	Эффективная мощность шлифования	Шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra
ВК3М	0,92	0,56	1,31
ВК6	1,00	1,00	1,00
ВРК15	1,28	0,80	0,81
ТТ10К8Б	1,38	0,80	1,33
ТТ21К9	1,62	0,95	0,44
ТТ8К6	1,66	0,60	1,42
ВК6 ОМ	3,92	0,70	1,16
ВК10 ОМ	4,38	0,75	1,61
ВК10 ХОМ	6,85	0,60	1,59

Особенности алмазной обработки твердых сплавов рассмотрены нами ниже для разных условий такой обработки.

Важным фактором оценки таких особенностей является влияние свойств твердых сплавов на их обрабатываемость. В работе [117] получен ряд корреляционных зависимостей, отражающих характер тенденций влияния свойств твердых сплавов на износ (относительный расход алмазов – q_p в кругах) кругов при их шлифовании:

– с ростом, соответственно, плотности ρ , твердости H_{mc} и прочности при изгибе R_{bm} сплавов расход алмазов снижается:

$$q_p = 5,1 - 35,5 \cdot \rho, \quad q_p = 68,69 - 0,73 \cdot H_{mc}, \quad q_p = 1,049 + 2117,24/R_{bm};$$

– с возрастанием коэрцитивной силы (K_c) расход алмазов растет:

$$q_p = 4,323 - 24,26/K_c;$$

– увеличение величины зерен карбидной фазы ($Z_{кф}$) приводит к снижению расхода алмазов в круге:

$$q_p = -0,371 + 3,33/Z_{кф}.$$

Однако, прежде, чем рассматривать далее особенности обработки необходимо обратить внимание на то, что, как нами это показано в главе 3, в реальных алмазных кругах, получаемых по стандартной технологии спекания и прессования уже существует некоторое ориентирование алмазных зерен, которые «развалены» в рабочем слое под углами в 45° , т.е. уже существует некоторая структурная ориентация. На это обращали внимание выше в предыдущей главе. Играет ли это какую-то роль в работоспособности зерен? Оказывается, играет и это нами показано выше с точки зрения напряженного состояния в системе зерно-связка. Но играет ли указанная выше структурная ориентация с точки зрения работоспособности реальных кругов с реальными шлифпорошками алмазных зерен (АС4–АС15), которые широко используются в машиностроении? Этот вопрос в литературе не рассматривался, а как раз он и наиболее актуален для реальных шлифовальных кругов, и требуются конкретные решения и рекомендации именно по такому инструменту, который во многих случаях работает в различных условиях его применения, а рекомендации выдаются совершенно без условий такого конкретного применения, например, для шлифования кромкой круга, когда алмазы работают в совсем других условиях, чем при шлифовании торцом или периферией круга. Важность учета структурной организации рабочего слоя шлифовальных кругов из СТМ покажем на примере выбора характеристик кругов при шлифовании кромкой круга и стремления в выборе его характеристики к снижению зернистости алмазов и их относительной концентрации в отличие от рекомендаций при шлифовании периферией или торцом круга отдельно [329]. На последнее нами обращается внимание, так как именно при шлифовании кромкой круга и возникают совсем другие условия работы зерен, которые являются нехарактерными для обычного шлифования торцом или периферией круга. Исследования проводились в производственных условиях Светловодского комбината твердых сплавов и тугоплавких металлов. Целью исследований было определение работоспособности алмазных кругов формы 1А1 150×6×5×32 разных характеристик при шлифовании пазов по задним по-

верхностям отрезных пластин (рис. 5.5). Марка твердого сплава была выбрана из наиболее труднообрабатываемых – Т5К10. Обработка проводилась на оптико-шлифовальных станках мод. 395М. Режимы шлифования:

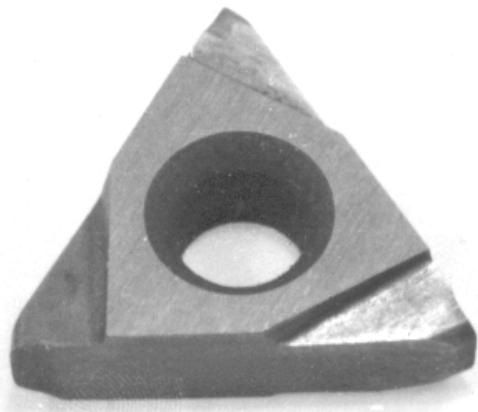


Рис. 5.5. Специальные отрезные пластины из твердого сплава Т5К10, на которых проводилась вышлифовка пазов [329]

скорость вращения круга – 27 м/с, продольная подача – 5 м/мин, глубина шлифования – 0,025 мм/дв.х. Обработка проводилась без охлаждения. На каждой пластине вышлифовывали по 3 паза.

Поскольку шлифование происходит без охлаждения, то вероятно лучшим, с точки зрения отвода тепла, является использование металлических связок. Однако, исследованиями [329] применительно к условиям шлифования кромкой круга твердого сплава без охлаждения выявлено, что алмазные круги на металлических связках М1-10 и М020-2 из-за недостаточной режущей

способности являются неработоспособными, а это приводит к разрушению твердого сплава, поэтому большее внимание было сосредоточено на кругах с полимерными связками. При этом, как это было указано нами выше, с учетом удовлетворительной режущей способности желательнее стремиться к более теплопроводным (электропроводным) связкам, а такими среди полимерных являются металлополимерные. Результаты сравнения работоспособности кругов на полимерных и металлополимерных связках представлены в табл. 5.3, из которой видно, что лучшим является использование металлополимерных связок типа В1-13. Работоспособность таких кругов при шлифовании кромкой круга приведена в табл. 5.4.

Таблица 5.3. Сравнение работоспособности кругов на различных полимерных связках при вышлифовывании пазов на пластинах из сплава Т5К10 [329]

Связка круга	Форма пластин	Количество правок, шт.	Среднее количество пластин, обработанных кругом до правки, шт.
В2-01	2005-4062	4-5	4
	2005-5017		8
В2-08	2005-4062	4-5	4
	2005-5017		8
В1-13	2005-4062	5	8
	2005-5017		18
В2-01 (Полтава)	2005-4062	4-5	Круги не работоспособны (обеспечивают не более одного врезания)
	2005-5017		

Таблица 5.4. Сравнение работоспособности кругов различных характеристик на металлополимерной связке В1-13 при вышлифовке пазов

Характеристика режущего слоя	Количество пластин обработанных кругом от правки до правки, шт.	Относительный расход алмазов, мг/г
Влияние зернистости алмазов		
АС6 125/100 – 100 %	9	31,4
АС6 80/63 – 100 %	12	14,4
Влияние относительной концентрации алмазов		
АС6 125/100 – 150 %	9	37,0
АС6 125/100 – 100 %	9	31,4
АС5С 125/100С22 – 150 %	8	51,8
АС5С 125/100С22 – 100 %	3	42,7
АС4 80/63 – 100 %	9	20,3
АС4 80/63 – 75 %	19	9,1
Влияние прочности алмазных зерен		
АС4 125/100 – 150 %	5	86,2
АС6 125/100 – 150 %	9	37,0
АС4 80/63 – 100 %	9	20,3
АС6 80/63 – 100 %	12	14,4
АС15 80/63 – 100 %	12	15,0
Влияние связки круга		
АС4 80/63 – В1-13 – 100 %	9	20,3
АС4 80/63 – ВС-Э – 100 %	16	10,8

Проведенные исследования позволили подтвердить приведенные нами выше предположения. Так, снижение зернистости алмазов с 125/100 до 80/63 без потери производительности позволяет почти в 2 раза снизить износ круга. Аналогично и снижение относительной концентрации алмазов со 150 до 100 %, или со 100 до 75 % (на другой зернистости) позволяет уменьшить износ кругов и особенно ярко это проявляется как раз на меньших зернистостях и меньших концентрациях. Укажем, что даже при стеклопокрытии алмазов существует та же самая тенденция. Попутно укажем, что покрытие алмазных зерен стеклом (С22), как и можно было ожидать, только ухудшает кромкостойкость кругов. Применение более прочных алмазов АС6, вместо АС4, позволяет повысить износостойкость кругов, а вот дальнейшее повышение прочности зерен до АС15 эффекта не дает. Сравнение износостойкости алмазных кругов на металлополимерных связках В1-13 и ВС-Э показывает, что более металлонасыщенные и электропроводные связки типа ВС-Э в кругах имеют и меньший износ, так как лучше отводят тепло из зоны обработки.

С чем связаны данные результаты? Как уже было показано выше, при стандартных условиях спекания кругов наблюдается развал зерен СТМ под углами в 45° и 135° в рабочем слое относительно направления усилия прессования. В свою очередь, зерна СТМ, которые размещены на кромке и работают на ней, находятся совсем в других условиях, поскольку имеют наклон относительно составляющих усилия резания уже не в 45° и 135° , а в 90° и 180° . Тем самым, создается иная ситуация в работе зерен СТМ на кромке и необходимо использовать совсем другие подходы, чем это является характерным для шлифования торцом круга. Причина такого явления заключается в том, что большинство исследователей никак не учитывает структурную ориентацию зерен и не обращает внимание на важность тезиса о регулировании коэффициента абразивного резания ($fa = P_z / P_y$). Наш подход является диаметрально противоположным. Мы принципиально исходим из идеи об особом влиянии реальной ориентации зерен на показатель коэффициента fa и считаем, что для снижения напряжений на границе «зерно–связка» и, соответственно, износа кругов и повышения их кромкостойкости применительно к условиям несвободного резания кромкой круга и учета ориентирования зерен в этом случае в 90° и 180° , необходимо стремиться в процессе шлифования не к повышению, а к снижению величины коэффициента абразивного резания и, при этом, желателен повышать составляющую P_y или сдерживать ее от снижения, а составляющую P_z необходимо снижать. А этого как раз можно достичь путем снижения зернистости и относительной концентрации алмазов в рабочем слое круга [117], что и подтверждает табл. 5.4.

В связи с изложенным выше обратим внимание на усилия резания при шлифовании твердых сплавов и, при этом, базируясь на выводах работы [117], определено, что наряду с реальными значениями составляющих усилия резания большее внимание следует также уделять особенностям изменения величины коэффициента абразивного резания $-fa = P_z / P_y$.

Исследованы 15 марок наиболее распространенных твердых сплавов и установлено (табл. 5.5), что наименьшие усилия шлифования возникают при обработке сплава Т5К10, а наибольшие – при обработке сплава ВРК15. А вот fa изменяется мало и находится в диапазоне 0,30–0,35.

Установлено, для твердых сплавов, что в диапазоне относительных концентраций алмазов в круге от 50 до 125 % коэффициент fa возрастает. Аналогично он себя ведет и с ростом зернистости от 40/28 до 125/100 [117]. Тем самым установлено, что с возрастанием зернистости и концентрации СТМ fa повышается. Исследования по влиянию режимов шлифования на fa проводили на твердом сплаве ВРК15. Продольную подачу изменяли в диапазоне 0,25–1,25 м/мин, поперечную – от 0,05 до 0,25 мм/дв.х., скорость круга 15 и 30 м/с. Установлено, что с ростом скорости вращения круга и глубины шлифования fa снижается [117].

Таблица 5.5. Влияние марки твердых сплавов на составляющие усилия резания и коэффициент абразивного резания ($v_{кр}=15$ м/с, $S_{под}=0,5$ м/мин, $S_n=0,25$ мм/дв.х., $Q=660$ мм³/мин, круг АС4 100/80МА–В1-11П–100) [117]

Твердый сплав	P_y , Н	P_z , Н	$N_{эф}$, кВт	fa
Т8К6	103	31	0,50	0,301
ТТ21К9	138	42	0,75	0,304
МС321	124	38	–	0,306
ВРК15	145	45	0,75	0,310
ВК8	105	33	0,55	0,314
ВК6 ОМ	143	45	0,70	0,315
Т15К6	98	31	0,55	0,316
ВК10 ХОМ	138	45	0,75	0,326
ВК10 ОМ	136	45	0,70	0,331
1	2	3	4	5
ВК3М	124	41	0,65	0,331
Т5К10	89	30	0,50	0,337
МС146	166	56	–	0,337
МС111	109	37	–	0,339
ТТ8К7	122	42	0,70	0,344
ТТ10К8Б	107	37	0,55	0,346

Изучена [62] связь износа круга с коэффициентом fa при шлифовании твердого сплава ВК6ОМ кругом АС4 63/50ма–В1-11П–125 при производительности 174 мм³/мин. Установлено, что с ростом fa износ круга снижается:

$$q_p = 149,58 - 467,16 \cdot fa.$$

При шлифовании безвольфрамовых твердых сплавов также установлена [62] связь износа круга с коэффициентом fa . И в этом случае, с возрастанием величины fa износ алмазных кругов снижается. Математическая зависимость этого с погрешностью 15,1 % имеет вид: $q_p = 3,054 - 6,916 \cdot fa$. Это подтверждает выдвинутое [62] положение о необходимости стремления к повышению величины коэффициента fa с целью снижения износа кругов.

Рассмотрим теперь тепловые закономерности при шлифовании твердых сплавов. На температуру в зоне обработки T влияют все параметры режимов шлифования, определяющие производительность процесса Q , в том числе продольная подача, поскольку от нее зависит толщина слоя материала, снимаемого за оборот круга. Обычно с повышением Q наблюдается возрастание температуры шлифования. Известны две формы кривых $T = f(Q)$: прямая линия [330, 331] и квадратичная зависимость [115, 331].

Нашими исследованиями подтверждено, что в достаточно широком диапазоне значений Q температура в зоне обработки изменяется по квадратичной зависимости, которую возможно условно разделить на две части. Сначала (до ~ 1800 мм³/мин), повышение температуры несколько сдерживается тем, что с повышением производительности возрастает площадь контакта пластины твердого сплава с алмазными зернами, которые одновременно являются эффективными теплоносителями. Далее ($Q > 1800$ мм³/мин) становится более значительным контакт связки круга с материалом, что приводит к выделению дополнительного количества тепла, не связанного непосредственно с работой резания. А в целом, на взгляд [62], такая форма кривой связана с показателем критической производительности шлифования. Вместе с тем, в приведенной форме кривой является определенное противоречие с теоретическими взглядами на температуру в зоне резания. Преимущественно [115, 330–333], температура связывается с тангенциальной составляющей усилия резания и теоретические расчеты проводится на основе P_z . Однако, применительно к условиям, когда производительность непостоянна, такой корреляции между P_z и T не наблюдается: температура растет быстрее чем сила. Этот вывод подтверждают и экспериментальные данные работ [115, 330, 333]. Представляется, что для более точного анализа температур необходимо учитывать не только составляющую P_z , а также P_y и P_x и их соотношение.

В нашем случае анализу были подвергнуты сплавы групп МС, ВК и ТК. Выявлено, что для условий шлифования твердых сплавов кругами на полимерных связках формула зависимости температуры от производительности обработки имеет вид:

$$T = 108 \cdot k_m + 2,53 \cdot 1,004076^Q .$$

где k_m – коэффициент тепловой характеристики твердых сплавов, который характеризует сдвиг кривой «производительность–температура» вдоль оси ординат. Для твердых сплавов проведены [62] эксперименты по установлению относительного коэффициента, который бы характеризовал интегральную тепловую характеристику твердых сплавов применительно к их шлифованию и давал бы возможность прогнозировать уровень температур в зоне обработки при шлифовании разных твердых сплавов. Установлена [62], статистическая связь между исследованным коэффициентом k_m и свойствами твердых сплавов. Так, уровень температур шлифования и k_m возрастают с: повышением плотности сплавов – $k_m = -10,33 / (-25,7 + \gamma)$ (погрешность 10,8 %), увеличением прочности при изгибе – $k_m = -623,9 / (-2118,46 + R_{bm})$ и снижаются с: повышением твердости сплавов – $k_m = 7,4636 - 7,412 \cdot 10^{-2} H_{mc}$ (погрешность 23,4 %), возрастанием коэрцитивной силы – $k_m = K_c / (1,93 \cdot K_c - 16,989)$ (погрешность 5,8 %).

Уровень температур на поверхности твердых сплавов при производительности шлифования с охлаждением $725 \text{ мм}^3/\text{мин}$ составляет 104–211 °С. В случае шлифования без охлаждения температуры увеличиваются в 5–7 раз. Так, при шлифовании сплава ВК10ХОМ с охлаждением температура равнялась 157 °С, а без охлаждения – 794 °С. Такое резкое повышение температур приводит к трещинам и сколам в поверхностном слое, а также к его окислению. Поэтому, при шлифовании твердосплавных пластин необходимо стремиться к максимальному снижению температуры, а для этого нужно [62]:

- использовать шлифование только с охлаждением;
- применять метод глубинного алмазного шлифования, так как, например, при глубинном шлифовании твердого сплава ВК10ХОМ температура составила 157 °С, а при многопроходном – 226 °С;
- применять максимальную, для конкретных условий, ширину алмазодержащего слоя. Так, при одинаковой производительности шлифования ($725 \text{ мм}^3/\text{мин}$) твердого сплава ВК10ХОМ кругом на связке М1-04 с шириной слоя 10 мм температура равна 272 °С, а с шириной 2 мм – 318 °С;
- использовать полимерные связки, а не металлические, если это не обусловливается специальными требованиями. Так, при шлифовании твердого сплава ВК10ХОМ устанавливается такой уровень температур:

Связка	Металлическая		Полимерная
Основа	Cu–Al–Zn	Cu–Sn–Sb	
Марка	М1-04	МО20-2	В1-13
Температура шлифования, °С	272	280	157

Выше уже было обращено внимание на то, что ориентация только на учет составляющей P_z не вполне отражает тепловые закономерности процесса. Поэтому, рассмотрена [62] связь между коэффициентом абразивного резания (fa) и температурой шлифования при одинаковой производительности обработки. Выявлено для твердых сплавов такая корреляционная зависимость имеет вид: $T = 109,29 + 129,78 \cdot fa$, и, таким образом, с возрастанием fa температура в зоне обработки повышается. Это следует иметь ввиду, поскольку в [62] установлено, что для повышения износостойкости кругов необходимо стремиться к увеличению значения fa . В свою очередь, выявлена в [62] зависимость относительного расхода алмазов при шлифовании твердых сплавов от температуры в зоне обработки, имеющая с погрешностью 10,8 % вид: $q = -27,29 + 5,965 \cdot \ln T$. Видно, что чем больше температура, тем больше и износ, однако с ростом температуры прирост износа снижается, вероятно, за счет «облегчения» процесса резания при более высоких температурах.

Обратим внимание также и на то, что в процессе обработки в результате силовых и тепловых процессов может возникать массоперенос в зоне обработки. Укажем, что массоперенос при фрикционном контакте круга в процессе шлифования вызывает интерес для оценки изменения характеристик фрикционного контакту и формирования соответствующего состояния рабочего слоя шлифовальных кругов и методично оценивался по анализу элементного состава обрабатываемого материала, который задерживается при шлифовании на режущей поверхности круга [71, 334]. Для этого, алмазный круг после процесса шлифования помещали в камеру рентгеновского микроанализатора «Camscan-4DV» и анализировали состав элементов инструментального материала на его режущей поверхности.

В работе [334] эксперименты проводили при шлифовании кругом 11V9 100×2×10 сплава ВК6 с двумя основными компонентами W и Co, чтобы избежать влияния других компонентов, которые могли бы быть в составе связки кругов. В качестве основных показателей учитывали содержание W и Co, на режущей поверхности круга и отношение W к Co. Базовым экспериментом выявлено, что при средних режимах шлифования сплава ВК6, когда нет преимущества силового или теплового факторов, отношение W к Co составляет приблизительно 18. Это значение и считали базовым. Была сформулирована рабочая гипотеза о том, что отклонение от этого базового значения является нежелательным, поскольку превышение величины этого соотношения указывает на преобладание карбида вольфрама и на то, что кобальт связывается с элементами связки или алмазом и удаляется со шламом. Это может быть связано с повышенными механическими нагрузками в зоне резания, что приводят к «сколам» WC из твердого сплава. Изложенный выше подход позволяет оценивать характеристику круга по степени влияния на элементный состав шлама. Поскольку в реальном сплаве ВК6 соотношение W/Co \approx 16, то по мнению [334] при шлифовании необходимо стремиться к таким условиям, при которых соотношение W/Co будет находиться в диапазоне 16–18. Проиллюстрировано это следующим. Были использованы три круга формы 11V9 100×2×10×32–АС6М 125/100–100 на металлополимерной связке MO2 и двумя ее модификациями, которые имели на порядок повышенный износ в сравнении с базовым составом. Исследования, проведенные при производительности обработки твердого сплава ВК6 в 500 мм³/мин выявили, что на базовой связке MO2, круг имеет относительный расход алмазов в 5,4 мг/г, а соотношение W/Co на поверхности связки равно 17,9. В то же время на поверхности модифицированной связки MO2-1 указанное соотношение равно 9,7, а износ круга – 46,1 мг/г. На поверхности связки MO2-2 – W/Co=47,8, а износ круга 53,0 мг/г и наблюдается разрушение рабочего слоя. Таким образом, как малое значение W/Co, так и большое, являются

индикатором, отражающим работу круга. При малых значениях отношения W/Co наблюдается повышенный износ круга, однако аналогичный эффект наблюдается и при больших значениях отношения, но в данном случае происходит и разрушение алмазосодержащего слоя, что вызвано тепловой деструкцией полимеров, входящих в состав связки MO2. Возникает вопрос регулирования величины отношения, в том числе, за счет характеристики круга.

Влияние концентрации алмазов. На исследованных связках увеличение концентрации алмазов с 75 до 100 % практически не изменяет величину отношения W к Co . В то же время, чем меньше концентрация, тем больше W и Co задерживается на рабочей поверхности круга.

Влияние покрытия зерен. Для концентрации алмазов 100 % и связки В1-13 был изучен состав рабочего слоя с разными покрытиями алмазов: никелевым (Н1Д) с разным массовым содержанием в 75 и 125 % и агрегированным (МАВ-125). В круге с зёрнами без покрытия на его поверхности соотношение равно 17,9. Покрытие зерен – Н1Д немного повышает это соотношение, причем возрастание массовой доли никеля на зерне повышает W/Co – с 18,1 при 75 % до 18,8 при 125 %, а это означает, что значение отношения увеличивается с ростом массовой доли покрытия. Покрытие металлоагрегированное (МАВ-125) с такой же долей в 125 % наоборот снижает значение отношения до 14,0. Можно предположить, что покрытие Н1Д приводит к росту температуры в зоне шлифования, тогда как покрытие МАВ содействует возрастанию усилия резания при шлифовании и отношение W/Co спадает за счет большого ухода зерен WC со шламом.

Влияние связки круга оценивали при металлопокрытии, одинаковом для разных связок. В этом случае состояние зерен одинаковое и можно предположить, что чем более хрупкой будет связка, тем меньше отношение W/Co , что собственно и установлено в работе [334], когда на поверхности связки В2-01 отношение W/Co составляет 16,0, а при этих же условиях на поверхности металлополимерной связки MO2 уже 21,3.

Таким образом, приведенные выше исследования позволяют утверждать, что за счет массопереноса изменяется состояние контактных поверхностей и по анализу элементов обрабатываемого материала на режущей поверхности круга можно в определенной степени, оценивать работоспособность кругов из СТМ [334].

В окончание данной подглавы обратим внимание на влияние свойств твердых сплавов на шероховатость их обработанной поверхности. Установлено [117], что шероховатость шлифованной поверхности твердых сплавов имеет определенную корреляционную связь с их физическими свойствами. Так, с увеличением плотности и коэрцитивной силы твердых сплавов шероховатость повышается:

$$Ra = 1/(2,204 + 5,87 \cdot 10^5 e^{-\rho}), \quad Ra = 0,208 + 1,068 \cdot 10^{-2} K_c.$$

С увеличением твердости, прочности при изгибе и величины зерен карбидной фазы шероховатость снижается:

$$Ra = 3,72 - 3,74 \cdot 10^{-2} H_{mc}, \quad Ra = 0,4004 - 1,96 \cdot 10^{-5} R_{bm}, \quad Ra = 0,555 - 0,146 \cdot Z_{mc}.$$

Приведенные зависимости позволяют в целом прогнозировать направление изменения показателя шероховатости шлифуемой поверхности, особенно в тех случаях, когда обрабатывается широкая номенклатура сплавов в условиях мелкосерийного производства [117].

5.3. Обработка безвольфрамовых твердых сплавов

Существующие марки твердых сплавов на основе карбида вольфрама не всегда удовлетворяют современным требованиям к инструментальным материалам (особенно при резании труднообрабатываемых материалов) преимущественно из-за низкой окалиностойкости и химического взаимодействия с деталями, поэтому в мировой практике характерным является использование преимуществ безвольфрамовых твердых сплавов (БВТС). По прочности эти сплавы уступают вольфрамосодержащим, однако коэффициент трения по стали и склонность к адгезии у них ниже.

КТС – безвольфрамовый твердый сплав на основе карбида титана с разными металлическими связками (карбид титана – связка). Изготавливают из смеси порошков, полученных после интенсифицированного мокрого размола исходных компонентов путем прессования с последующим спеканием в вакууме при температурах 1350–1500 °С. По окалиностойкости они существенно превышают стандартные сплавы марки ВК [314].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 5,74–5,78; пористость, % – 0,2; размер карбидных зерен, мкм – 1–2 [315]; твердость, *HRA* – 90–92 [314]; твердость, *HV*, ГПа – 15,5–19,5 [315]; модуль упругости, ГПа – 425–430 [314, 315]; предел прочности при изгибе, МПа – 1000–1200; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,5–3,8 [314]; вязкость разрушения, МПа \cdot м^{0,5} – 15 [315].

Области применения – чистовое и получистовое точение легированных и конструкционных сталей, никелевых и алюминиевых сплавов, их торцевое фрезерование. Пресс-формы для прессования сыпучих абразивных материалов, калибры и измерительный инструмент, фильеры, сопла для пескоструйных аппаратов [314].

ЛЦК20 – безвольфрамовый твердый сплав, разработанный Институтом химии Уральского научного центра АН СССР и Кировградским заводом твердых сплавов [335].

Свойства: пористость, % – не более чем 0,4; размер карбидных зерен, мкм – 1–2; количество зерен оксикарбидной фазы, % – 70; плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 4,1; твердость, *HRA* – 89; стойкость против окисления, °С – 1000 [335].

ТН20 – безвольфрамовый твердый сплав, фазовый состав, масс. %: TiC – 79, Ni – 15, Mo – 6.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 5,4–5,8 [71]; усредненный размер частичек карбидной фазы, мкм – 1,71–1,81 [326]; твердость, *HRA* – 90,0 [303]; твердость, *HV*, ГПа – 13,4–15,2 [336]; модуль упругости, ГПа – 410 [303]; предел прочности при изгибе, МПа – 990–1120 [336]; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,5 [303, 314]; вязкость разрушения, МПа $\cdot\text{м}^{0,5}$ – 7,1–7,9 [129]; трещиностойкость, K_{IC} , МПа $\cdot\text{м}^{0,5}$ – 6,3–10,3 [336]; теплопроводность, Вт/(м \cdot К) – 12,56 [71]; КЛТР, $10^{-6}\cdot\text{град}^{-1}$ – 7,1 [288]; коэрцитивная сила, кА/м – 2,2–6,5 [336]; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6} \text{ кг}/(\text{А}\cdot\text{с})$ – 0,213 и объемный, $\cdot 10^{-10} \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с})$ – 0,380 [71]; термостойкость на воздухе, °С – 1100 [303]. Температуропроводность, $\text{см}^2/\text{с}$, $\alpha = 0,0331 + 0,02\cdot 10^{-3} T$, где T – температура в К [337].

ТН30 – безвольфрамовый твердый сплав, фазовый состав, масс. %: TiC – 69, Ni – 23, Mo – 8.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 5,9; твердость, *HRA* – 89 [288, 338]; модуль упругости, ГПа – 400 [288]; предел прочности при изгибе, МПа – 1300 [288, 338]; предел прочности при сжатии, ГПа – 3,4 [338]; КЛТР, $10^{-6}\cdot\text{град}^{-1}$ – 8,2 [288, 338].

ТН40 – безвольфрамовый твердый сплав, фазовый состав, масс. %: TiC – 61, Ni – 29, Mo – 10.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 5,7–6,2; твердость, *HRA* – 87; предел прочности при изгибе, МПа – 1050 [338].

ТН50 – безвольфрамовый твердый сплав.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 6,2; электрохимические эквиваленты: массовый, $\cdot 10^{-6} \text{ кг}/(\text{А}\cdot\text{с})$ – 0,232 и объемный, $\cdot 10^{-10} \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с})$ – 0,375 [71].

Укажем, что БВТС шлифуются значительно хуже твердых сплавов, поскольку значительно возрастает удельный расход алмазов в кругах вследствие того, что силы резания тут в несколько раз выше, возникающих при шлифовании твердых сплавов групп ВК и ТК. Объясняется это тем, что карбид титана имеет в 1,5 раза, а карбонитрид титана – в 2 раза большую твердость, чем карбид вольфрама. Обрабатываемость сплава КНТ16 почти в 5 раз хуже, чем сплава ТН20. Одной из причин этого является взаимодействие связующего БВТС – никеля с алмазами при шлифовании. Такое взаимодействие связано с тем, что алмазное зерно в процессе резания

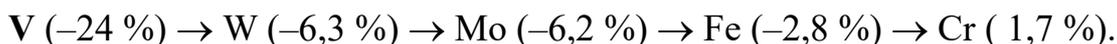
проходит через широкий интервал температур – от комнатной до близкой к плавлению обрабатываемого металла. При наличии пленки железа или никеля на контактной поверхности графитизация алмаза должна начинаться ранее, чем будет достигнута температура, при которой будет возможной ощутимая диффузия углерода в обрабатываемый металл. Дальнейшее повышение контактной температуры в процессе единичного акта резания активизирует графитизацию. Никель и железо являются катализаторами, снижающими температуру графитизации алмаза. Тонкая пленка никеля (400–600 Å) вызывает поверхностную графитизацию алмаза уже при 400 °С [339]. Графитизацией объясняется и экспериментальное снижение коэффициента трения при увеличении скорости скольжения алмаза по стали. Таким образом [340], интенсивный износ алмазов при резании железа и никеля обусловлен графитизацией алмаза, а не диффузией углерода в обрабатываемый материал. При микрорезании титана образуется более толстая и плотная пленка металла на алмазе, что объясняется высоким сродством его к углероду. Соответственно, при микрорезании и существуют условия для химического взаимодействия алмаза и титана [340].

Вместе с тем, существует определенное противоречие в выводах работы [339], когда утверждается, что уже при 400 °С происходит взаимодействие никеля с алмазами и графитизация последних при обработке. Но тогда должен быть более приемлемым в кругах не алмаз, а кубический нитрид бора. В работе [341] был поставлен эксперимент, когда у двух кругов одинаковой связки (МО20-2), зернистости (100/80) и концентрации (100 %) были разные СТМ: алмаз АС6 или кубонит КР. Режущую поверхность кругов предварительно вскрыли электроэрозионным методом для обеспечения хорошего выступания зерен. Далее шлифовали БВТС марки ТН50 при производительности 700 мм³/мин. Круг из КНБ терял режущую способность уже через 1 мин 45 с, а алмазный круг только через 10 мин 20 с. Кроме того, относительный расход алмазов был почти в 5 раз меньшим, чем кубонита. По мнению [341], это свидетельствует о том, что взаимодействие алмазов с никелем происходит при более высоких температурах (1000–1400 °С [115]) и это необходимо иметь в виду в условиях повышения производительности обработки.

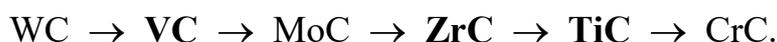
В связи с изложенным выше в работе [297] обращено внимание на потерю карбидов при шлифовании, где сделан вывод о том, что резкое снижение содержания карбидов в поверхностном слое инструментального материала отрицательным образом отражается на прочностных и противозносных характеристиках инструмента. Укажем, что любая обработка, в т.ч. абразивная, базируется на предположении, что она не должна вносить негативное воздействие в обрабатываемую поверхность, а, наоборот, в идеале добавлять только позитивное воздействие. Однако в реальных

условиях обработки, когда необходимо обеспечить и производительность и качество обработки, приходится искать определенный компромисс. Следствием такого компромисса является определенное изменение состояния поверхностного слоя. Выпукло это наблюдается при обработке наиболее труднообрабатываемых инструментальных материалов. Для современного машиностроения характерно широкое использование новых разработок из области материаловедения по созданию и усовершенствованию таких материалов. В их структуру, для повышения твердости, прочности, химической инертности, снижения коэффициента трения вводят карбиды переходных металлов $IVb-Vb$ подгрупп. Это характерно для: быстрорежущих сталей (введение карбидов ванадия и ниобия); твердых сплавов (карбидов титана, тантала, ниобия); безвольфрамовых твердых сплавов на основе карбида титана; инструментальных керамик (карбидов титана и циркония) и все они имеют один формальный признак – наличие в их составе карбидов металлов $IVb-Vb$ подгрупп. Это фактически является признаком принадлежности приведенных инструментальных материалов к группе труднообрабатываемых. Шлифование таких материалов, характеризуется быстрой потерей кругом режущей способности, повышением, как следствие, силовых и температурных факторов процесса шлифования, что приводит к снижению механических характеристик их поверхностного слоя, возникновения трещин и сколов. Такие осложнения при обработке связаны в значительной степени с тем, что указанные материалы, каждая в своих группах, имеют наиболее экстремальные показатели: высокую твердость, низкую теплопроводность, низкую стойкость против окисления, обусловленную выделением при этом металла и неметалла (С). А если учесть характерное для указанных карбидов наличие определенной области гомогенности, то это существенно влияет на механические характеристики и качество поверхностного слоя. Поэтому потеря химических составляющих в поверхностном слое при шлифовании кругами из СТМ еще больше ухудшает качество обработанной поверхности. В работе [117] изучалось указанное выше явление и обращено внимание на то, что при шлифовании например инструменту из быстрорежущих сталей на повышенных режимах шлифования возникает некоторое противоречие в связи с тем, что в его поверхностных слоях могут происходить структурные превращения из-за повышенных (≈ 600 °С) температур и это приводит к снижению их износостойкости. Однако, с другой стороны, материал стали получает дополнительный отпуск, что наоборот должно приводить к повышению износостойкости [230]. Тем не менее, реально мы наблюдаем снижение износостойкости. На взгляд [62], это связано с изменениями элементного состава поверхностного слоя, которые в свою очередь, связаны с окислением компонент этого слоя (карбидов W, V, Cr, Mo та Fe). Для

подтверждения такого предположения изучали [117] элементный состав поверхностного слоя стали Р6М5 в исходном состоянии и шлифованного на повышенных режимах (с образованием прижога в поверхностном слое). Установлено, что при этом наблюдается снижение массового содержания металлов карбидов на поверхности в следующем ряду, по мере снижения потери элементов (в относительных % по отношению к исходному):



Для сравнения укажем ряд карбидов по степени снижения склонности к окислению (по данным [342]):



Видно, что общая тенденция по расположению элементов совпадает. При этом, повышенная потеря V в поверхностном слое может быть пояснена тем, что температуры при шлифовании находились в районе 600 °С [343]. До уровня такой температуры из рассмотренных элементов только V имеет линейную закономерность окисления, а другие логарифмическую или параболическую. Линейная закономерность является характерной для окисления, которое проходит с постоянной скоростью, разрушением оксидных пленок и значительной потерей металла [342]. Логарифмическая и параболическая закономерности окисления тугоплавких металлов характеризуют окисление с замедленной скоростью и образованием защитных пленок. Укажем, что с ростом температур шлифования и у других металлов, а именно, Mo (> 600 °С), W (> 1000 °С), Cr (> 1100 °С), закономерность окисления перейдет в линейную, что приведет к дальнейшему снижению износостойкости инструмента [117].

Аналогичные процессы потери металла карбида происходят и при электрошлифовании, а наиболее ярко это наблюдается при шлифовании БВТС, когда возникают анодные оксидные пленки [117]. Известно [344], что окисление карбидов и нитридов сопровождается растворением кислорода, которым насыщен прианодный слой, с выделением соответственно металла (Ti) и неметалла (C, N₂) с последующим образованием слоев оксидных пленок. В этом случае титан окисляется с образованием рутила, а углерод (или азот в случае TiCN) принимает участие в формировании в составе пленок разных солей. В результате на поверхности сплава ТН20 формируется верхний слой, условно названный [62] «аморфным», а под ним образуется дефектный слой сплава со сниженным содержанием Ni и карбидами в области гомогенности TiC_{1-x}, поскольку существуют условия ухода углерода из карбида. Наличие при электрошлифовании TiC в области гомогенности в поверхностном слое при его фрикционном взаимодействии со связкой круга приводит к появлению трещин и сколов вследствие ослабления его механических характеристик. Так, микротвердость TiC_{0,96} —

31098±1668 МПа, а $TiC_{0,72}$ – 18933±1079 МПа [345]. При обычном окислении ТН20 с нагревом до 973 К такого явления не происходит: TiC окисляется до $TiO_2^{анатаз}$ та $TiO_2^{рутил}$, а Ni – до NiO [117].

В работе [71] выявлено, что при трении безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 (система TiC(N)–Ni–Mo, твердость *HRA* 91) по образцу из металлической связки М2-12Э с основой Cu–Sn–Sb (твердость *HRB* 93) на последнюю осуществляется перенос только титана (предположительно, карбонитрида), причем в небольшом количестве ($\approx 1,5$ масс. %). Никель и молибден в спектре связки не выявлены. Установлено также, что в спектре контактной поверхности образца из сплава КНТ16 отсутствуют элементы, перенесенные с поверхности металлической связки, с которой он находился в контакте. А это означает, что переноса меди и олова на БВТС не наблюдалось. При использовании достаточно пористых связок, например, керамических, в этом случае, наблюдается внедрение в поры связки частичек сплава (регистрируются микроанализатором титан, никель, молибден), но и при этом преимущественно происходит внедрение карбидной фазы. Так, отношение титана к никелю на поверхности трения связки К19 равно 4,9, тогда как в глубинных слоях сплава КНТ16 оно равно 3,2. Таким образом, исследования [71] не подтвердили известные представления [346] о том, что при шлифовании кругами на металлических связках будто бы расплавы металлов связки (медь), которые образуются в зоне контакта, остаются на обрабатываемой поверхности в качестве покрытия и, тем самым, снижают коэффициент трения. Вероятно, тут имеет место более сложный механизм взаимодействия. Побочным подтверждением этого вывода является впервые установленное выше явление преимущественного переноса из БВТС карбидной фазы на связку круга, а не, как этого можно было бы ожидать, более вязкого никеля.

Силовые закономерности процесса шлифования безвольфрамовых твердых сплавов изучены в работе [62]. Так, влияние марки сплава изучено в условиях – $v_{кр} = 15$ м/с, $S_{пр} = 0,5$ м/мин, $S_n = 0,25$ мм/дв.х., $Q = 660$ мм³/мин, круг АС4 100/80МА–В1-11П–100:

Сплав	P_y , Н	P_z , Н	$N_{эф}$, кВт	fa
ТН20	269	50	0,75	0,186
НТН30	199	52	0,75	0,261.

В целом, видно, что безвольфрамовые твердые сплавы в сравнении с вольфрамовыми более склонны к повышенной составляющей P_y и, соответственно, меньшим значениям коэффициента fa – 0,18–0,26.

Влияние связки круга на силовые показатели и работоспособность кругов при шлифовании ТН20 приведены в табл. 5.6. Видно, что использование металлических связок, вместо полимерных, приводит к повышен-

ным усилиям резания. А вот по коэффициенту fa особенной разницы между ними не выявлено.

Таблица 5.6. Влияние связки на работоспособность кругов и силовые показатели при алмазном шлифовании сплава ТН20 [62]

Связка	q_p , мг/г	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	fa	Удельная работа шлифования, $A_{уд}$, Вт·мин/мм ³
Полимерные связки						
В2-01	2,1	13	302	63	0,21	2,10
В1-01	1,2	12	191	50	0,26	1,67
1	2	3	4	5	6	7
01	1,6	4	174	33	0,19	1,10
В1-13	1,3	4	181	39	0,21	1,30
Металлические связки						
М1-04	–	8	329	76	0,23	2,53
М1-01	–	9	416	82	0,19	2,73
МО20-2	–	16	594	103	0,17	3,43

Влияние марки алмазов зернистостью 100/80 приведено в табл. 5.7, из которой видно, что с ростом прочности алмазов возрастает и усилие резания. При этом коэффициент fa изменяется мало. Он только несколько выше у алмазных зерен марки АС2.

Таблица 5.7. Влияние марки и покрытия алмазов на показатели работоспособности кругов на полимерной связке В1-13 при шлифовании БВТС [62]

Марка и покрытие	q_p , мг/г	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	fa	Удельная работа шлифования, $A_{уд}$, Вт·мин/мм ³
Сплав ТН20						
АС4	3,6	11	547	87	0,16	2,48
АС4 С	4,4	9	524	91	0,17	2,60
АС4 М	7,5	12	578	110	0,19	3,14
АС4 МА	1,4	13	595	113	0,19	3,22
Сплав ТН50						
АС2	1,5	6	178	43	0,24	1,43
АС4	1,3	4	181	39	0,21	1,30
АС4 МА	1,0	4	177	46	0,26	1,53
АС6	1,7	8	200	46	0,23	1,53
АС15	2,0	12	249	56	0,22	1,87

Влияние покрытия алмазов для тех же условий, только для сплава ТН50, приведено в табл. 5.7. Видно, что покрытие во всех случаях приводит как к возрастанию усилия резания, так и к повышению коэффициента fa [62].

5.4. Обработка инструментальных керамик

Инструментальная керамика – отдельная группа инструментальных материалов на основе оксидов, карбидов и нитридов:

- оксидная (белая), содержащая более чем 90 % оксида алюминия и для повышения прочности легирована оксидами циркония и магния. Получают преимущественно методом холодного прессования с последующим спеканием. Сюда относятся керамики марок ЦМ332, ВО13, ВО16, ВО18;

- оксидно-карбидная (черная), содержащая наряду с оксидом алюминия до 20–40 % карбида титана. Получают преимущественно методом горячего прессования. Это керамики марок ВОК60, ВОК65, ВОК71; Электропроводность таких керамик зависит от их плотности, направления прессования, марки материала;

- нитридная (на основе Si_3N_4) керамика марки Силинит.

Объем использования керамических пластин в Японии составляет 8–10 %, в США 3–4 % [286]. Использование керамического режущего инструмента на предприятиях США позволяет сэкономить почти 530 млн USD в год вследствие снижения времени обработки и использования более высоких скоростей резания при минимизации интенсивности износа инструмента [347].

Бихромит-Р – инструментальная керамика на основе Cr_2O_3 с образованием твердого раствора $(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ [348].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 5,6 [348, 349]; усредненный размер зерен, мкм – 2–3 [348]; твердость, *HRA* – 92–93 [349], твердость, *HV*, ГПа – 20–22 [350]; предел прочности при изгибе, МПа – 600–800 [348, 349]; предел прочности при сжатии, ГПа – 2,6–2,8 [348, 349]; модуль упругости, ГПа – 350; вязкость разрушения, МПа $\cdot\text{м}^{0,5}$ – 6,5–8,0 [349]; теплопроводность, Вт/(м $\cdot\text{К}$) – 27 [348, 349].

Применение – чистовая и получистовая обработка закаленных и легированных сталей, чугунов, обработка меди и латуни, фрезерная обработка закаленных и сырых сталей, чугунов [350].

ВГК – высокопрочная градиентная керамика, имеющая – керамический слой (38,3% Si_3N_4 + 25% TiC + 12,5% Y_2O_3 + 4,2% Al_2O_3), субстрат ($\text{WC} - \text{Co}$), и многофункциональное покрытие (Ti, Al)N, ($\text{Ti}, \text{Cr}, \text{Al}$)N [347].

Технологические особенности – температура горячего прессования, °C – 1650–1700; давление, МПа – 30; продолжительность нагрева, мин – 40–50; термическая выдержка и охлаждение (2 часа) под давлением [347].

Свойства: предел прочности при изгибе, МПа – 1230 [347].

ВО13 – холоднопрессованная инструментальная оксидная керамика на основе оксида алюминия со средним размером зерна, мкм – 4.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 - 3,92-3,95$; [117]; при нагревании до температур в 1673 К не подвергается окислению [351]; твердость, HV , ГПа – 20,4 [117, 326]; модуль упругости, ГПа – 399 ± 6 [71, 117]; модуль сдвига, G , ГПа – 144 ± 3 ; коэффициент Пуассона – $0,39 \pm 0,02$; предел прочности при изгибе, МПа – 391 ± 50 [117]; энергия разрушения, $\text{Дж/м}^2 - 12,8$ [352]; критический коэффициент интенсивности напряжений, K_{IC} , $\text{МПа} \cdot \text{м}^{3/2} - 4,07 \pm 0,17$ [353]; вязкость разрушения, $\text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5} - 3,2-4,1$ [354]; КЛТР, $10^{-6} \text{ град}^{-1} - 9,69$ [71, 117]; теплопроводность, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)} - 14,4$; температура плавления, $K - 2320$ [71].

Применение – чистовое и получистовое точение конструкционных сталей и серых чугунов с высокими скоростями резания (800–1000 м/мин) [355].

ВО13Г – горячепрессованная инструментальная керамика на основе оксида алюминия. Окислению не подвергается до температур в 1673 К [351].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 - 3,92$ [71]; предел прочности при изгибе, МПа – 462 ± 158 ; модуль упругости, ГПа – 384 ± 9 ; модуль сдвига, G , ГПа – 137 ± 4 ; коэффициент Пуассона, $\nu - 0,40 \pm 0,01$ [117]; КЛТР, $10^{-6} \text{ град}^{-1} - 12,5$; температура плавления, $K - 2320$; теплопроводность, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)} - 11,6$ [71].

ВО16 – холоднопрессованная инструментальная керамика на основе оксида алюминия. При нагреве до температур в 1673 К не подвергается окислению [351].

ВО20 – инструментальная керамика на основе оксида алюминия.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 - 3,93$; твердость HV , ГПа – 20,15; критический коэффициент интенсивности напряжений, K_{IC} , $\text{МПа} \cdot \text{м}^{3/2} - 3,21 \pm 0,13$ [353].

ВО21 – инструментальная керамика на основе оксида алюминия.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 - 3,93$; твердость HV , ГПа – 19,78; критический коэффициент интенсивности напряжений, K_{IC} , $\text{МПа} \cdot \text{м}^{3/2} - 3,93 \pm 0,17$ [353].

ВОК60 – горячепрессованная инструментальная оксидно-карбидная керамика на основе оксиду алюминия и карбида титана.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 - 4,25-4,28$ [117]; начало окисления 970–990 К [351]; твердость, $HRA - 94$ [303]; твердость HV , ГПа – 21,95 [356]; модуль упругости, ГПа – 394 ± 4 [71]; модуль сдвига, G , ГПа – 140 ± 6 ; коэффициент Пуассона – $0,40 \pm 0,03$; предел прочности при изгибе, МПа – 382 ± 90 [117]; энергия разрушения, $\text{Дж/м}^2 - 13$ [352]; вязкость разрушения, $\text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5} - 3,62$ [129]; электропроводность, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} - 15-30$ [357]; удель-

ное электросопротивление, мкОм·м – 18 ± 6 [117]; критический коэффициент интенсивности напряжений, K_{IC} , МПа·м^{3/2} – $4,04 \pm 0,24$ [356]; вязкость разрушения, МПа·м^{0,5} – 3,3 [352]; КЛТР, 10^{-6} град⁻¹ – 9,26; теплопроводность, Вт/(м·К) – 7,4 [71].

Степень окисления ($K_O \cdot 10^{-2}$) при динамическом нагреве до температур [351]:

1073 К	1173 К	1273 К	1373 К	1473 К	1573 К	1673 К
1,29	1,74	2,68	3,57	4,47	5,96	7,94

Применение – чистовое и получистовое точение, в т.ч. прерывистое, закаленных сталей и чугунов, чистовое торцевое фрезерование чугунов [355].

ВОК63 – горячепрессованная инструментальная оксидно-карбидная керамика на основе оксида алюминия и карбида титана.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 4,3; твердость, *HRA* – 94; предел прочности при изгибе, МПа – 680 [303]; твердость *HV*, ГПа – 22,86; критический коэффициент интенсивности напряжений, K_{IC} , МПа·м^{3/2} – $4,07 \pm 0,26$ [356].

ВОК71 – горячепрессованная инструментальная оксидно-карбидная керамика на основе оксида алюминия и карбида титана [348].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3$ кг/м³ – 4,3 [71]; усредненный размер зерен, мкм – 4 [348]; начало окисления 1070–1140 К [351]; твердость, *HRA* – 92–93 [348]; твердость *HV*, ГПа – 22,32 [356]; модуль упругости, ГПа – 394 ± 4 [71]; предел прочности при изгибе, МПа – 600–650 [303, 348]; электрохимический эквивалент: массовый, $\cdot 10^{-6}$ кг/(А·с) – 0,096 и объемный, $\cdot 10^{-10}$ м³/(А·с) – 0,228 [71]; критический коэффициент интенсивности напряжений, K_{IC} , МПа·м^{3/2} – $4,19 \pm 0,31$ [356]; вязкость разрушения, МПа·м^{0,5} – 5,6–6,0 [348]; КЛТР, 10^{-6} град⁻¹ – 8,87 [71].

Степень окисления ($K_O \cdot 10^{-2}$) при динамическом нагреве до температур [351]:

1073 К	1173 К	1273 К	1373 К	1473 К	1573 К	1673 К
1,41	1,84	2,45	2,45	2,45	2,70	3,07

Применение – чистовое и получистовое точение, в т.ч. прерывистое, закаленных сталей и чугунов, чистовое торцевое фрезерование чугунов [355].

ВОК85С – композиционный слоистый режущий материал, состоящий из двух-трех слоев: рабочего керамического слоя толщиной 1–3 мм и твердосплавной подложки.

Свойства – предел прочности при изгибе, МПа – 800–1000; твердость, *HRA* – 93–94. Области применения – скоростная обработка резанием

высокотвердых сталей и чугунов в условиях ударных нагрузок, фрезерование, резьбо- и канавконарезание [117].

ВОК200 – горячепрессованная инструментальная оксидно-карбидная керамика на основе оксида алюминия и карбида титана.

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 4,25; твердость, ГПа – 24,5; предел прочности при изгибе, МПа – 700 [347].

Силинит-Р – инструментальная керамика на основе Si_3N_4 [348].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 3,2–3,4; усредненный размер зерен, мкм – 2–3; твердость, *HRA* – 92–94 [348]; твердость, *HV*, ГПа – 20,6; модуль упругости, ГПа – 240 [352]; предел прочности при изгибе, МПа – 500–600 [348]; предел прочности при сжатии, ГПа – 2,5 [303, 348]; энергия разрушения, Дж/м² – 40 [352]; вязкость разрушения, МПа $\cdot\text{м}^{0,5}$ – 4,5 [348]; начало активного окисления 1430 К [351].

Степень окисления ($K_{\text{O}} \cdot 10^{-2}$) при динамическом нагреве до температур [351]:

1073 К	1173 К	1273 К	1373 К	1473 К	1573 К	1673 К
1,71	1,93	2,25	2,46	2,89	3,96	4,07

Применение – торцевое фрезерование чугунов [355].

ЦМ332 – оксидная инструментальная керамика состава, масс. %: фаза $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – 99,0–99,4, фаза MgO – 0,6–1,0, размер зерна, мкм – 4, пористость, % – 0,5 [358].

Свойства: плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 3,85–3,90 [117]; твердость, *HRA* – 91–93 [280]; твердость, *HV*, ГПа – 17,9–21,6 [326, 352]; модуль упругости, ГПа – 400 [352]; предел прочности при изгибе, МПа – 380 [280]; предел прочности при сжатии, ГПа – 2,45–5,29 [358]; энергия разрушения, Дж/м² – 20; трещиностойкость, МПа $\cdot\text{м}^{0,5}$ – 4,0 [352]; теплопроводность, Вт/(м $\cdot\text{К}$) – 4,19 [280]; КЛТР, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$ – 8,5 [358].

Обратим внимание на особенности шлифования минералокерамики алмазными кругами, что вызвано повышенной твердостью керамики. Авторами работи [331], изучены особенности алмазного резания-царапания оксидной минералокерамики ЦМ332 единичным зерном. Установлено, что оно оставляет четкий след на поверхности шлифа керамики, однако края царапин менее ровные, чем у твердых сплавов. Такая особенность поясняется определенной пористостью и повышенной хрупкостью минералокерамики. На электронных снимках шлифованной поверхности не выявлено признаков адгезионного взаимодействия алмаза и керамики. Как известно, последняя имеет низкую теплопроводность, вследствие чего в тонком поверхностном слое возможно возникновение температур, способных вызвать графитизацию алмаза. Коэффициент трения корунда по графиту в

интервале температур 873–1773 К имеет очень низкое значение. Это объясняется взаимодействием керамики с углеродом, вследствие чего образуются оксикариды и карбиды алюминия [129].

Основным недостатком режущей керамики является ее относительно высокая чувствительность к резким температурным колебаниям. Так, авторы [37] проводили испытания на термоусталостную прочность разных инструментальных материалов. Образцы размерами 3×3×4 мм нагревались в печи до температуры 873 К, после чего резко охлаждались в воде:

Инструментальный материал	ЦМ332	T15K6	VK8	Ельбор-Р	ПТНБ
Количество циклов «Нагрев–охлаждение» до появления трещин	5–8	15–20	60–90	180–200	более 300

Такую чувствительность необходимо учитывать при разработке процессов шлифования. Керамика, в особенности инструментальная, является преимущественно хрупким материалом, которому как бы не должны быть присущи явления пластичности, но тем не менее пластическая составляющая при анализе обрабатываемости и структуры керамики безусловно присутствует.

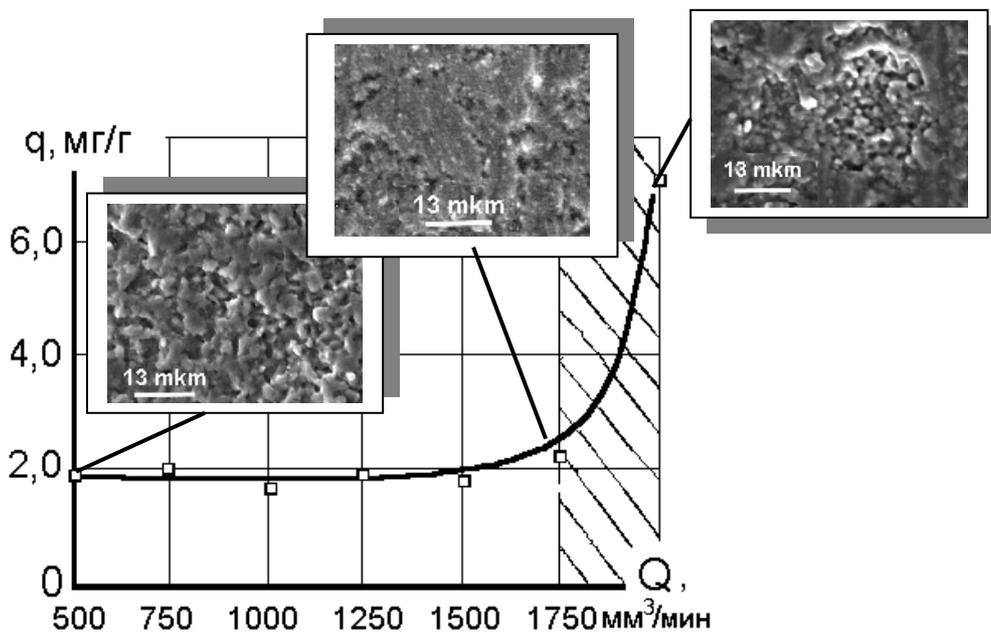


Рис. 5.6. Зависимость относительного расхода алмазов в круге от производительности шлифования керамики ВСК60 при скорости вращения круга 15 м/с, продольной подаче 0,5 м/мин, поперечной подаче 0,25 мм/дв. х. и состоянии поверхности керамики в трех зонах (заштрихована зона отсутствия резерва режущей поверхности круга, а начало зоны соответствует критической производительности шлифования)

Как пример, укажем на то, что в работе [359] мелкодисперсность в структуре керамики системы Al_2O_3-TiC та достаточное количество в ней дислокаций позволили ее авторам выдвинуть предположение про преимущественный вклад пластического течения в механизм упрочнения материала. На наличие следов пластической деформации в поверхностном слое керамик при их алмазной обработке обращалось внимание и в [360, 361], но без рассмотрения их связи с параметрами обработки.

Рассмотрение приведенного выше следует вести с учетом положения о критической производительности обработки (см. главу 4), которое базируется на учете формоизменения режущей поверхности круга в процессе шлифования. Как только режущая поверхность с повышением производительности шлифования исчерпывает резервы своего увеличения за счет формоизменения, круг достигает значения критической производительности и начинает переходить в зону катастрофического износа (рис. 5.6). Обеспечение производительности обработки в пределах критической и будет гарантировать стабильную износостойкость круга. Обращено внимание [117] на то, что в разных зонах работы круга будет формироваться характерная для этой зоны обрабатываемая поверхность: для начального эта-

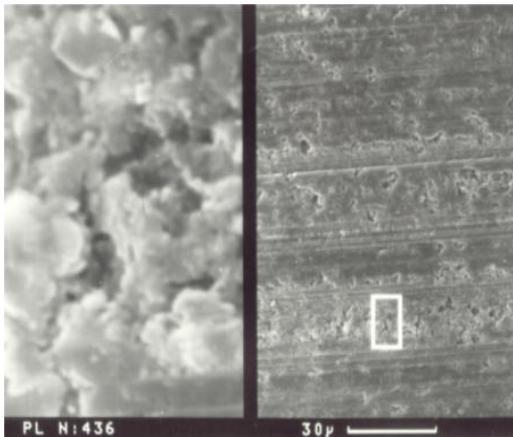


Рис. 5.7. Состояние поверхности керамики в лунках перемещения алмазных зерен

па, когда производительность обработки небольшая и составляет $500 \text{ мм}^3/\text{мин}$, характерно хрупкое разрушение и не наблюдается проявлений пластического воздействия. Для критического этапа, когда производительность обработки равна критической, составляет $1750 \text{ мм}^3/\text{мин}$, на обрабатываемой поверхности фиксируются проявления пластического воздействия (рис. 5.6) и лучше всего это наблюдается именно в границах критической производительности и этапе катастрофического износа, когда производительность достигает $2000 \text{ мм}^3/\text{мин}$ и в этой зоне наряду с пластичными областями характерным является наличие хрупкого вырыва. Исследованиями [117] установлено, что зона хрупкого разрушения формируется под зерном в лунке перемещения зерна (рис. 5.7), а пластичные зоны наблюдаются в навалах по границам лунки и там, где нет процесса резания зернами выступающими над уровнем связки, а имеется заглаживание этих пластичных навалов зернами, которые недостаточно для процесса резания выступают над связкой или наклонены не навстречу процесса резания, когда происходит их упругое вжатие в связку. Таким образом, для об-

ластей критической и закритической производительностей обработки характерной является преимущественное наличие на обрабатываемой поверхности пластичных зон. Обращается внимание [117] на то, что в идеале необходимо иметь совпадение значений ограничений по величине производительностей обработки как по износу круга, так и по качеству обработки или значение критической производительности должно превышать значения максимальной производительности по качеству обработки. Керамика в отличие от инструментальных сталей является структурно-нечувствительным материалом и реальный контроль качества обработки происходит по наличию сколов на краях изделий и шероховатости обрабатываемой поверхности. Поскольку в лунках движения зерен преимущественно происходит хрупкое разрушение, то важно, чтобы это не приводило к формированию трещин. Для хрупких материалов длина трещин зависит в определенной степени от высотных показателей шероховатости обрабатываемой поверхности [362], поэтому, даже если мы попадаем в зону закритической производительности, то основное внимание – обеспечить низкую шероховатость обрабатываемой поверхности.

Учитывая наличие приведенного выше двойного механизма разрушения поверхности керамики при алмазной обработке, был поставлен [117] эксперимент по установлению влияния механизма формирования поверхности керамики (хрупкого или хрупко-пластичного) на стойкость пластин при точении. Были выбраны три, наиболее отличающихся по производительности, метода обработки. Упругое шлифование опорных поверхностей керамики на станке ТШ8805 происходит при производительности в $790 \text{ мм}^3/\text{мин}$, врезное на станке WBM20 – $1800 \text{ мм}^3/\text{мин}$ и станке WBM300 – $4000 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Для первого случая, так называемого «низкотемпературного» шлифования, характерным является формирование поверхности без ощутимого пластического воздействия, для двух других, на обрабатываемой поверхности характерным является наличие пластичных зон (рис. 5.8). Стойкостные испытания пластин из керамики ВОК60 проводили на станке 16К20 с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя при точении без охлаждения стали Х12М (HRC 60). Режимы точения: $v = 100 \text{ м/мин}$, $t = 0,2 \text{ мм}$, $s = 0,075 \text{ мм/об}$. Определяли величину износа по задней грани пластины. Трехгранные пластины толщиной $4,75 \text{ мм}$ с вписанным диаметром $12,8 \text{ мм}$ по боковым поверхностям шлифовали одинаково на станке МШ289. Передние (опорные) поверхности пластин шлифовались указанными выше тремя методами с разной производительностью. При этом, показатели шероховатости для всех трех вариантов разнятся мало, хотя необходимо обратить внимание на то, что все же более низкие значения высотных параметров и большая заполненность профиля неровностей обработанной поверхности наблюдается для варианта с

ТШ8805. Все это и определило более высокую стойкость пластин при резании (рис. 5.8).

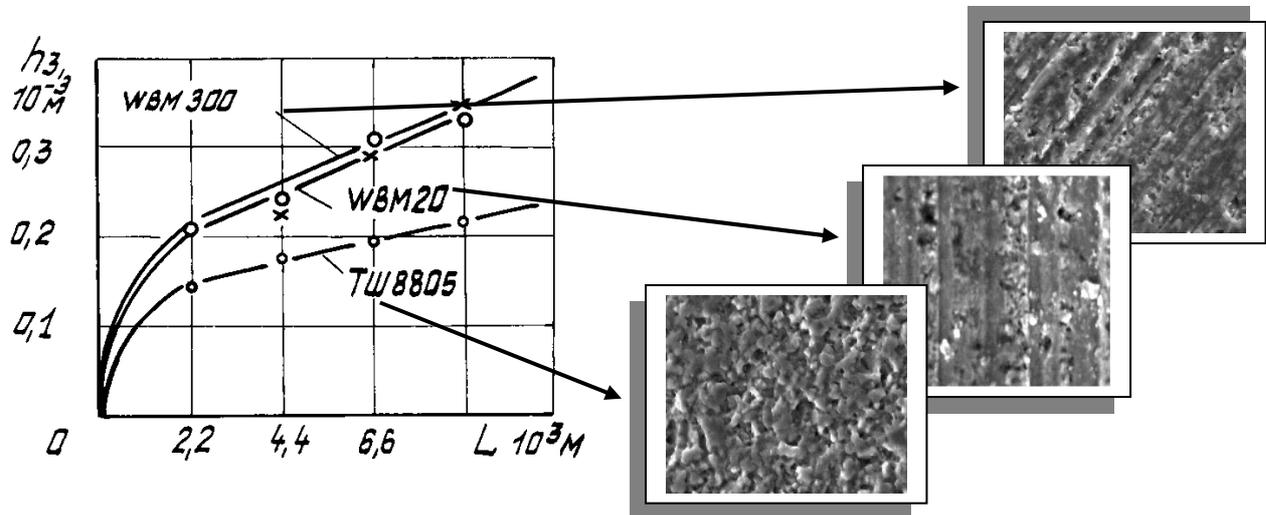


Рис. 5.8. Сравнительные кривые износостойкости пластин из керамики при точении при разных условиях их алмазной обработки и состоянии обработанной поверхности при этом

Анализ рис. 5.8 показывает, что поверхности керамик, образующиеся при небольшой производительности их обработки и с преимущественным хрупким формированием их поверхностей, являются более износостойкими, чем с двойным механизмом их формирования. Но обратим внимание на другое. Сравнение данных по двум достаточно отличающимся по производительностям вариантам (обработка на станках WBM20 и WBM300) в критической и закритической областях показывает их совпадение. Это обозначает, что даже двукратное повышение производительности, при отсутствии сколов и соблюдении одинаковой высоты неровностей, никак не снижает износостойкость керамик. Описанное выше может быть основой для разработки условий бездефектного, так называемого «вязкого» [363], шлифования керамик, когда обработка переводится сразу в зону наличия пластичности. Как следствие, это позволит вести обработку с более высокой производительностью без существенной потери в качестве. Теоретической основой этого может служить анализ формулы расчета величины критической производительности (см. главу 4), который показывает, что при использовании алмазных кругов именно снижением скорости вращения круга возможно перевести обработку в зону пластичности. Но при этом, для сохранения значения величины критической производительности необходимо снижать зернистость алмазов в круге и увеличивать

их прочность с учетом одновременного повышения их удержания в связке путем изменения связки круга с полимерной на металлическую. Следует обратить внимание также на то, что при шлифовании керамик шероховатость обработанной поверхности Ra возрастает с увеличением зернистости алмазов, продольной и поперечной подач и снижается с повышением скорости круга. Поэтому, опять же таки в случае перевода обработки в зону пластичности необходимо принять меры к снижению высотных параметров шероховатости – например, снизить ту же зернистость или выбрать другой метод обработки и т.п.

Покажем это на примере упругого шлифования керамик. Обратим внимание на то, что в реальном производстве при шлифовании боковых та опорных поверхностей многогранных пластин на станках-автоматах МШ289, ГПИТ10М, WBM 300/21, Agathon-250 PL/CNC преимущественно реализована схема упругого шлифования или ее варианты, поэтому нами большое внимание было уделено изучению особенностей упругого шлифования пластин из режущей керамики. Важным фактором при этом является влияние величины давления в зоне контакта «круг-керамика» на показатели упругого шлифования. В нашем случае использовалась частота осцилляции 100 дв.х/мин. Установлено (рис. 5.9, *a*), что с ростом давления до 2 МПа производительность шлифования возрастает пропорционально, достигая максимума при 2 МПа. Износ кругов при повышении давления резко снижается и в районе 1,6 МПа стабилизируется. Значения себестоимостей обработки стабилизируются после 1,2 МПа и возрастают только при повышенных давлениях, когда производительность обработки значительно снижается. Такие зависимости показателей объясняются тем, что с ростом нагрузки зерна алмазов в большей степени заглубляются в керамику и производительность возрастает, но с увеличением нагрузки снижаются динамические воздействия на зерна, поскольку контакт становится более стабильным и износ круга снижается, что в свою очередь влияет на производительность обработки.

На следующем этапе изучали влияние частоты осцилляции на показатели упругого шлифования при постоянном давлении 2 МПа. Установлено (рис. 5.9, *б*), что с повышением частоты осцилляции износ круга увеличивается, производительность шлифования имеет максимум при 100 дв.х./мин, а потому и минимальная себестоимость шлифования достигается при 100 дв.х./мин. Вероятно, с повышением частоты осцилляции износ круга растет в связи с увеличением динамических нагрузок на зерна. При повышении износа снижается выступание алмазных зерен из связки и, как следствие, производительность обработки падает, что подтверждает и рис. 5.9, *a* (после давления в 2 МПа).

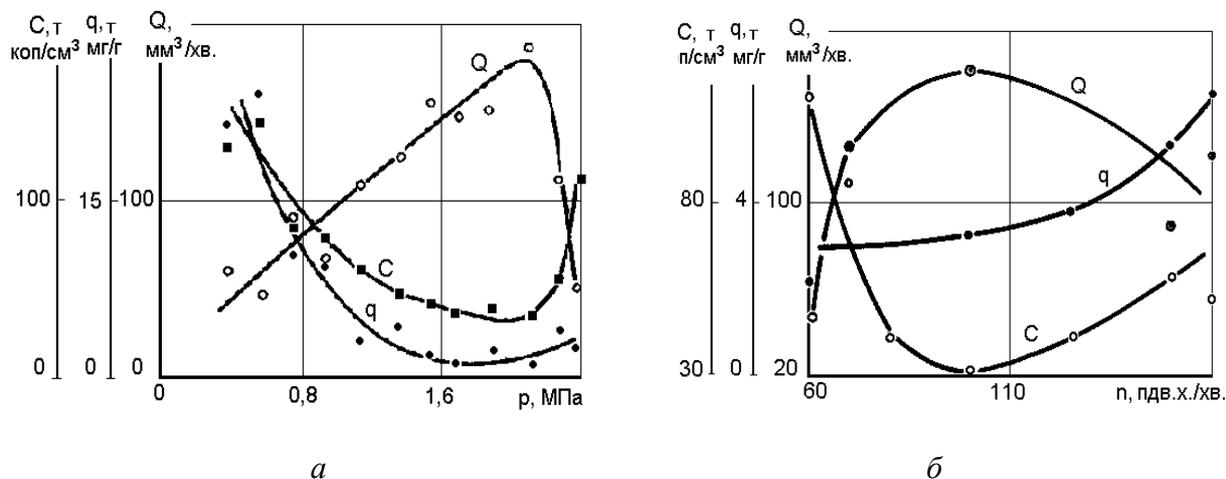


Рис. 5.9. Влияние давления в зоне резания (а) и частоты осцилляции (б) оксидной керамики В013 на производительность (Q) шлифования, относительный расход (q) алмазов и себестоимость (C) обработки

На установленных оптимальных режимах упругого шлифования исследована работоспособность разных алмазных кругов на металлической (М1-10), полимерных (В2-01, В2-08) и металлополимерной (В1-13) связках. Из данных табл. 5.8 видно, что при шлифовании наиболее труднообрабатываемой (табл. 5.9) оксидной керамики более экономичным является использование металлической или металлополимерной связки. Последняя более приемлема для условий прецизионного шлифования, поскольку имеет большую износостойкость, чем полимерные, и менее жесткая, чем металлические.

Таблица 5.8. Показатели упругого шлифования оксидной керамики

Характеристика кругов	Показатели шлифования		
	Производительность шлифования, мм ³ /мин	Относительный расход алмазов, мг/г	Себестоимость шлифования, коп/см ³
АС4 100/80ма – 100 – В2-08	3360	90,2	88,97
АС4 125/100А2 – 100 – В2-01	3280	25,5	26,25
АС6 100/80 – 100 – В1-13	232	6,9	28,27
АС4 100/80 М – 100 – В1-13	203	2,4	26,90
АС6 125/100 – 100 – М1-10	359	1,7	15,55

Сравнение обрабатываемости керамик проводилось при использовании алмазных кругов на связке В1-13 с характеристикой 12А2-45° 150×10×3×32 – АС4ма 100/80–100. Из результатов, приведенных в табл. 5.9,

следует, что при шлифовании слоистых керамик производительность шлифования ниже, а износ кругов выше, чем у оксидно-карбидных. Из изложенного выше представляется, что для условий шлифования оксидной керамики на станках WBM 300/21 и Agathon-250 PL/CNC более приемлемы круги на связке В1-13, а для шлифования оксидной керамики на станках МШ289 – круги на металлических связках.

Таблица 5.9. Сравнительные данные по обрабатываемости режущих керамик в условиях упругого шлифования (давление прижатия – 2 МПа, частота осцилляции – 100 дв.х./мин.

Марка керамики	Показатели шлифования		
	Производительность шлифования, мм ³ /мин	Относительный расход алмазов, мг/г	Себестоимость шлифования, коп/см ³
<i>Оксидная керамика</i>			
SPK (Германия)	88	1,37	58,14
ВО13	376	0,49	14,06
ЦМ332	994	1,64	6,35
<i>Оксидно-карбидная керамика</i>			
ВОК71	3490	9,54	11,44
ВОК60	3197	4,50	6,28
<i>Многослойная керамика</i>			
ВОК95М	2503	12,27	15,73

Необходимо указать на то, что давление в 2 МПа, принятое в табл. 5.9 для всех керамик, содействует достижению высокой производительности шлифования для слоистых керамик с режущим слоем на основе оксидно-карбидных керамик, но имеются и определенные особенности, характерные для них. Это связано с тем, что при давлении более 2 МПа наблюдаются сколы на краях пластин, поэтому эти керамики желательно шлифовать при давлении не более чем 1,6 МПа, где как раз и наблюдается перегиб в относительных расходах алмазов в кругах в отличие от оксидных керамик, где этот перегиб наблюдается при более высоких давлениях. А не могут ли быть вызваны приведенные выше особенности упругого шлифования силовыми показателями процесса шлифования керамик и, в первую очередь, нормальной составляющей P_y ? Эти исследования проводились с помощью универсального динамометра УДМ100 и представлены в табл. 5.10. Анализ ее показывает, что именно на оксидной керамике наибольшей является составляющая P_y .

Поскольку керамика, в отличие от сталей, является структурно-нечувствительным материалом, то реальный контроль качества обработки пластин осуществляется по наличию сколов на кромках и шероховатости

поверхности обработки. Поэтому, наряду с работоспособностью кругов важным фактором является шероховатость поверхности после обработки такими кругами (табл. 5.11). При этом, для каждого метода и станка использовали алмазные круги с характеристикой, наиболее приемлемой по износостойкости круга и производительности обработки. Из табл. 5.11 видно, что в целом, все методы обеспечивают, за счет оптимальной для каждого метода характеристики круга, примерно одинаковую шероховатость. Исключение – упругое шлифование на станках МШ289 и WAM200, где обработка велась без осцилляции. Причем, меньшие значения шага и высоты неровностей обеспечивает врезное, а большую заполненность профиля неровностей – упругое шлифование.

Таблица 5.10. Силовые показатели процесса алмазного шлифования керамик

Материал	Толщина образца, мм	R , Н	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	fa	Удельная работа шлифования, $A_{уд}$, Вт·мин/мм ³
ВОК60	4,8	76,5	1,0	73,0	23,0	0,31	0,67
ВОК71		77,8	1,1	74,0	24,0	0,32	0,67
ВОК95М		105,5	1,7	102,0	27,0	0,26	0,84
ВО13		140,3	7,8	140,0	9,0	0,064	0,40

Таблица 5.11. Показатели шероховатости поверхности пластин из оксидно-карбидной керамики при шлифовании на разных станках

Характеристика алмазного круга	Модель станка	Показатели шероховатости			
		Ra , мкм	S_m , мкм	R_{max} , мкм	t_{50} , %
Упругое шлифование					
6A2 350×10×4×315– АС4 80/63–В1-01–100	WAM200 МШ289	0,48	323,6	2,63	62,5
6A2 330×20×4×250– АС4 80/63–В1-01–100	WBM20	0,20	71,7	1,62	73,3
6A2 400×100×3×76– -АС6 50/40 СК6 -100%	ТШ8805 ГПИТ-10М	0,15	60,6	0,97	82,7
Врезное шлифование					
6A2 500×40×5×380– АС4 100/80–В1-13–100	WBM300/21 МШ 310	0,11	43,1	0,79	62,7
6A2 250×10×3×210– АС4 63/50–В1-13–100	Агатон250 PL-CNC	0,12	48,4	0,92	45,5

Глубинное шлифование						
6A2 350×10×5×250– AC4 80/63–01–100	WFM10/12	0,13	83,3	1,02	56,4	
12A2-45° 150×10×3×32–AC4 100/80–B1-13–100	3B624	0,21	70,7	1,53	60,4	

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что с повышением давления в зоне контакта при упругом шлифовании керамик существуют условия достижения минимальной себестоимости обработки. При этом, с повышением давления производительность шлифования возрастает, но оптимальная величина давления ограничивается себестоимостью процесса шлифования. Для условий упругого шлифования оксидной керамики лучшими являются алмазные круги на металлической (M1-10) и металлополимерной (B1-13) связках, а для оксидно-карбидной керамики – круги на металлополимерной (B1-13) связке. Для условий упругого шлифования себестоимость обработки возрастает в следующем ряду керамик:

оксидно-карбидная – многослойная – оксидная.

Силовые закономерности шлифования инструментальных керамик.

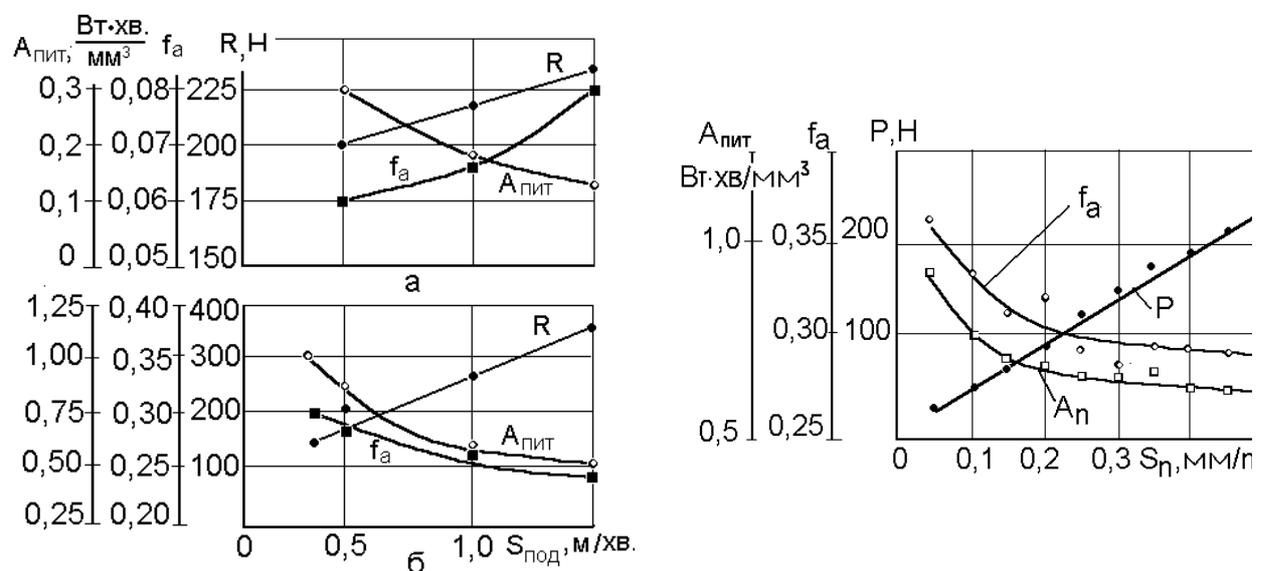


Рис. 5.10. Зависимость равнодействующей силы резания R , коэффициента абразивного резания f_a и удельной работы шлифования $A_{уд}$ от продольной подачи при обработке керамик ВО13(а), ВОК60(б) [117]

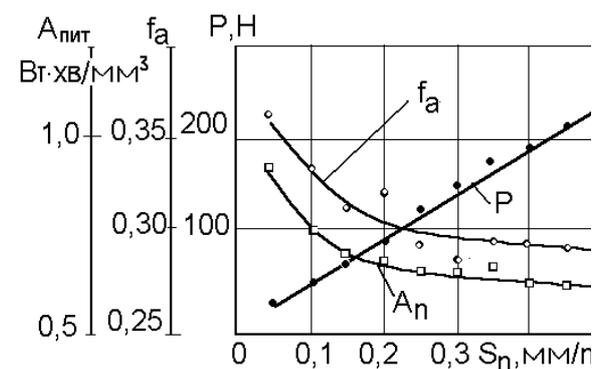


Рис. 5.11. Зависимость равнодействующей силы резания R , коэффициента абразивного резания f_a и удельной работы шлифования $A_{уд}$ от поперечной подачи при обработке керамики марки ВОК71 [62]

Влияние режимов шлифования. Установлено (рис. 5.10), что с повышением $S_{\text{пр}}$ усилие резания увеличивается, а удельная работа ($A_{\text{уд}}$) снижается. Такой характер зависимости наблюдается при шлифовании как оксидной, так и оксидно-карбидной керамики. В то же время, характер изменения коэффициента fa с повышением $S_{\text{пр}}$ для этих видов керамик неодинаков. При шлифовании оксидной он несколько повышается, тогда как при обработке оксидно-карбидной падает (рис. 5.10). Аналогичное наблюдается и при повышении глубины шлифования (рис. 5.11). С увеличением скорости вращения круга удельная работа возрастает, а силы резания снижаются, что характерно для обоих видов керамик. Но только в случае обработки оксидно-карбидной имеет место снижение коэффициента fa с ростом $v_{\text{кр}}$.

Влияние высоты обрабатываемого изделия. Наличие этого влияния является особенно актуальным для процессов шлифования многогранных пластин. Установлено, что повышение высоты пластины из оксидно-карбидной керамики в 3,5 раза (с 4,7 до 14 мм) не влияет на fa . При этом, усилие резания возрастает, а удельная работа падает. Характерно, что возрастание усилия от 130 до 185 Н (в 1,4 раза) отвечает снижению удельной работы в 1,5 раза. Хотя усилие резания и растет, но работа, приходящаяся на сьем 1 мм³ керамики, падает в большей степени. Это указывает на то, что с точки зрения энергетических затрат лучше вести групповое шлифование пластин из керамики, чем обрабатывать только одну из них [62].

Влияние марки керамики приведено в табл. 5.12 из которой видно, что при обработке оксидной керамики составляющие силы резания P_x и P_y являются существенно большими, чем при шлифовании оксидно-карбидной.

Тепловые закономерности при шлифовании инструментальных керамик изучены в работе [62], где подтверждено, что в достаточно широком диапазоне значений Q температура в зоне обработки изменяется по квадратичной зависимости (рис. 5.12), которую можно условно поделить на две части. Вначале (до ~ 1800 мм³/мин), повышение температуры несколько сдерживается тем, что с увеличением производительности растет площадь контакта пластины с алмазными зернами, эффективными теплостоками. Далее ($Q > 1800$ мм³/мин), возрастает контакт связки круга с материалом, что приводит к выделению дополнительного тепла, не связанного непосредственно с работой резания.

Возвращаясь к рис. 5.12 обратим внимание на то, что как показывает математический анализ совмещенных кривых $T-Q$ для разных керамик, эта зависимость с погрешностью 15 % может быть описана как:

$$T = 7,714 \cdot 1,00105^Q.$$

Таблица 5.12. Силовые показатели процесса алмазного шлифования инструментальных керамик [62]

Марка керамики	R , Н	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	fa	Удельная работа шлифования, $A_{уд}$, Вт·мин/мм ³
Высота пластины 4,8 мм						
ВОК60	76,5	1,0	73,0	23,0	0,31	0,67
ВОК71	77,8	1,1	74,0	24,0	0,32	0,67
ВЗ	78,7	1,0	75,0	24,0	0,32	0,67
ВОК65	83,8	1,1	80,0	25,0	0,31	0,76
ВОК85С	85,1	1,1	82,0	23,0	0,28	0,67
Силинит	89,8	2,2	88,0	17,6	0,20	0,67
ВОК95С	105,5	1,7	102,0	27,0	0,26	0,84
Кортинит	125,3	6,0	125,0	9,0	0,072	0,34
ВО13	140,3	7,8	140,0	9,0	0,064	0,40
ВО13Г	200,5	7,8	200,0	13,0	0,065	0,47
Высота пластины 8 мм						
ВОК85С	149,2	3,5	144,0	39,0	0,27	0,65
ВО13	206,7	8,5	206,0	14,0	0,068	0,30
ВО16	264,9	11,4	264,0	18,0	0,068	0,40
ВО13Г	291,1	13,0	290,0	22,0	0,070	0,45
СПК (ФРГ)	351,1	16,3	350,0	23,0	0,066	0,50

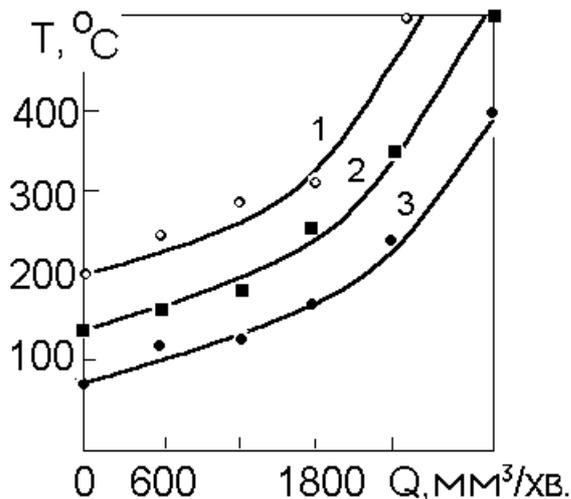


Рис. 5.12. Зависимость температуры в зоне обработки от производительности при шлифовании керамик: 1 – ВОК71, 2 – нитридной, 3 – ВО13 [62]

Для конкретных керамик такая кривая эквидистантно смещается по шкале T на величину, равную $79k$, где k – коэффициент, учитывающий теплопроводные свойства керамических материалов и их обрабатываемость. Таким образом, в целом приведенная выше зависимость принимает вид:

$$T = 79k + 7,714 \cdot 1,00105^Q.$$

Проведенные [62] исследования при $Q = 1188$ мм³/мин ($S_{пр} = 0,5$ м/мин), что является близким к производительности 1200 мм³/мин, наиболее распространенной при шлифовании, с целью установления значений коэффициента k , который определяет сдвиг кривых $T-Q$ для разных марок керамик:

Керамика	ЦМ332	ВО13	ВО13Г	Силинит	Кортинит	ВОК71	ВОК85С
$T, ^\circ\text{C}$	88	96	123	143	145	263	275
k	0,77	0,88	1,22	1,47	1,50	2,99	3,14

Как видно, основа керамик значительно влияет на тепловые процессы в зоне шлифования, что связано с их теплофизическими свойствами. Так, коэффициент теплопроводности оксидной керамики ВО13 равен 14,4 Вт/(м·К), а оксидно-карбидной типа ВОК – 7,4 Вт/(м·К), и, таким образом, теплоотвод из зоны обработки последней является меньшим, а температура большей. Приведенное показывает, что в случае шлифования оксидной керамики возможным является использование кругов на металлических связках на основе Cu–Sn, а при шлифовании оксидно-карбидной керамики это недопустимо. С целью подтверждения этого изучали влияние характеристики алмазного слоя на температуру шлифования. Использовали круги с алмазами близких значений прочности (АС4, АС6) и зернистости (80/63, 100/80), 100%-ной концентрации, поэтому на температуру преимущественно влияла связка (табл. 5.13).

Таблица 5.13. Влияние характеристики рабочего слоя алмазных кругов на температуру в зоне шлифования керамики

Керамика	Характеристика круга		Температура, $^\circ\text{C}$
	алмазы	связка	
ВО13	АС4 80/63ма	В1-13	106
	АС6 100/80	М1-01	125
	АС6 100/80	СК6	156
	АС4 100/80С1	М2-01	356
ВОК71	АС4 100/80	В1-13	150
	АС4 100/80А2	В1-01	206
	АС6 100/80	М1-01	206
	АС4 100/80ма	В2-08	233
	АС6 100/80	СК6	250
	АС4 80/63ма	В1-13	265
	АС4 100/80С1	М2-01	825

Анализ табл. 5.13 показывает, что наименьшую температуру обеспечивают круги на полимерных связках, более высокую – на керамических и металлических. Тем самым за счет выбора связующего температуру можно снизить от 3 до 5 раз. Подтверждено также [62], что керамику на оксидной основе можно обрабатывать кругами на металлических связках, не опасаясь перегрева ее поверхности.

Выше в данной подглаве нами было уже обращено внимание на то, что ориентация только на учет составляющей P_z не совсем отражает тепловые закономерности процесса. Поэтому, рассмотрена [62] связь между ко-

эффицентом абразивного резания (fa) и температурой шлифования при одинаковой производительности обработки. Выявлено, что для совокупности оксидной, нитридной и оксидно-карбидной керамик такая корреляционная зависимость имеет вид: $T = 83,3 + 568,2 \cdot fa$, и, таким образом, с ростом fa температура в зоне обработки повышается. Это следует иметь в виду, поскольку в [62] установлено, что для повышения износостойкости кругов необходимо стремиться к повышению значения fa . Такое повышение температур особенно опасно для керамик с точки зрения возникновения трещин и сколов на кромках пластин.

Обратим внимание, что керамические материалы на основе различных соединений, в том числе на основе карбидов бора, кремния, хрома и других элементов имеют высокие физико-химические свойства. Анализ их свойств позволил сделать предположение о возможности получения высоких эксплуатационных характеристик от применения этих материалов при изготовлении функциональных изделий. Прежде всего, это касается перспективности применения материала на основе карбида бора для изготовления деталей типа «шар». Данные материалы имеют высокую твердость, прочность и уникальную износостойкость в условиях воздействия агрессивных сред и абразивов. Однако, материал на основе карбида бора для изготовления керамических шаров в настоящее время не применяется, что связано с высокой трудоемкостью и стоимостью прецизионной обработки при использовании традиционных методов шлифования и доводки. Основными компонентами керамик являются твердые карбиды и нитриды, физико-механические свойства которых близки к свойствам абразивных материалов. Их возможно обрабатывать только инструментами на основе алмазов.

Мы уже обращали выше внимание на то, что основным недостатком керамик является их относительно высокая чувствительность к резким температурным воздействиям, что необходимо учитывать при разработке процессов шлифования, так как это может вызвать трещины и сколы. В работе [351] были изучены особенности поведения керамик при динамическом нагреве в интервале температур до 1400 °С. Значения степеней окисления при различных температурах динамического нагрева приведены на рис. 5.13.

Современную инструментальную керамику по склонности к окислению можно условно разделить на 3 группы (рис. 5.13), причем оксидно-карбидная керамика более склонна к окислению, чем просто оксидная. Характерным для 1-й группы «склонных к окислению» керамик является то, что они начинают активно окисляться с интервала температур 700–740 °С. Это связано с окислением TiC , который есть в составе керамик, и появлении на его поверхности TiO_2 -анатаза, который не имеет защитных свойств. Толщина окисленного слоя на керамике ВЗ составляет 0,8–1,2 мм, а на керамике ВOK60 — 0,33 мм.

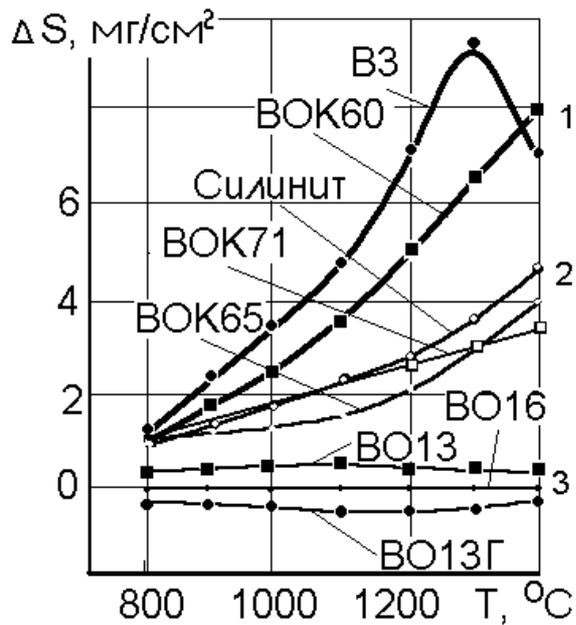


Рис. 5.13. Степень окисления инструментальных керамик при их динамическом нагреве [351]

У керамик второй группы (ВОК65, ВОК71, Силинит) толщина этого слоя несколько меньше – 0,24–0,25 мм. Начало активного окисления приходится на интервал температур 800–1160 °C. Меньшая толщина и степень окисления вызваны тем, что эти керамики являются более мелкодисперсными, а также тем, что они дополнительно легируются металлами, которые образуют сложную оксидную пленку. Так, у керамик ВОК71 и ВОК65 в окисленном слое рентгенографически регистрируются линии $MgTiO_2$, а также линии TiO_2 -анатаза и рутила. В окисленном слое силинита находятся Si, SiO_2 - β и $MgSiO_4$.

К третьей группе относятся оксидные керамики, которые практически не окисляются до температур 1400 °C.

Обратим внимание на то, что в сравнении с другими высокотвердыми инструментальными материалами – вольфрамовыми и безвольфрамовыми твердыми сплавами – керамики окисляются в значительно меньшей степени. В целом, степень окисления инструментальных керамик при нагреве до температур 1400 °C невелика и составляет $(0,2–7,9) \cdot 10^{-2}$ кг/м², тем не менее это может вызвать трещины в поверхностном окисленном слое при шлифовании.

Поиск путей решения вопроса обеспечения гарантированной износостойкости специальных кругов для шлифования керамик следует вести, на наш взгляд, на основе изложенного в предыдущей главе положения о критической производительности обработки. Применительно к процессам шлифования инструментальных керамик, которые преимущественно обрабатываются комбинированным упруго-врезным способом, зависимость для расчета критической производительности имеет следующий вид:

$$Q = k_F k_H k_{cp} \frac{B(D-B)}{56,25 k_C D} \cdot \frac{H_P \cdot v_K}{Z \cdot H_M},$$

где k_F – коэффициент, учитывающий формоизменение режущей поверхности круга, k_H – коэффициент, учитывающий положение зерен СТМ в режущем слое круга, k_{cp} – коэффициент, учитывающий изменение площади

среза зерном СТМ, вызванное реальным положением зерен, k_C – коэффициент, учитывающий сжатие зерен СТМ, D – наружный диаметр круга, B – ширина режущей поверхности круга, H_P – прочность (разрушающая нагрузка зерен СТМ), v_K – окружная скорость вращения круга, Z – зернистость СТМ, H_M – твердость обрабатываемого материала.

Анализ формулы показывает, что с возрастанием твердости обрабатываемого материала значение критической производительности имеет тенденцию к снижению и, тем самым, это приводит к повышению износа круга. Влияние твердости для материалов в достаточно широком (82–94 *HRA*) диапазоне исследовано на режущей керамике марки ВОК60 при обработке кругом с характеристикой АС4 100/80–В1-13–100:

Твердость, <i>HRA</i>	82–83	85–88	90–91	93–94
Относительный расход алмазов, мг/г	1,23	1,41	1,75	1,93
Эффективная мощность, кВт	0,95	1,07	1,17	1,28

Приведенные выше данные подтверждают наш вывод о том, что с повышением твердости керамических пластин процесс резания затрудняется: износ кругов и мощность шлифования возрастают. В формуле обрабатываемый материал представлен твердостью по Виккерсу $H_M \cdot 10^6$ МПа и для керамических материалов, имеющих твердость в *HRA*, формула перерасчета имеет вид:

$$H_M = -14582,93 + 249,83 \text{ HRA}.$$

Упруго-врезное шлифование реализовано при обработке опорных поверхностей керамических пластин на станке мод. WBM 300/21 в условиях двустороннего шлифования кругами 503D–500×40×4×380–D151–B75B28 (производства фирмы «Wendt») и разработанными нами кругами 6A2 500×40×4×380–АС4 100/80 (160/125)–В1-13–100. Режимы шлифования: $v_K=18$ м/с, скорость врезания 2–3 мм/мин, осцилляция – 29 дв.х./мин. Установлено (табл. 5.14), что круги с зернистостью алмазов 125/100 и 160/125 на связке В1-13 обеспечивают более высокую производительность шлифования (в 1,2 раза) в сравнении с кругами фирмы «Wendt» и кругами на связке марки В2-01. Алмазные круги с зернистостью алмазов 100/80 и 125/100 обеспечивают и более высокую износостойкость кругов (до 2-х раз) в сравнении с кругами фирмы «Wendt». Кроме того, установлено, что значения максимальной высоты неровностей обрабатываемой поверхности (R_{\max}) керамических пластин при шлифовании кругами фирмы «Wendt» выше у 1,18 раза, чем при шлифовании разработанными нами кругами. Это означает, что вероятность возникновения трещин и сколов в первом случае выше.

Таблица 5.14. Производительность алмазных кругов 6А2 500 при шлифовании керамики ВОК60

Характеристика круга	Количество пластин, обработанных кругом за период стойкости, тыс. шт.	Производительность шлифования, мм ³ /мин	Относительный расход алмазов, мг/г
D151 – D28D75 («Wendt»)	8–10	6856	11,91
АС4 100/80ма–В2-01–100	1,2–3,0	6850	16,48
АС4 100/80ма–В1-13–100	8–10	6856	5,94
АС4 125/100ма–В1-13–100	4–6	7940	8,65
АС4 160/125ма–В1-13–100	4–6	7940	11,92

Известно [62], что износ алмазных кругов при шлифовании керамик преимущественно определяется воздействием шлама на связку круга. Исследования, проведенные на гранулометре *CILAS* мод. 715 E482 показали, что шлам в основном состоит из мелкодисперсных (до 3 мкм) фракций. Средний размер частиц шлама у оксидно-карбидных керамик составляет 1,72 мкм, оксидных 1,65 мкм, а керамик с наличием $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$ – 1,55 мкм. В целом, чем меньше величина частиц шлама, тем больше растет величина нормальной составляющей усилия резания и меньше величина fa (табл. 5.15).

Таблица 5.15. Силовые показатели процесса алмазного шлифования керамик

Керамика	Силовые показатели			
	P_z , Н	P_v , Н	$A_{\text{вд}}$, Вт/мм ³	fa
Оксидно-карбидная	29	125	0,55	0,23
Оксидная	14	206	0,30	0,07
$\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$	9	234	0,25	0,038

Из табл. 5.16 видно, что в процессе алмазного шлифования карбидной керамики на основе карбида бора необходимо развивать ощутимо большие усилия и основная задача как раз и заключается в поиске методов снижения таких усилий. Нами разработан ряд технологических способов, который позволяет решить данную задачу. Приведенные выше результаты исследований процесса шлифования конструкционной карбидной керамики показывают, что с целью уменьшения абразивного воздействия шлама керамики на связку круга необходимо стремиться к увеличению зазора в зоне контакта инструмента с изделием, например, за счет повышения скорости круга или зернистости алмазов. Однако, при этом необходимо учитывать возможное ухудшение качества обработки. Указанные выше закономерности относятся к производительной обработке керамических изде-

лий, когда главным является обеспечение максимального съема для формирования этого изделия, а в случае прецизионной обработки применяется схема доводки связанным абразивом (инструментом) или с применением свободного абразива (алмазной пастой). Традиционные методы обработки не вполне пригодны для шлифования высокотвердых керамических материалов в виде деталей типа «шар», что не позволяет добиваться прецизионной точности таких изделий. Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на процесс прецизионной обработки шаров, является непрерывное изменение положения собственной оси вращения шара в процессе доводки. Положение этой оси определяется направлением относительных перемещений шара и инструмента, зависящих от технологической схемы обработки. Для повышения точности и снижения времени финишной обработки разработан [364] метод доводки с применением алмазных паст, использующий конструкцию притира имеющего *V*-образные канавки переменной кривизны, что позволяет значительно увеличить скорость проскальзывания в этой точке контакта шара и верхнего прижимного диска, а как следствие это приводит к значительному увеличению производительности обработки [364].

Проведенными исследованиями процесса доводки керамики на основе карбида бора установлено, что чем больше зернистость алмазов в пасте, тем выше должна быть величина концентрации алмазов. Это вызвано тем, что съем припуска при доводке происходит в результате микроцарапания отдельными зернами и количество зерен оказывает большее влияние на процесс обработки, чем их размер. При доводке шаров в кольцевых канавках этот эффект не проявляется вследствие обработки при более высоких прижимных давлениях и низких скоростях проскальзывания, что приводит к интенсивному дроблению зерен алмазов в процессе обработки. Использование алмазов зернистостью менее 7/5 не приводит к существенному улучшению точности обработки и уменьшению шероховатости обработанной поверхности.

Сравнительные исследования шероховатости поверхности шаров после доводки, проведенные на профилографе Talysurf 5M-1120, Talor Hobson (Англия) показали, что в зависимости от материала шаров (сталь ШХ15, керамика ZrO_2 , B_4C , SiC), эти показатели для различных производителей могут различаться и довольно существенно (рис. 5.14).

Установленные закономерности, а также изучение работоспособности алмазных кругов при шлифовании режущей керамики, позволили разработать эффективные технологические процессы шлифования пластин из минералокерамики [117]. Они позволяют в сравнении с базовой технологией повысить производительность обработки в 1,3 раза, снизить расход алмазов на этих операциях в 1,5–2,5 раза и повысить на 5 % выход изделий

в годные, достичь шероховатость поверхности по параметру R_a в пределах 0,08–0,16 мкм. Вместе с тем, на рынке появляются многослойные керамические пластины, обработка которых имеет определенные особенности изложенные ниже.

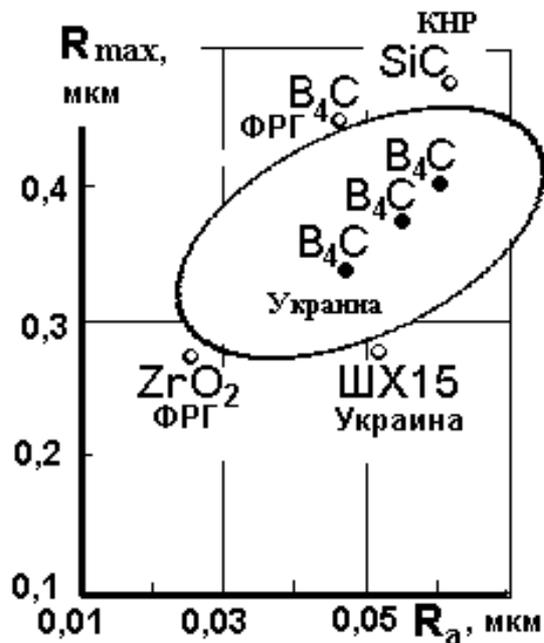


Рис. 5.14. Показатели шероховатости поверхности изделий типа «шар» из керамик и стали ШХ15

В работах [365–367] теоретически обоснована и доказана экспериментально возможность создания многослойных керамических пластин повышенной износостойкости на основе термодинамического совмещения слоев, а также определены соотношения толщин этих слоев. Однако для эффективного применения такого нового режущего инструмента важно изучить вопросы качественной и производительной алмазной обработки слоистых пластин. Укажем, что кроме силового воздействия алмазного круга на поверхность пластины, важным фактором, определяющим качество обработанной поверхности, является тепловое воздействие на керамику в процессе шлифования, которое может быть достаточно существенным. Это

особенно опасно для керамик с точки зрения возникновения трещин и сколов на кромках пластин за счет нежелательного распределения поля напряжений в многослойных пластинах. Для избежания этого нами разработаны принципы изменения величин соотношения толщин слоев, что позволило отодвинуть опасные напряжения от края пластин. Соотношения толщин рассчитывались с учетом распределения температур и напряжений, возникающих при шлифовании многослойных пластин с режущим слоем из керамики оксидно-карбидного типа и БВТС в виде подложки.

Каждый слой отдельно рассматривался как однородный и изотропный. Распределение температуры в двухслойной пластине от движущегося источника тепла рассматривали в рамках линейной стационарной двумерной модели [368] температурного поля. При решении задач использовали универсальный пакет прикладных программ «Термоупругость», основанный на методе конечных элементов. Пластина разбивалась на 456 элементов с количеством узлов 258. Разбивка изучаемой области на треугольные конечные элементы и подготовка исходной информации осуществлялась автоматически. Расчет вели на ПЭВМ и ошибка расчетов не превышала

6 %. По полученным значениям температурного поля в фиксированные моменты времени рассчитывались поля напряжений. Расчеты подтвердили, что наиболее оптимальной с точки зрения снижения градиента температур будет пластина, в которой толщина БВТС составляет $\frac{3}{4}$ толщины пластины, а керамики – $\frac{1}{4}$. Установлено также, что температурное поле в слоистых пластинах преимущественно формируется в керамике, поэтому основным элементом, выдерживающим тепловое нагружение, является керамика. Выявлено, что изменение удельной теплоемкости керамик от 0,42 до 1,26 кДж/(кг·К) несущественно влияет на распределение поля температур в слоистой керамике.

Следующим этапом расчетов была оценка напряженно-деформированного состояния (НДС), возникающего от действия градиента температур для условий шарнирного закрепления пластины по двум граням. Учитывая конструктивные особенности, способ закрепления и нагружения, а также хрупкий характер разрушения пластин, расчет их НДС сводился к решению краевой плоской задачи теории термоупругости. С целью этого строилась математическая модель процесса деформирования пластины под действием температурного поля. При построении модели принимали, что модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент температурного расширения (КТР) обрабатываемого материала постоянные и не зависят от температуры. Задачу решали в линейном виде. Для вывода развязывающих соотношений использовали стандартную формулировку метода конечных элементов [159].

Анализ распределения напряжений показал, что максимальные напряжения растяжения, достигающие ≈ 400 МПа, находятся в верхней правой кромке пластины, а максимальные сжимающие напряжения находятся в области раздела фаз, и при этом имеет место резкий переход напряжений от сжатия до растяжения. Поэтому, наличие прослойки с повышенным содержанием никеля для слоистых пластин является крайне важной. Укажем, что изменением свойств керамики и БВТС возможно изменить характер напряжений в опасных точках. Рассматривалось отношение $K_\alpha = \alpha_{\text{КЕР}} / \alpha_{\text{БВТС}}$ величин КТР. На рис. 5.15 приведено изменение значений напряжений по внешней кромке пластины при повышении отношения величины K_α от 0,59 до 1,7. Исследованиями установлено, что необходимо стремиться к снижению данного отношения. При этом, распределение напряжений будет изменяться следующим образом: на поверхности керамики напряжения растяжения снизятся, а в объеме БВТС снизится градиент напряжений, что, в свою очередь, вызовет снижение напряжений в переходной зоне от БВТС к керамике. Тем самым, для того, чтобы избежать сколов по внешним кромкам при шлифовании пластин из режущей керамики, возможно, во-первых, использовать режимы обработки и круги,

обеспечивающие невысокие температуры шлифования, и, во-вторых, использовать двухслойные пластины «керамика – БВТС», позволяющие снизить максимальные значения напряжений на кромках пластин.



Рис. 5.15. Характер распределения остаточных напряжений σ_x в слоистой пластине при шлифовании в зависимости от соотношения КТР слоев: 1 – 0,59; 2 – 1,0; 3 – 1,7

Для оптимизации процесса алмазного шлифования слоистых композитов «керамика–БВТС» важно также оценить их влияние на состояние режущей поверхности алмазного круга. При этом, необходимо учитывать, что шлифование граней пластин традиционным методом – вдоль слоя керамики и твердого сплава, требует обязательной осцилляции пластины, поскольку величина износа алмазного круга при обработке керамики и БВТС отличается. Так, шлифование пластин из слоистой керамики, сплава ТН20 и керамики ВОК60 кругом АС6 100/80–В1-13–100 (производительность шлифования 400 мм³/мин; СОТС – содовый раствор) дало следующие результаты:

Марка материала	ВОК60	ТН20	Слоистая пластина
$N_{\text{эф}}$, кВт	0,55	0,85	0,68
q_p , мг/г	0,81	0,66	0,62

Видно, что при шлифовании слоистой керамики мощность обработки является промежуточной, а износ круга в сравнении с БВТС даже снижается. В значительной степени это связано с особенностями состояния и износа режущей поверхности круга. Так, спектральный анализ режущей поверхности круга при отдельной обработке керамики и БВТС позволил выявить, что никель и оксид алюминия в меньшей степени задерживается на поверхности зерна, карбид титана – в большей. Методом рентгеновского микроанализа на алмазных зернах выявлено 14 масс. % алюминия, 16 масс. % – никеля и от 26 до 40 масс. % титана. В целом, от 60 до 86 % титана, никеля и алюминия от общего содержания элементов на режущей поверхности круга при отдельном шлифовании удерживается на поверхности связки.

Шлифование трехслойного композита перпендикулярно переходным зонам, когда алмазные зерна проходят при резании последовательно керамику–твердый сплав–керамику, отличается тем, что практически весь титан (от 50 до 70 % его содержания на режущей поверхности круга) находится на алмазных зернах (рис. 5.16, *а*), а алюминий распределяется более равномерно (рис. 5.16, *б*). При этом следов никеля в спектре алмаза не выявлено.

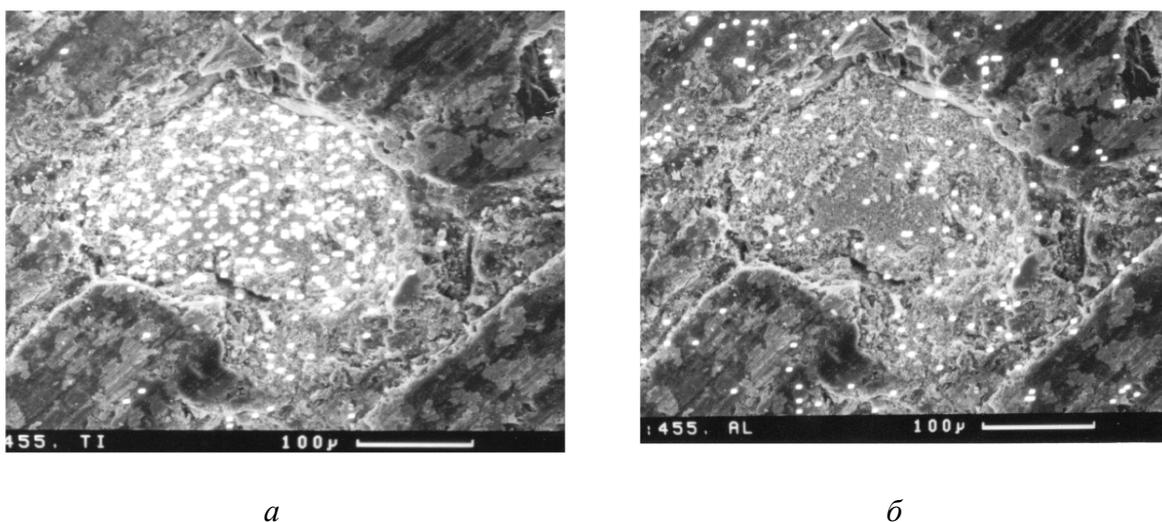


Рис. 5.16. Распределение элементов на режущей поверхности круга в районе алмазного зерна при шлифовании многослойной керамики: *а* – титана, *б* – алюминия

Слоистая керамика соединяет высокую износостойкость минералокерамики и относительно высокую прочность БВТС. Пластины формируются при одновременном горячем прессовании этих двух материалов. При этом, на границе между режущим слоем из керамики и подложкой из БВТС образуется переходная зона, ширина которой в зависимости от условий спекания колеблется от 30 до 200 мкм. Рентгеновский микроанализ показал, что для переходной зоны наиболее характерным является преимущественное насыщение никелем и снижение содержания кислорода в сравнении с ожидаемым в граничной с твердым сплавом зоне. Наличие данной своеобразной пластичной зоны позволяет достичь хорошего сцепления режущего слоя из керамики с подложкой и получить эффект повышения прочности пластин при изгибе.

Определенный интерес вызывает влияние величины переходной зоны на показатели процесса шлифования, на определенные изменения в ней при этом, а также и на износ алмазных кругов. Установлено, что на ширину зоны не влияет направление движения алмазных зерен: вдоль переходной зоны и, тем самым, вдоль слоев, перпендикулярно ей со стороны керамики

или со стороны подложки из БВТС. Выявлено, что в случае движения алмазных зерен из БВТС на керамику никель переносится зернами на керамическую часть не далее переходной зоны. В целом, на наш взгляд, лучшими являются те способы шлифования слоистой режущей керамики, которые обеспечивают перемещение зерен перпендикулярно переходным зонам.

Спектральный анализ режущей поверхности круга при шлифовании трехслойных композитов показал наличие в спектре алмаза преимущественного содержания карбида титана на поверхности алмаза (рис. 5.16, а), вследствие быстрого износа кругов. Чтобы избежать этого, необходимо использовать круги с металлопокрытием зерен. Сравнение обрабатываемости керамик проводилось при использовании алмазных кругов 12A2-45° 150×10×3×32–АС4ма 100/80–В1-13–100 [117]. Из результатов, приведенных в табл. 5.16, следует, что при шлифовании слоистых керамик производительность шлифования ниже, а износ кругов выше, чем у оксидно-карбидных. По себестоимости обработка оксидных и оксидно-карбидных керамик почти не отличается. Исключение представляют многослойные керамики ВОК95М, а также керамика SPK (фирма «Фельдмюлле», ФРГ).

Таблица 5.16. Сравнительные данные по обрабатываемости режущих керамик при упругом шлифовании (прижим – 2 МПа, частота осцилляции – 100 дв.х./мин) [117]

Марка керамики	Показатели шлифования :		
	Производительность шлифования, мм ³ /мин	Относительный расход алмазов, мг/г	Себестоимость шлифования, коп/см ³
<i>Оксидная керамика</i>			
SPK	88	1,37	58,14
ВО13	376	0,49	14,06
ЦМ332	994	1,64	6,35
<i>Оксидно-карбидная керамика</i>			
ВОК71	3490	9,54	11,44
ВОК60	3197	4,50	6,28
<i>Слоистая керамика</i>			
ВОК95М	2503	12,27	15,73

5.5. Обработка магнитотвердых сплавов

Магнитотвердые сплавы широко применяются в промышленности, в частности в виде постоянных магнитов. В настоящее время получить магниты в окончательном виде без механической обработки невозможно. Известно [369], что магнитные литейные сплавы марок ЮНДК обладают по-

вышенной хрупкостью, крупнозернистостью структуры, и низкой теплопроводностью. Так, магнитные высококоэрцитивные сплавы ЮН15ДК24БА (торговая марка АЛНИКО) и ЮНДК35ТА (торговая марка ТИКОНАЛЬ) из-за специфики физико-механических свойств: высокой твердости в сочетании с высокой хрупкостью, низкой теплопроводности, напряженного состояния структуры - предрасположены к образованию сколов, прижогов и микротрещин. Поэтому их эффективная механическая обработка затруднена. В литературе приведены некоторые данные о точении и шлифовании магнитов и показано [370, 371], что предпочтительнее обработка их алмазными кругами.

Поскольку технологии резки заготовок магнитных сплавов отрезными абразивными кругами из электрокорунда не обеспечивают как качество, так и точность при резке, заготовки необходимо дополнительно шлифовать по торцу, что приводит к необходимости увеличения припуска на обработку до 2-х раз. Невозможность использования отходов шлифования магнитов, включающих остродефицитные материалы, при плавке, из-за наличия в них абразивной составляющей, приводит к невозвратной их потере, а их утилизация представляет экологическую проблему, так как эти отходы требуют специальных условий захоронения. Безвозвратные потери из-за появления дефектов в магнитных сплавах после механической обработки превышают 25 %. Важным условием бездефектного алмазного шлифования магнитотвердых сплавов является снижение тепловой и силовой напряженности в зоне резания. Поэтому следует использовать такие методы шлифования и круги из СТМ таких характеристик, которые обеспечивают наименьшие усилия резания при необходимой производительности и рациональном износе круга.

В ходе исследований [372] составляющие силы резания измерялись с помощью универсального динамометра УДМ-100. Удельная интенсивность шлифования $Q_{уд}$, мм³/(мин·Н), коэффициент абразивного резания $fa = P_Z/P_Y$, удельная работа шлифования $A_{уд}$, Вт·мин/мм³, учитывающие составляющие силы резания P , рассчитывались по методике [373]. Шлифование осуществлялось на станке 3В642, модернизированном для различных методов обработки, при скорости круга 30 м/с, продольной подаче 2,0 м/мин, поперечной 0,05 мм/дв.х. в присутствии СОТС (натрий азотнокислый – 1,0 мас. %, натрий азотистокислый – 0,2 %, вода – остальное). Применялись круги формы 12А2-45° 150×10×3×32 различных характеристик. Шероховатость обработанной поверхности регистрировалась на профилографе-профилометре мод. 252.

С целью поиска эффективной технологии обработки магнитных материалов проанализированы [372] различные методы шлифования, в том числе с введением электрического тока в зону резания. Исследования по-

казали, что при достаточно высокой производительности ($1380 \text{ мм}^3/\text{мин}$) процесса шлифования магнитов из наиболее труднообрабатываемого сплава типа ЮНДК именно алмазное шлифование с охлаждением обеспечивает отсутствие сколов и трещин на обработанной поверхности магнитов. Это связано с тем, что при электроэрозионном и электроискровом шлифовании электрические разряды, попадая на поверхность магнита, вызывают резкое тепловое воздействие, приводящее к растрескиванию. Хотя при электрохимическом шлифовании таких ярко выраженных электроэрозионных разрядов нет, однако и в этом случае наблюдаются сколы, что обусловлено вкладом электрохимической составляющей технологического тока и формированием оксидных пленок на обрабатываемой поверхности, приводящее к схватыванию и задирам. Указанное подтверждается данными по электрохимической обработке (ЭХО). Так как размеры неэлектропроводных включений и выступов, образующихся при ЭХО литых магнитотвердых сплавов (20–30 мкм для ЮНДК25БА), и межэлектродного зазора соизмеримы, сплавы нельзя обрабатывать при величине последнего менее 0,05–0,08 мм, вследствие чего данный метод может быть рекомендован лишь для черновых операций [374]. Чтобы эффективно использовать электрохимическую обработку, необходимо найти условия, когда действие оксидных пленок не было бы отрицательным или они отсутствовали бы. Одним из методов, при которых оксидные пленки не формируются, является алмазное шлифование с охлаждением. В то же время в этом случае необходимо применять алмазные круги, которые обеспечивали бы при прочих равных условиях наименьшие силы в зоне резания.

Как было указано выше, магнитотвердые сплавы являются хрупкими и подвержены сколам при обработке, поэтому определение характеристик алмазных кругов и режимов шлифования, обеспечивающих при прочих равных условиях наименьшие силы резания, весьма актуально. На первом этапе исследования [372] определялись силовые показатели процесса шлифования алмазными кругами на различных связках. Установлено (табл. 5.17), что при обработке магнитных сплавов по критерию наименьшей силы резания эффективна полимерная связка В1-11П. Круги на керамической связке СК6 также обеспечивают малые силы резания, но удельная интенсивность шлифования ими невысока, а удельная работа при их применении больше, чем у кругов на остальных связках. Неприемлемо и использование инструмента на металлополимерных связках из-за повышенной силы резания, малой удельной интенсивности шлифования и образования сколов по кромкам изделий.

Наряду со связкой кругов, на силовые показатели при шлифовании магнитных сплавов существенно влияет покрытие алмазных зерен (МAB – металлизированное агрегированное, М – никелевое, С – стеклопокрытие).

В случае обработки сплавов типа ЮНДК кругами из алмазов с различными покрытиями на связке В1-11П, наилучшие показатели обеспечивают круги из алмазов со стеклопокрытием или без покрытия. Применение инструмента из алмазов с металлопокрытием допустимо, однако при этом возможно возникновение сколов по краям обрабатываемого изделия. Это видно из полученных при тех же режимах следующих данных:

Покрытие	P , Н	$A_{уд}$, Вт·мин/мм ³	$Q_{уд}$, мм ³ /(мин·Н)	fa
Без покрытия	308,8	1,06	7,7	0,23
МАВ	343,5	0,99	3,4	0,14
М	249,6	0,91	5,0	0,22
С	233,3	0,97	10,4	0,26

Установлено также, что с ростом скорости круга сила резания несколько снижается и при этом величина fa падает.

Таблица 5.17. Силовые показатели процесса шлифования сплава ЮНДК38Т7,5 алмазными кругами с характеристикой слоя АС6 100/80–100 на металлических и керамических связках и кругами АС4 100/80–100 на полимерных [372]

Связка круга	Сила резания и ее составляющие, Н				$Q_{уд}$, мм ³ /(мин·Н)	$N_{эф}$, кВт	$A_{уд}$, Вт·мин/мм ³	fa
	P_x	P_y	P_z	P				
В1-01	42,5	580,0	120,0	594,0	1,7	1,9	1,950	0,20
В1-13	17,5	430,0	95,0	441,0	2,3	1,4	1,440	0,22
М020-2	47,0	375,0	122,0	397,0	2,6	1,8	1,850	0,33
М1-10	14,0	330,0	98,0	344,0	3,0	1,3	1,330	0,30
В2-01	26,5	320,0	59,0	326,5	3,0	0,6	0,615	0,18
СК6	56,0	290,0	104,0	313,0	3,4	2,3	2,360	0,36
В1-11П	23,0	300,0	70,0	309,0	3,3	1,2	1,230	0,23

На основе результатов исследований можно заключить, что для обеспечения наименьшей силовой нагрузки в зоне шлифования магнитотвердых сплавов необходимо применять круги из алмазов на полимерной связке В1-11П без покрытия (или со стеклопокрытием). Это означает, что для эффективной обработки магнитотвердых сплавов необходимо стремиться к тому, чтобы обеспечить в первую очередь высокую режущую способность кругов, которая обуславливается хорошим выступанием зерен из связки. Одним из вариантов реализации такого требования является использование кругов на гальванических связках и особенно хорошо это реализуется при разрезании.

Исследования по разрезке магнитных сплавов проводили [375] на специальном станке ШАРМ-3 для резки магнитных заготовок блоком инструментов и оборудовании ТВ311 (ФРГ). Алмазно-электрохимическую

разрезку заготовок магнитных сплавов производили на станке 3А640М, а разрезку абразивными кругами на полуавтомате ШАРМ-1. Разрезку заготовок из магнитных сплавов проводили специальным кругом диаметром 200 мм, имеющим корпус повышенной жесткости. В процессе обработки регистрировали статистические характеристики режущей поверхности круга. Результаты измерения статистических характеристик высоты выступления зерна над уровнем связки после разрезки 1000 деталей диаметром 20 мм из сплава ЮН15ДК25БА кругом на гальванической связке Э1 и круга на связке М1-05 представлены в табл. 5.18. Видно, что высота выступления зерен над уровнем связки у кругов с гальваническим закреплением зерен в 2 раза больше чем у кругов, полученных по технологии прессования. Кроме того, вероятность их участия в работе также в 2 раза больше, чем у круга, полученного по традиционной технологии. На рабочей поверхности круга отсутствуют выступы гребешков связки, и нет зерен неблагоприятно ориентированных к поверхности резания. Учитывая более высокую прочность зерен из кубического нитрида бора и большее фактическое количество зерен участвующих в резании, а также более благоприятное, с точки зрения обеспечения резания расположение их по глубине рабочего слоя (статистическая модель – закон Пуассона), приходим к выводу, что круги на гальванической связке обладают более высокими потенциальными возможностями, чем круги, полученные прессованием. Последние быстро теряют свою режущую способность, так как у них работает только часть благоприятно ориентированных зерен [117].

Таблица 5.18. Сравнение статистических характеристик высоты выступления зерна над уровнем связки круга [375]

Характеристика круга	Статистические характеристики высоты выступления зерна						
	ω	h	h_{mod}	a_2	S	A	E
1А1R 200×2×75–ЛКВ 160/125–Э1	0,6	36	30	2,6	9,9	1,6	3,6
1А1R 200×2×32–АС6 160/125–М1-05–100	0,3	18	14,2	2,8	12	1,2	0,7

где ω – относительная частота; h – высота выступления зерна над уровнем связки, мкм; h_{mod} – высота выступления зерна в модальном интервале, мкм; a_2 – математическое ожидание; S – среднеквадратическое отклонение; A – асимметрия; E – эксцесс

Обеспечение хорошего выступления зерен позволяет значительно улучшить экономические показатели процесса резки магнитов. Результаты сравнительных испытаний по эффективности процесса и качеству поверхности при осуществлении резки магнитных сплавов с использованием различных технологий обработки представлены в табл. 5.19.

Таблица 5.19. Условия обработки и показатели технико-экономической эффективности при осуществлении разрезки магнитных сплавов [375]

Технологии обработки	Режимы		Расход СОТС, л/мин	Торцевое (радиальное) биение шпинделя, мкм	Производительность, мм ³ /мин	Износ круга, мг/г
	$v_{кр}$, м/с	$S_{пр}$, мм/мин				
Разрезка кругом из электрокорунда (200×1×32 – 14А17НСТВ)	30	30	10	20	1700	1000
Алмазно-электрохимическая разрезка	20	5–15	10	20	850	1,0
Разрезка кругом из КНБ (с гальваническим закреплением зерен)	60	60	100	2–5	3800	0,001

Таблица 5.20. Требования к точности обработки и качество обработанной поверхности

Метод обработки	Требования к точности		Шероховатость, Ra , мкм	Дефекты на поверхности реза, % :		
	//	⊥		Сколы	Прижоги	Микротрещины
Разрезка кругом из электрокорунда (200х1х32–14А17НСТВ)	0,2	0,2	1,25	21	60	21
Алмазно-электрохимическая разрезка	0,15	0,15	1,25	–	–	10
Разрезка кругом из КНБ (с гальваническим закреплением зерен)	0,05	0,05	0,63	–	–	–

Экспериментально установлено, что использование кругов с гальваническим закреплением зерен позволяет увеличить производительность бездефектной обработки более чем в 4 раза, в два раза уменьшить припуск на обработку (с 4 до 2 мм) и увеличить коэффициент использования материала от 0,77 до 0,90. При этом, расход кубического нитрида бора снижается в 1000 раз и составляет менее 1 мкм на тысячу резов. На порядок повысилась точность обработки (табл. 5.20), что позволило исключить

необходимость шлифования по торцу. За счет снижения припуска удалось вместо четырёх деталей при разрезке обработать дополнительно пятую деталь. Содержание абразива в шламе составило менее 1 %, что дало возможность использовать его в качестве сырья при плавке. Стало возможным осуществлять сборку магнитных головок непосредственно после порезки.

Важным преимуществом абразивной разрезки заготовок из магнитных сплавов, при использовании кругов на гальванической связке по сравнению с использованием электрофизических методов обработки является то, что нет ограничений для увеличения скорости вращения круга и нет необходимости в использовании агрессивных сред, вызывающих коррозию оборудования. При соответствующей модернизации шпиндельного узла отечественное оборудование можно эффективно использовать для осуществления бездефектной обработки магнитных сплавов. Укажем, что сравнительные испытания на оборудовании ФРГ, где разрезали вращающуюся магнитную заготовку (скорость вращения круга 140 м/сек, скорость вращения детали 2000 об/мин, подача от 10 до 143 мм/мин) показали, что на всех режимах имели место сколы материала независимо от скорости резания.

Кроме основных показателей дефектности, таких как сколы, прижоги и микротрещины, важно учитывать также и формирование соответствующей шероховатости обработанной поверхности магнитов. Выявлено, что снижение скорости круга с 30 до 15 м/с мало влияет на шероховатость обработанной поверхности. Необходимо учитывать также, что шлифование магнитов кругами на металлических связках приводит к повышению шероховатости % в 1,4—1,8 раза в сравнении с кругами на полимерных связках. Поскольку поверхности магнитных изделий во многих случаях испытывают несущие нагрузки, представляет интерес выявление связи параметров шероховатости Ra , R_{max} , S_m , t_{10} , t_{20} , t_{30} . Обработка экспериментальных данных показала, что связь этих параметров с основным параметром Ra может быть выражена в виде регрессионных зависимостей и, контролируя Ra , можно определить комплекс микрогеометрических параметров обработанной поверхности магнитов.

Так, для сплавов типа ЮНДК в диапазонах значений $Ra = 0,1-1,0$ мкм:

$$S_m = 30,0 + 70,6 Ra.$$

В диапазоне значений $Ra = 0,1-0,3$ мкм:

$$R_{max} = 0,4 + 5,2 Ra.$$

В диапазоне значений $Ra = 0,1-0,6$ мкм:

$$t_{10} = 2 + 6 Ra; t_{20} = 8 + 3 Ra; t_{30} = 19 + 9 Ra.$$

Анализ последних зависимостей указывает на то, что для повышения опорной поверхности не всегда следует стремиться к обеспечению мини-

мальной шероховатости, если это не оговорено особыми требованиями к поверхности магнитов.

Результаты наших исследований показали также, что для обработки магнитотвердых сплавов типа ЮНДК, а также других известных хрупких в обработке материалов характерны такие показатели :

Обрабатываемый материал	$A_{уд}$, Вт·мин/мм ³	fa
Магнитные сплавы типа ЮНДК	1,03–2,25	0,18–0,33
Твердые сплавы	0,84–1,01	0,30–0,37
Оксидно-карбидная керамика	0,55–0,76	0,23–0,32

Как видим, наибольшая удельная работа наблюдается при шлифовании магнитных сплавов типа ЮНДК. Для твердых сплавов наблюдается некоторое соприкосновение областей, поэтому было бы интересным выявить возможность использования общих подходов, изложенных выше, и для резки твердых сплавов. Кроме того, как и на твердых сплавах наблюдается то, что с ростом скорости вращения круга усилие резания несколько снижается, а коэффициент fa уменьшается [372].

Для проведения исследований по резке твердого сплава были изготовлены специальные отрезные круги 1A1R 200×2×75 AC50 250/200 с гальваническим закреплением зерен на корпусе повышенной жесткости. Кроме того, эксперименты показали, что также отпадает необходимость в правке круга, так как отсутствует его засаливание и сохраняется режущая способность (в том числе и закон распределения высоты выступания зерен над уровнем связки) на протяжении всего периода работы круга до полного износа зерен. Результаты сравнительных испытаний при резке образцов из вольфрамо-кобальтового твердого сплава ВК20 приведены в табл. 5.21.

Таблица 5.21. Техничко-экономические показатели резки твердого сплава ВК20

Метод резки	Режимы		Точность, мкм		Производительность, мм ³ /мин	Относит. расход алмазов, мг/г
	$v_{кз}$ м/с	$S_{пр}$ м/мин	//	⊥		
Алмазно-электрохимический	20	5	20	20	200	1,5
Абразивный, кругом из AC50 с гальваническим закреплением зерен)	60	30	5	5	600	0,01

Из табл. 5.22 видно, что и в случае резки твердых сплавов достигается как повышение производительности обработки, так и достижение большей ее точности. Кроме того, использование инструмента на гальва-

нической связке может быть перспективным не только при осуществлении разрезки, но и при шлифовании торцом круга при наличии специального инструмента.

Таким образом, комплекс проведенных исследований позволил выявить следующие основные особенности бездефектной обработки магнитотвердых сплавов инструментами из СТМ [372]:

1. Для обработки магнитотвердых сплавов предпочтительнее применять алмазное шлифование с охлаждением. При этом наиболее эффективны алмазные круги на полимерной связке В1-11П, обеспечивающие минимальные силу резания и шероховатость обработанной поверхности и характеризующиеся наименьшим износом.

2. При шлифовании магнитотвердых сплавов с охлаждением ряд параметров шероховатости коррелирует с параметром Ra , что позволяет оценивать по нему микрогеометрию обработанной поверхности магнитов.

3. Показано, что для эффективной обработки магнитотвердых сплавов необходимо стремиться к тому, чтобы обеспечить в первую очередь высокую режущую способность кругов, которая обуславливается хорошим выступанием зерен из связки. Одним из вариантов реализации такого требования является использование кругов на гальванических связках и в особенности это хорошо реализуется при разрезании.

4. Использование кругов на гальванической связке для размерной бездефектной абразивной обработки магнитотвердых сплавов является более перспективным методом, чем обработка с использованием комбинированные электрофизических методов, так как нет ограничений ни для увеличения скорости вращения круга, ни для увеличения вертикальной подачи без ущерба для качества и производительности.

Г Л А В А 6

ПРОЦЕССЫ ШЛИФОВАНИЯ С ВВЕДЕНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ В ЗОНУ ОБРАБОТКИ ИЛИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА КОНТАКТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

6.1. Необходимость и условия введения дополнительной энергии в зону обработки кругами из СТМ

Необходимость введения дополнительной энергии в зону обработки обусловлена следующим:

- обеспечением достаточного для эффективной обработки выступающих зерен СТМ над уровнем связки;
- изменением свойств поверхностного слоя обрабатываемого изделия:
 - снижением микротвердости поверхностного слоя под напряжением;
 - электрохимическим растворением определенной составляющей обрабатываемого материала (кобальт, никель и др.);
 - снижением коэффициента трения при резании;
 - отсутствием структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемого материала и его наклепом.

Условия эффективного введения дополнительной энергии:

- достаточно большая площадь контакта обрабатываемого материала с кругом (обработка торцом круга – круги форм 12A2, 6A2, 9A3);
- использование электропроводных связей в кругах (металлических или металлополимерных);
- использование схем обработки с небольшой продольной подачей (методы глубинной, врезной и упругой обработки).

Определенный период в конце прошлого столетия считалось, что в мировой практике исследователи отошли от процессов электрообработки, так как это якобы является неперспективным. Но такие представления в значительной степени являются ошибочными. Связаны они с тем, что действительно, традиционные быстрорежущие стали и твердые сплавы, преимущественно подвергаются обработке без введения дополнительной энергии. А вот новые инструментальные и наплавочные материалы, которые, как правило, содержат карбиды металлов $IVb-Vb$ подгрупп являются труднообрабатываемыми, и во многих случаях подвергаются именно электрообработке.

Укажем, что значения электроэрозионного воздействия на возобновление режущей способности кругов на металлической связке сейчас доста-

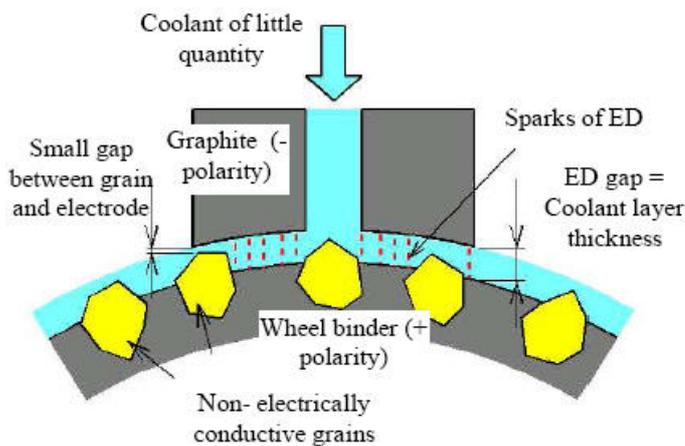


Рис 6.1. Схема правки режущей поверхности круга на металлической связке с помощью графитового электрода с центральным отверстием [376]

точно широко обсуждается исследователями и об этом свидетельствуют материалы Международной конференции по алмазам в Риме. Так, в работе [376] приведены данные по электродиспергивной правке алмазных кругов формы 1A1 (SD600Q100M) на металлической связке с помощью графитового электрода (на электроде был «минус» от источника тока) с центральным отверстием, через которое подавалась специальная жидкость (*deionised water*, $\rho = 83 \text{ Ом} \cdot \text{см}^3$) с расходом 0,2 л/мин (рис. 6.1). В качестве обрабатываемого материала применяли вольфрамовый твердый сплав. На круг подавался «плюс» от источника тока. При этом напряжение равнялось 60 В, а ток был 4 и 8 А. Исследования показали, что в том случае, когда подается ток на графитовый электрод, то нормальная составляющая усилия шлифования снижается (рис. 6.2), а при отсутствии тока – возрастает. Вместе с тем, именно в периоды включения тока растет износ круга, и, тем самым, происходит возобновление режущей способности рабочего слоя круга. Авторы работы [376] проверили и

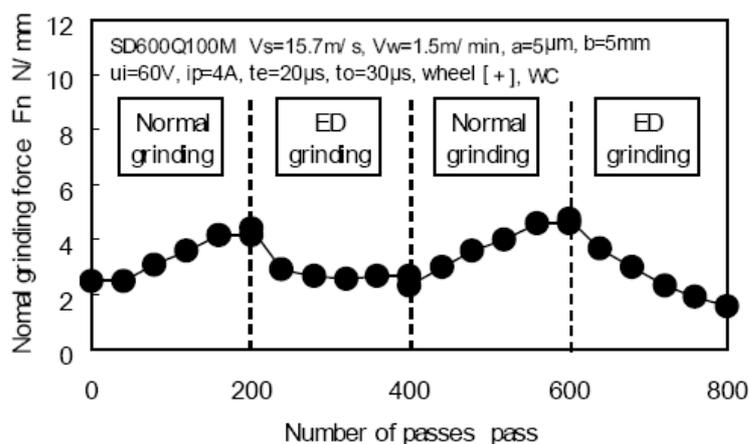


Рис. 6.2. Эффект изменения нормальной составляющей усилия шлифования твердого сплава при обработке без тока и с введением тока на графитовый электрод и использованием водной среды в межэлектродном промежутке [376]

исследователями и об этом свидетельствуют материалы Международной конференции по алмазам в Риме. Так, в работе [376] приведены данные по электродиспергивной правке алмазных кругов формы 1A1 (SD600Q100M) на металлической связке с помощью графитового электрода (на электроде был «минус» от источника тока) с центральным отверстием, через которое подавалась специальная

жидкость (*deionised water*, $\rho = 83 \text{ Ом} \cdot \text{см}^3$) с расходом 0,2 л/мин (рис. 6.1). В качестве обрабатываемого материала применяли вольфрамовый твердый сплав. На круг подавался «плюс» от источника тока. При этом напряжение равнялось 60 В, а ток был 4 и 8 А. Исследования показали, что в том случае, когда подается ток на графитовый электрод, то нормальная составляющая усилия шлифования снижается (рис. 6.2), а при отсутствии тока – возрастает. Вместе с тем, именно в периоды включения тока растет износ круга, и, тем самым, происходит возобновление режущей способности рабочего слоя круга. Авторы работы [376] проверили и

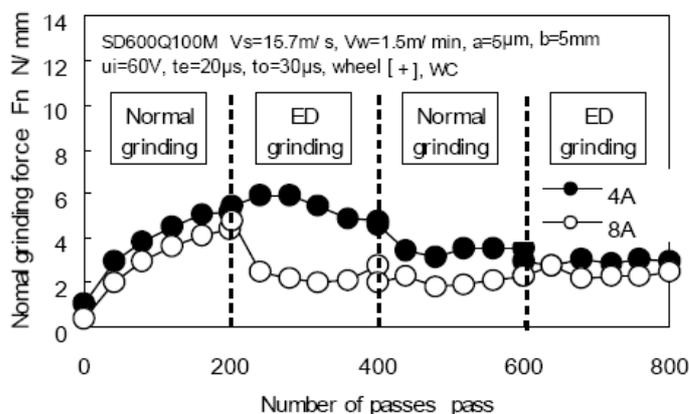


Рис. 6.3. Эффект изменения нормальной составляющей усилия шлифования твердого сплава при обработке без тока и с введением тока на графитовый электрод и применением воздуха под давлением в межэлектродном промежутке [376]

усилия резания (рис. 6.3) в сравнении с использованием водной среды (рис. 6.2). Причем тут более существенную роль играют величины напряжений и растет износ круга (рис. 6.4).

В работе [377] рассмотрены возможности электрохимической правки алмазных кругов на металлической связке. В этом случае правились круги формы 1A1 диаметром 100 мм с относительной концентрацией алмазов (75 %) и с существенным разбросом в зернистости: SD170Q75M, SD600Q75M, SD2000Q75M. Общая схема правки представлена на рис. 6.5. На круг подавался «плюс», на электрод «минус» от источника тока. При этом, в качестве гибкого электрода использовали листовую (толщиной 0,1 мм) фосфористую бронзу.

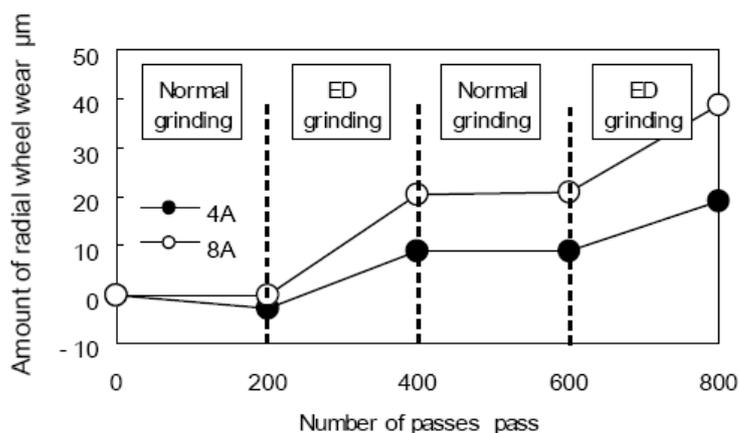


Рис. 6.4. Изменение радиального износа круга в случае ввода электрического тока в зону обработки при принудительном вводе в межэлектродный промежуток воздуха под давлением [376]

другое направление заполнения межэлектродного промежутка – воздухом под определенным давлением, или так называемая концепция «сухой электрической правки» («Dry EDM»). Давление воздуха при этом должно быть не менее чем 0,06 МПа. При использовании воздуха в промежутке возникают определенные отличия в изменении величины нормальной составляющей

В межэлектродный промежуток подавали специальную жидкость на синтетической основе с расходом 1 л/мин, а ее удельное электрическое сопротивление равнялось 10 Ом·м.

Электрохимические условия правки были следующими: напряжение – 60 В, ток 4 и 8 А, время прохождения электрического импу-

льса составляло 2 мкс при двух вариантах периодичности поступления такого импульса в 10 и 100 мкс. Шлифовался вольфрамовый твердый сплав. Выявлено, что повышение продолжительности общего импульса не повышает эффективность правки, поскольку усилие шлифования при этом не снижается (рис. 6.6). Это подтверждают данные и по радиальному износу кругов (рис. 6.7). Вместе с тем, состояние и шероховатость обработанной поверхности изделий из твердых сплавов улучшаются (меньше высотные

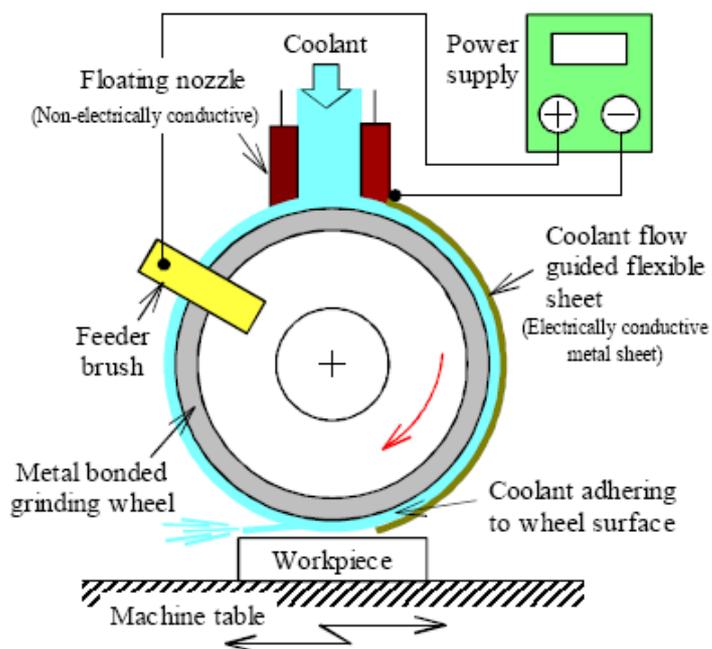


Рис. 6.5. Схема электрохимической правки с дополнительной гибкой (из листового металла) электропроводящей направляющей для жидкости [377]

показатели шероховатости поверхности) именно при использовании электрохимической правки с соотношением продолжительности электрического импульса к общему, составляющему 0,2 мкс. Именно при таких условиях достигается необходимое выступание зерен и стабильная режущая способность шлифовального круга [377].

В последнее время в научных разработках и рекламных материалах появляются публикации по электроэрозионной обработке и ее влиянию на обрабатываемые материалы. Так, в рекламном издании ОАО «Мотор Січ» (г. Запорожье) [378] приведены данные по внедрению технологических процессов черновой и получистовой обработки внешних и внутренних поверхностей деталей типа тел вращения методом электроэрозионной обработки короткой дугой. При этом повышена производительность обработки деталей из жаропрочных и титановых сплавов в сравнении с токарной обработкой в 2–5 раз, а сама производительность составила 0,5–2,5 см³/с. Шероховатость обрабатываемой поверхности составила 40–160 мкм.

показатели шероховатости поверхности) именно при использовании электрохимической правки с соотношением продолжительности электрического импульса к общему, составляющему 0,2 мкс. Именно при таких условиях достигается необходимое выступание зерен и стабильная режущая способность шлифовального круга [377].

В последнее время в научных разработках и рекламных материалах появляются публикации по электроэрозионной обработке и ее влиянию на обрабатываемые материалы. Так, в рекламном

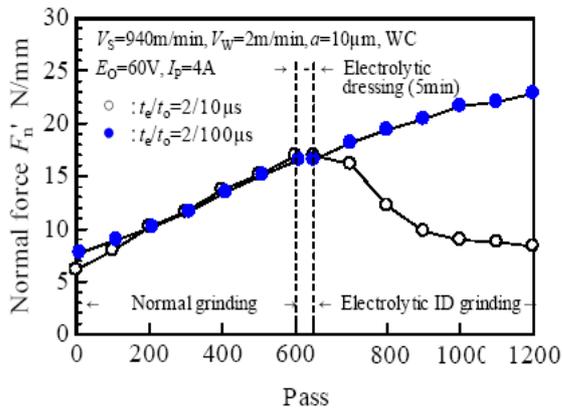


Рис. 6.6. Изменение нормальной составляющей усилия шлифования для разных условий правки (SD600) [377]

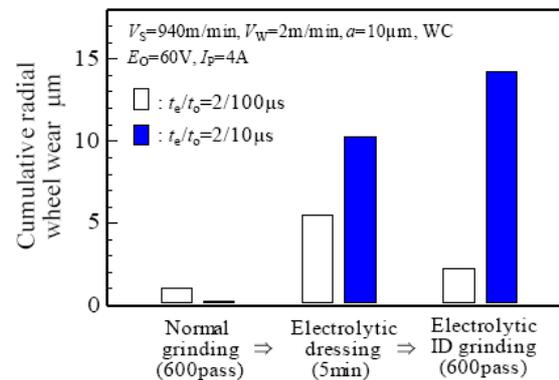


Рис. 6.7. Радиальный износ круга при разных условиях шлифования и правки круга (SD600) [377]

В качестве электродов использовали – медь, чугун или сталь СтЗ [378].

Особенности электроразрядной правки (EDT) рассмотрены в работе [379] применительно к условиям двустороннего шлифования (DDG) алмазными кругами и кругами из cBN на металлической связке. При этом, в отличие от традиционной (conventional) электроразрядной обработки в межэлектродном промежутке находится не жидкость (вода или масло), а воз-

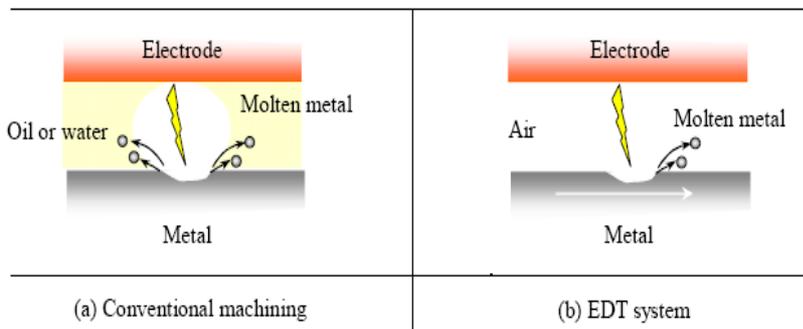


Рис. 6.8. Особенности электроэрозионного воздействия при EDT [379]

ботанную поверхность.

Наряду с указанным выше методом в литературе также известен метод Electrolytic in-process dressing (ELID), базирующийся на достижении эффекта электрохимического растворения металлического связующего (рис. 6.10) [380]. Наилучше он проявил себя при шлифовании хрупких материалов, например керамик на основе нитрида кремния. ELID-system состоит из шлифовального круга на металлической (на основе железа) связ-

дух, что изменяет влияние действия разряда (рис. 6.8). Как следствие, в условиях DDG продолжительность правки шлифовальных кругов значительно снижается (рис. 6.9), и поэтому снижается негативное воздействие электрических разрядов на обра-

ке, отдельного медного электрода, источника тока и электролита с высоким значением рН. Электролитическое растворение позволяет достичь разных условий выступания зерен, что, в свою очередь, позволяет получить возможность обработки керамики в хрупком или пластическом режиме (рис. 6.11). Конференция по промышленным алмазам в Риме (2007 г.) показала также, что начинает развиваться еще одно направление электро-разрядных технологий, связанное с применением поликристаллических сверхтвердых материалов в качестве электродов. Это позволяет достичь высокой размерной точности при обработке, значительно повысить долговечность электродов, а также существенно повысить их износостойкость [381, 382].

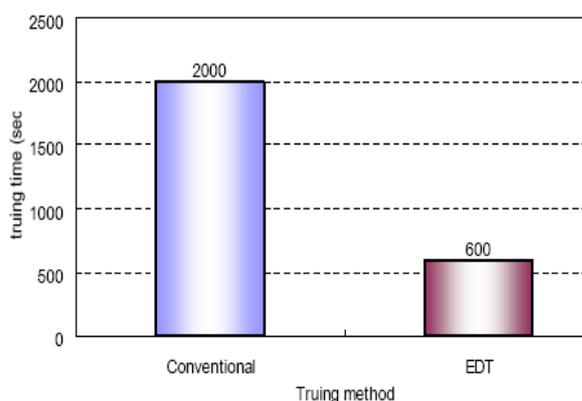


Рис. 6.9. Показатели продолжительности правки круга из кубического нитрида бора BN140-B (305D-75W) при разных условиях такой электроправки [379]

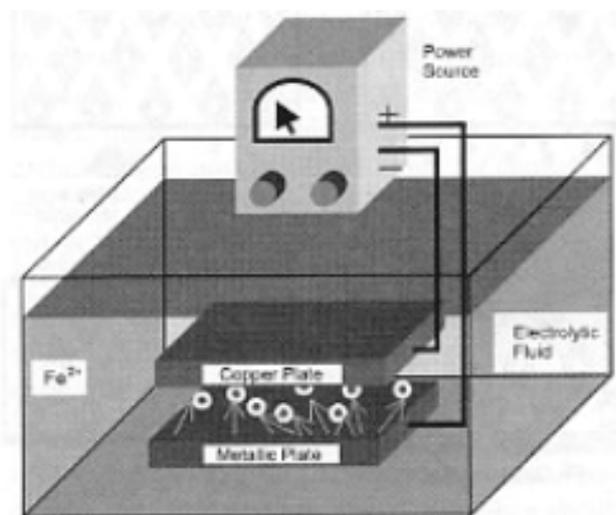
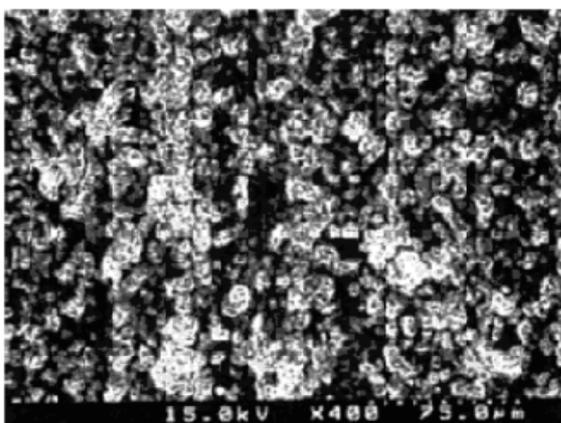
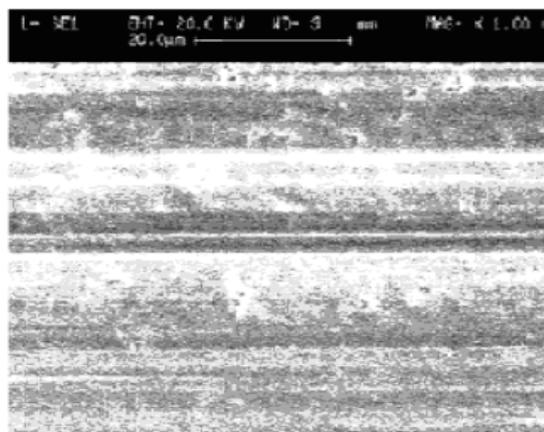


Рис. 6.10. Принципиальная схема процесса ELID-grinding [380]



а



б

Рис. 6.11. Формирование обрабатываемой поверхности керамики из нитрида кремния при хрупкой (а) и пластической (б) стадии шлифования [380]

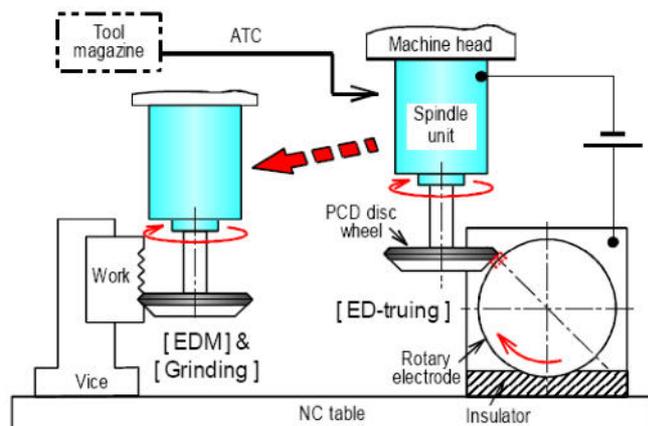


Рис. 6.12. Общая схема приспособления для обработки с РКД-электродом [381]

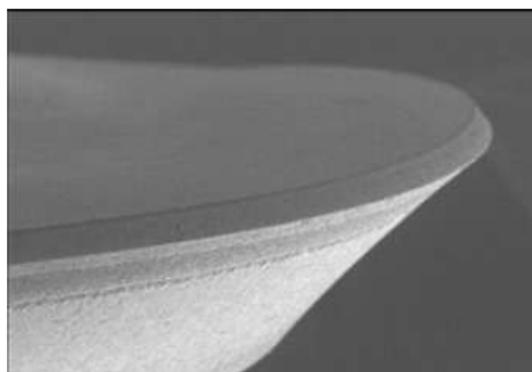


Рис. 6.13. Дисктовой РКД-электрод с V-формой, сформованный с помощью электропротравки [381]

Например, в работе [381] приведена возможность использования поликристаллических электродов для формирования на твердосплавной пластине резбовых канавок (рис. 6.12). Для этого использовали РКД дисковый электрод фирмы *Element Six* – СТН-0,25 с алмазной зернистостью в структуре – 25 мкм. Диаметр дискового электрода составил – 22 мм (рис. 6.13). Режимы электрообработки: напряжение – 60 В, ток – 1 А, частота вращения диска – 1500 об/мин. Сравнение износостойкости РКД-электрода и стандартного Cu–W-электрода показало значительное преимущество первого, как по форме канавки, так и по сохранению радиуса округления вершины электрода. Укажем, что при этом РКД-электрод подключался к полярности «минус» источника тока AQ35L фирмы Sodisk.

В работе [382] (таблица) приведены сравнительные данные по теплофизическим свойствам новых электродных поликристаллических материалов и показано их сравнение с медным электродом. Из таблицы видно, что хотя по определенным показателям новые РКД-электроды и несколько уступают медному электроду, но в целом являются вполне приемлемыми для использования в процессах обработки.

Thermophysical properties		Density (Kg/m ³)	Specific heat (J/Kg·K)	Thermal conductivity (W/m·K)	Thermal diffusivity (m ² /s)
	Copper	9000	385	400	0.12×10 ⁻³
СТВ010	4080	468	459	0.24×10 ⁻³	
СТН025	3950	473	501	0.27×10 ⁻³	
CDE	3520	510	550	0.31×10 ⁻³	

В связи с приведенным выше обратим также внимание и на такой важный аспект, как собственно эффективная обработка поликристаллических материалов, поскольку сформировать необходимые показатели обрабатываемой поверхности таких сверхтруднообрабатываемых материалов является чрезвычайно сложным и в значительной степени тут как раз и применяют процессы электрофизической обработки.

Что представляют собой поликристаллические алмазы? Это композит, состоящий из алмазного микропорошка, спеченного при высоких давлениях и температурах [383]. Как правило, такой композит имеет и определенное связующее, преимущественно в виде кобальта, что придает ему определенную электропроводность. Это в свое время и определило наличие разработок по электрохимической или электроискровой обработке таких композитов. Так, в работе [384] указаны сложности инструментальной обработки резанием композитных материалов. Например, резцы из быстрорежущей стали при обработке композитов быстро изнашиваются, поверхность обрабатываемого изделия образуется ободранной. Использование карбидного и алмазного инструмента приводит к выделению вредных пыли и газов. Автор [384] предлагает использовать метод электрохимической или искровой обработки композитов. При этом медный анод имеет форму пластины. Медный катод играет роль режущего инструмента, причем форма его наконечника определяла профиль слоя, снимаемого за один проход. Эффективность процесса обработки исследовалась на волокнистых эпоксидных композитах из кевлара и стекла.

В работе [385] предложен несколько измененный описанный выше подход: процесс алмазной электрохимической обработки легированной инструментальной стали, алюминиевого сплава и углеродистой стали алмазным электродом–инструментом (ЭИ) двух типов. ЭИ выполнен из алмаза с углом заточки вершины 120° и алмаза, у которого вершина угла является затупленной с образованием плоской площадки. Подача напряжения в зону обработки осуществлялась через катод – медную пластину. В качестве электролита использовали водный раствор натриевых солей азотной и азотистой кислот в соотношении 1:2. Катод, стальной диск и алмазный ЭИ в совокупности образуют своеобразный комплексный ЭИ. Углеродистая сталь равномерно растворяется при подаче электролита пропорционально приложенной напряжению, а наличие твердых фаз в матрице алюминиевого сплава та инструментальной стали приводит к неравномерности травления и выпадения твердых частичек при растравливании. Выявлено, что за счет разупрочнения материала в зоне обработки при выпадении частичек твердой фазы силы резания снижаются.

Указанный эффект важен в значительной степени для обработки алмазных композитов, что мы и покажем далее, однако прежде обратим вни-

мание на важность учета особенностей взаимодействия алмазов с железом [382]. Автором работы [386] показано, что атомизация углерода алмаза в среде металлов (триады железа) происходит при температурах 1300–1600 К. считается, что 600 К – допустимая температура прогрева вглубь объемов алмаза и металла, тогда после преобразований можно получить уравнение, описывающее прирост температуры в зоне контакта алмаза и железа и от чего он зависит: $\Delta\Theta = 0,21 \cdot 10^{-3} \mu \cdot p \cdot h \cdot l \cdot v_k$, где μ – коэффициент трения в зоне обработки, p – давление в зоне контакта, h – ширина зоны контакта, l – длина зоны контакта, v_k – скорость перемещения в зоне контакта. Тем самым, возможно регулировать температуру в зоне контакта и изменять условия взаимодействия железа с алмазом, регулируя скорость обработки алмаза. В качестве инструмента для обработки алмаза автор [386] рекомендует стали 20Х, ЭИ712 или ЭИ696.

Вопросы особенностей обработки поликристаллических алмазов (ПКА) с учетом характеристик алмазных кругов и режимов шлифования рассматривались в работе [387]. Шлифование происходило с поддержанием постоянного усилия прижима. Круг 6А2 125×20×4 D46М75 через каждые 15 с подвергался правке для возобновления режущей способности одновременно со шлифованием на протяжении 10 с. Выявлены принципиальные выводы, к которым нужно стремиться. Во-первых, для обеспечения большего съема из ПКА смазочно-охлаждающая жидкость должна иметь незначительные смазочные свойства. Во-вторых, необходимо стремиться к обеспечению как можно большей величине тангенциальной составляющей усилия резания. Для этого необходимо повышать концентрацию алмазов в рабочем слое круга, зернистость алмазов и внешний диаметр круга. А вот такие показатели, как скорость вращения круга и концентрацию СОТС

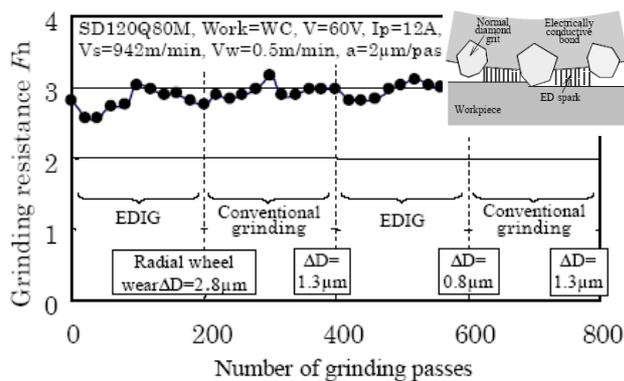


Рис. 6.14. Изменение нормальной составляющей усилия шлифования ED-интегрированном шлифовании алмазными кругами с неэлектропроводными алмазами [389]

необходимо снижать. При этом, для уменьшения сколов необходимо повышать время выхаживания без правки круга.

Вместе с тем, авторами работы [388] сделан совсем другой вывод по использованию концентрации алмазов в рабочем слое кругов для обработки поликристаллов. Они считают, что необходимо стремиться к меньшей концентрации алмазов, например уровня 10–15 %. То есть в [387] и [388],

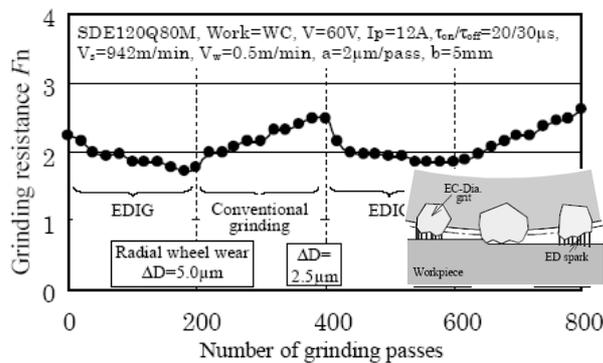


Рис. 6.15. Изменение нормальной составляющей усилия шлифования ED-интегрированном шлифовании алмазными кругами с электропроводными алмазами [389]

мазных зерен. Как следствие это снижает нормальную составляющую усилия шлифования при ED-интегрированном шлифовании (рис. 6.14) в сравнении с усилием шлифования при ED-интегрированном шлифовании с неэлектропроводными алмазами (рис. 6.15). Вместе с тем, авторы работы [389] обращают внимание на то, что при шлифовании электропроводными алмазами на обрабатываемой поверхности могут появляться определенные кратерообразные образования от непосредственного электроконтактного

имеются определенные несоответствия, которые требуют дополнительного исследования.

Обратим внимание также и на работу [389], в которой изложены особенности электрохимического разрядного интегрированного шлифования алмазными кругами на металлической связке с использованием электропроводных алмазных зерен. При этом, показано, что если на зернах будет положительный полюс от источника тока, то наблюдается меньший износ алмазных зерен.

взаимодействия алмаза и обрабатываемого материала (рис. 6.16). Укажем, что изложенные выше явления мало изучены и требуют дальнейшего исследования.

Таким образом, анализ приведенных выше литературных источников показывает, что имеются определенные исследования в направлении использования дополнительного электрического воздействия на процесс шлифования кругами из СТМ и такие работы являются актуальными. При этом для обработки плоских поверхностей наибольшее распространение в промышленности получили следующие комбинированные методы обработки с примене-

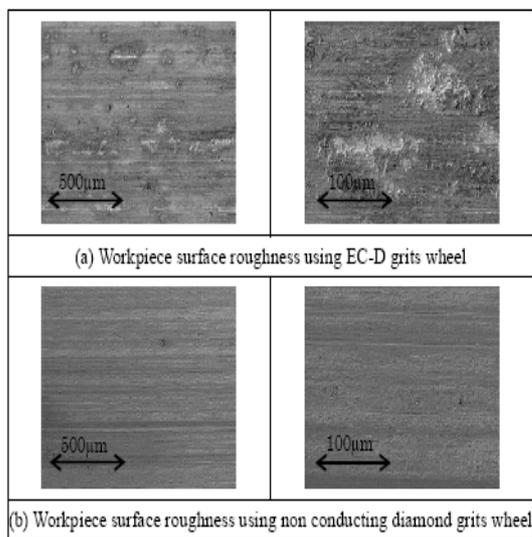


Рис. 6.16. Состояние обрабатываемой поверхности при ED-интегрированном шлифовании алмазными кругами с электропроводными алмазами (а) и неэлектропроводными (б) [389]

нием шлифовальных инструментов из СТМ:

- электрохимическое шлифование (ЭХШ);
- электроэрозионное шлифование (ЭЭШ).

Сущность *электрохимического шлифования* кругами из СТМ заключается в сочетании электрохимического растворения обрабатываемого материала с механическим воздействием на него зерен сверхтвердых материалов. Алмазные зерна-диэлектрики обеспечивают зазор между кругом и изделием 0,015–0,025 мм, а низкое напряжение источника тока (5–10 В) способствует протеканию электрохимических процессов. В качестве технологической среды используют водные составы насыщенных электролитов (NaNO_3 (100 г/л) + NaCl (50–100 г/л) и др.). Практика показала, что электрохимические процессы эффективны при невысокой производительности съема материала алмазными зернами (до 100 мм³/мин). С ее повышением резко возрастает интенсивность электроконтактных процессов, что вызвано наличием большого количества стружки в зазоре между обрабатываемой поверхностью и поверхностью круга. Эффективность электрохимического растворения при этом резко уменьшается и доля электрохимического тока в общем токе снижается до 5 %. Кроме того, существенным недостатком электрохимического шлифования является проблема утилизации насыщенных электролитов.

Поскольку в реальных процессах шлифования материалов кругами из СТМ производительность обработки находится в пределах от 500 до 2000 мм³/мин, то наибольшее распространение в производстве получила такая разновидность электрохимического шлифования, как электроалмазное шлифование или *электрошлифование* (ЭШ). Сущность последнего состоит в том, что электрохимические процессы рассматриваются не как средство для съема материала, а исключительно как процессы, регулирующие режущую способность шлифовальных кругов из СТМ, которая, в свою очередь, обеспечивается электроконтактными процессами замыкания зазора стружкой. В этом случае в качестве электролитов можно использовать ненасыщенные составы: NaNO_3 (10–30 г/л) + NaNO_2 (2 г/л) с добавкой других солей (1–2 г/л). Электрошлифование имеет следующие преимущества по сравнению с обычным шлифованием кругами из СТМ:

- производительность обработки повышается в 1,5–2,0 раза;
- износостойкость алмазных кругов возрастает в 2–4 раза;
- отсутствуют негативные изменения в структуре поверхностного слоя обрабатываемого материала;
- можно вести высокопроизводительную обработку материалов.

Источником технологического тока в описанных выше процессах служат выпрямители моделей ВУ, ВСА, ВАКГ, ВАКР и др. К шпинделю шлифовального станка через щеткодержатели и токосъемное кольцо подводят отрицательный полюс от источника тока, а к станине — положи-

тельный. Для указанных процессов могут быть использованы как специальные станки мод. 3Э731, 3Е624, так и универсальные с модернизацией (изоляция головки станка со шлифовальным шпинделем от станины с помощью втулок, шайб и пластин из электроизоляционного материала).

Сущность *электроэрозионного шлифования* кругами из СТМ заключается в том, что в зоне шлифования в межэлектродном промежутке возбуждаются электроразряды от источника импульсного технологического тока. В качестве таких источников используют генераторы типов ШГИ, ГКИ, ГТИ, которые вызывают в рабочей зоне разряды частотой в несколько кГц, продолжительностью от единицы до нескольких десятков микросекунд при амплитудном значении напряжения от 60 до 150 В и обеспечивают прямой пробой промежутка между кругом и обрабатываемым изделием. Эти генераторы в большей степени предназначены для чисто электроэрозионной обработки.

Специально для электроэрозионного шлифования созданы низкочастотные генераторы типа ИТТ с частотой 50 Гц и амплитудным напряжением 5–10 В. Характерным для процессов электроэрозионного шлифования является то, что для воздействия разряда на связку круга подключают положительный полюс источника тока к кругу, а отрицательный — к обрабатываемому изделию. Межэлектродный промежуток в этом случае может заполняться любой технологической жидкостью, преимущественно на водной основе. Основная роль электроразрядов заключается в поддержании высокой режущей способности кругов. Преимущества ЭЭШ по сравнению с обычным шлифованием кругами из СТМ:

- повышение (от 3 до 7 раз) производительности обработки;
- можно работать кругами на любых электропроводных связках;
- меньшие затраты мощности на процесс обработки.

Тем не менее, ЭЭШ имеет значительные ограничения областей обработки, что вызвано ощутимым повышением износа кругов из СТМ. Так, хотя при шлифовании быстрорежущей стали кругами из КНБ производительность и увеличивается в 2 раза, однако до 4 раз повышается износ круга, а себестоимость обработки почти в 3 раза выше, чем при упругом ЭШ. Вторым недостатком ЭЭШ является то, что при воздействии электрических разрядов на обрабатываемую поверхность таких материалов, как безвольфрамовые твердые сплавы, магнитотвердые сплавы, оксидно-карбидная керамика, могут возникать трещины и сколы. Еще один недостаток ЭЭШ — после этого процесса шероховатость обработанной поверхности выше, чем при обычном шлифовании кругами из СТМ или при электрошлифовании [10].

6.2. Электрохимическое шлифование кругами из СТМ

Показатель анодного растворения – выход по току (η) является важным фактором, определяющим плотность электрохимического тока и эффективность электрохимического воздействия, поэтому в работе [71] были определены факторы, влияющие на него. Первым важным фактором является температура электролита, влияние которой на выход по току является неоднозначным. Одни исследователи отмечают в растворах нитрита натрия повышение выхода по току сталей с ростом температуры [265], другие его снижение [390]. В работе [71] изучен анодный выход по току стали Р6М5 в диапазоне температур 293–348 К. Установлено, что повышение температуры электролита до 323 К приводит к достаточно ошутимому спаду выхода. Так, повышение температуры всего лишь на 20° с 293 до 313 К снижает выход по току в 1,6 раза. Дальнейший рост температуры уже меньше влияет на анодный процесс, так как он значительно замедляется. Тем самым, исследования указывают на то, что для обеспечения большего выхода по току необходимо избегать нагрева электролита и поддерживать его температуру в пределах 293–303 К.

Поскольку электрохимическое шлифование проводится кругами из СТМ на разных металлических связках, то определенный интерес вызывает исследование их влияния, как материала катода, на процесс анодного растворения. Исследования были проведены [71] при разных плотностях тока, составах электролитов и материалах катодов. В качестве последних, использовали наиболее характерные металлические связки: М2-01, М2-12Э и М013Э. Результаты, приведенные в табл. 6.1 показывают, что использование катодов-связок приводит к снижению анодного выхода по току в сравнении с медным катодом приблизительно на 25 %. В целом, исследования, проведенные при плотности тока $1,5 \cdot 10^5$ А/м², показали, что выход по току стали Р6М5 при использовании в качестве катодов разных связок является практически одинаковым и составляет 10–11%. Кроме того, исследовано анодное поведение стали Р6М5 при использовании в качестве катода режущего слоя круга с характеристикой КР 100/80–М2-12Э–100 (табл. 6.1), что еще ближе к реальному процессу шлифования.

Установлено также (табл. 6.1), что в сравнении с медным катодом, выход по току снижается на 36 %, а в сравнении с катодом из связки М2-12Э еще на 11–16 %, что объясняется повышением фактической плотности тока вследствие снижения активной площади катода.

Следующим фактором, влияющим на анодное растворение, является плотность тока на аноде. Поскольку для реального процесса ЭХШ характерны большие плотности тока (до $2 \cdot 10^5$ А/м²), то исследования проводили в диапазоне $(0,2 - 2,0) \cdot 10^5$ А/м².

Таблица 6.1. Влияние материала катода на анодный выход по току стали Р6М5 (в сравнительных коэффициентах)

Электролит	Плотность тока, А/м ²	Материалы катодов					
		Cu	Fe	M2-12Э	КР 100/80–M2-12Э–100	M2-01	МО13Э
NaNO ₃ 5 % NaNO ₂ 0,5 %	1500	1,00	0,90	0,75	–	0,78	0,72
NaNO ₃ 5 % NaNO ₂ 0,5 %	1750	1,00	–	0,76	0,64	–	–
NaNO ₃ 5 % NaNO ₂ 0,5 % Na ₃ PO ₄ 3 %	1300	1,00	–	0,77	0,64	0,80	0,74
NaNO ₃ 5 % NaNO ₂ 0,5 % Na ₂ SO ₄ 3 %	1500	1,00	–	0,80	–	–	–

Установлено, что повышение ее свыше $0,5 \cdot 10^5$ А/м² приводит к снижению выхода по току [71] и связано с тем, что с ростом скорости анодного растворения и, связанного с ним насыщения прианодного слоя продуктами растворения, затрудняется протекание диффузионной стадии процесса, повышается анодный потенциал и возрастает роль побочных реакций, вызывающих снижение выхода по току. При $j_a < 0,5 \cdot 10^5$ А/м² анодный выход тоже снижается, поскольку в данном случае режим активного растворения для нитритно-нитратных электролитов еще не установился [390]. Из

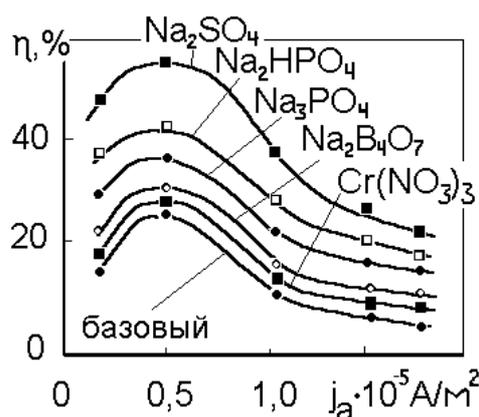


Рис. 6.17. Зависимость выхода по току стали Р6М5 от плотности анодного тока при использовании базового электролита NaNO₃ – 50 г/л, NaNO₂ – 5 г/л и с добавками в него солей Na₂SO₄, Na₃PO₄, Na₂HPO₄, Na₂B₄O₇ – концентрацией 30 г/л и Cr(NO₃)₃ – 5 г/л

рис. 6.17 видно, что на выход по току в определенной степени влияет также состав электролита, при этом, наиболее эффективными добавками в базовый состав (NaNO₃ – 5 %, NaNO₂ – 0,5 %) являются соли NaCl и Na₂SO₄, которые повышают выход более чем в 2 раза в сравнении с базовым электролитом. Несколько меньше влияют добавки солей Na₂HPO₄ и Na₃PO₄. Добавки глицирина и солей Na₂CO₃, NaNO₃, Na₂B₄O₇ практически на него не влияют.

Таким образом, анализ приведенных выше экспериментальных данных показывает, что примени-

тельно к условиям электрохимического шлифования кругами из СТМ, анодная поляризация не приводит к ощутимым результатам в электрохимическом растворении. Так, например, для обеспечения большего выхода по току необходимо избегать нагрева электролита и удерживать его в пределах 293–303 К, а также избегать больших значений плотностей тока, что сделать в реальных условиях электрохимического шлифования кругами из СТМ крайне сложно. Использование связки круга в качестве катода снижает, в сравнении с медным катодом, анодный выход в 1,6 раза, повышение температуры электролита в процессе ЭХШ всего на 20 градусов также снижает выход в 1,6 раза, а использование некоррозионноактивных электролитов занижает выход еще у 1,3–2,7 раза. А это означает, что процессы ЭХШ кругами из СТМ изначально проигрывают, даже без учета других факторов, процессам размерной электрохимической обработки по анодному выходу в 3,3...6,9 раза. Поэтому, если анодный выход по току при ЭХО принять за 100 %, то при ЭХШ кругами из СТМ он будет равным при самых благоприятных условиях 14,5–30 %. А если учитывать при реальном процессе электрохимического шлифования наличия в МЭП электроэрозийных разрядов и интенсивного газообразования, то следует признать, что даже в лучшем случае доля выхода по току при ЭХШ кругами из СТМ не будет превышать нескольких процентов. Этот вывод подтверждается и данными работы [266].

По разным источникам электропроводность электролитов составляет в $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ – 0,05–0,10 [391], 0,12–0,18 [392]. Обратим внимание на то, что электропроводность электрохимической ячейки (χ) включает в себя электропроводность электролита, анодных и катодных пленок. Поскольку в литературе отсутствуют данные об удельной электропроводности ячейки, а ее теоретический расчет достаточно трудоемок [393], то ее определяли [62] экспериментально по напряжению, приложенному к ячейке, и технологическому току с учетом площади электродов и величины межэлектродного промежутка. Установлено, что на электропроводность ячейки влияет материал катода. Так, для разных катодов-связок кругов из СТМ получены такие данные [62]:

Связка круга	М2-01	М2-12Э	МО13Э
χ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	1,250	1,116	1,220

Небольшое влияние оказывает также температура электролита, причем с ее повышением электропроводность ячейки несколько увеличивается [62]:

Температура электролита, К	293	313	333	343
χ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	1,116	1,186	1,165	1,129

Кроме указанных выше факторов, на χ электрохимической ячейки существенно влияет состав электролита. Ниже приведены данные по χ для катода-связки М2-12Э+КР 100/80–100 % для базового (NaNO_3 – 5 %, NaNO_2 – 0,5 %) состава ($1,116 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$) и с добавками (3 %) в его состав солей: глицерина (1,048), Na_3PO_4 (1,027), NaNO_3 (1,017), Na_2HPO_4 (0,910), $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ – 0,5% (0,864), Na_2CO_3 – (0,859), Na_2SO_4 (0,837), $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (0,823) [62].

Влияние состава электролита на выход по току и плотность анодной пленки – приведен в табл. 6.2, где показано влияние разных добавок солей в базовый состав электролита (NaNO_3 – 5 %, NaNO_2 – 0,5 %) [71]. Выявлено, что наиболее эффективными добавками в базовый состав являются соли Na_2SO_4 и Na_2HPO_4 , которые повышают выход более чем в 2 раза в сравнении с базовым электролитом. Несколько меньше влияет добавка соли Na_3PO_4 . Добавки глицерина и солей Na_2CO_3 , NaNO_3 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ практически на него не влияют. На основе полученных данных добавки солей, повышающих выход стали Р6М5 по току, располагаются в следующем ряду [71]:

Глицерин – Na_2CO_3 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ – NaNO_3 – Na_3PO_4 – Na_2HPO_4 – Na_2SO_4 .

Таблица 6.2. Влияние добавок солей в базовый состав электролита на анодный выход по току стали Р6М5 при анодной плотности тока $1,5 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$

Добавка соли		рН – электролита		Выход по току, %	Плотность (цвет) анодной пленки
Компонент	мас. %	исходный	после ЭХО		
Na_2SO_4	3,0	6,4	10,8	26,7	Серая, растравлена
Na_2HPO_4	3,0	8,6	9,6	20,8	Черная
Na_3PO_4	3,0	11,6	11,6	16,9	Темная
NaNO_3	3,0	6,2	10,0	12,7	Серая
$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$	0,5	4,1	4,2	11,6	Бело-серая
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	3,0	8,8	8,8	11,4	Серая
Na_2CO_3	3,0	10,0	11,4	11,0	Светло-серая
Базовый состав		6,3	10,7	10,0	Серая
Глицерин	3,0	8,8	10,9	9,0	Светло-серая

Стационарные электродные потенциалы измеряют относительно хлор-серебряного электрода через 25–30 мин после опускания электрода в электролит без тока, когда они становятся стабильными, а далее пересчитывают относительно водородного электрода. В работе [71] изучали стационарные потенциалы анодов ($\Delta\varphi_a$) и катодов ($\Delta\varphi_k$). Установлено, что вращение электрода не изменяет стационарный потенциал системы «анод (сталь Р6М5) – электролит», а только ускоряет время его стабилизации. Как показывает анализ табл. 6.3, наиболее отрицательное значение стационарного потенциала наблюдается в электролите с добавкой соли Na_2SO_4 , а наименее – с Na_2HPO_4 . При этом, все приведенные в табл. 6.3 добавки к

базовому электролиту, за исключением последней, сдвигают величины $\Delta\varphi_a$ в отрицательную область. Катодная поляризация более ощутимо, чем анодная, реагирует на составляющие электролитов, материал и вращение катодов.

Выявлено [71], что достаточно ощутимое влияние на скорость электролитического выделения водорода оказывает природа металла–катода. Это подтверждает в частности анализ табл. 6.4, где для разных катодов приведены стационарные, или избыточные, потенциалы, на величину которых необходимо наложить отрицательный потенциал, чтобы обеспечить выделение водорода с определенной скоростью. Видно, что в наибольшей степени это необходимо для алюминиевых катодов и связки МО13Э, которая содержит значительное количество алюминия. В наименьшей – у медного катода. С ростом кислотности электролита перенапряжение снижается.

Таблица 6.3. Стационарные потенциалы системы «сталь Р6М5–электролит» при разных составах электролитов [71]

Электролит		рН электролита	Стационарный потенциал, $\Delta\varphi_a$, В	Цвет анода
Компонент	(масс. %)			
NaNO ₃	5,0	6,4	– 0,410	Черный
NaNO ₂	0,5			
Na ₂ SO ₄	3,0			
NaNO ₃	5,0	4,1	– 0,280	Темный
NaNO ₂	0,5			
Cr(NO ₃) ₃	3,0			
NaNO ₃	5,0	10,2	– 0,270	Темный
NaNO ₂	0,5			
Na ₂ CO ₃	3,0			
NaNO ₃	5,0	11,2	– 0,240	Темный
NaNO ₂	0,5			
Na ₃ PO ₄	3,0			
NaNO ₃	5,0	6,3	– 0,220	Серый
NaNO ₂	0,5			
NaNO ₃	5,0			
NaNO ₂	0,5	8,6	– 0,210	Черный
NaNO ₃	5,0			
Na ₂ HPO ₄	3,0			

Из изложенного выше миф № 8 о высокой доли электрохимического растворения при электрохимическом шлифовании кругами из СТМ оказывается ничем не подтвержденным, а исследования наоборот показывают, что реальная часть электрохимической составляющей в общем токе невелика и составляет от 8 до 15 %. А преимущественную часть составляет электроэрозийная составляющая силы тока. При ЭХШ является обычным,

а особенно это характерно для повышенных режимов, возникновение нежелательных избыточных электроэрозионных разрядов в зоне обработки. Исторически так сложилось, что исследователи стремились избавиться от них, чтобы улучшить действенность электрохимических процессов. Однако исследования показали, что это сделать невозможно, поэтому основное внимание было сосредоточено на электроэрозионных процессах обработки, а электрохимическое шлифование осталось со своими нерешенными проблемами. Поскольку по показателям качества электроэрозионное шлифование для условий обработки ряда инструментальных материалов использовать нежелательно, то предложено [117] недостатки ЭХШ обратить в его преимущества, а именно использовать хоть и небольшие, но эффективные электрохимические процессы, например такой как эффект регенерируемого гидрооксидного блока в межэлектродном промежутке, а именно – эффект создания на катоде (в прикатодном слое) нерастворимых гидрооксидных образований, которые снижают проводимость электрохимической ячейки и изменяют условия электрофизического контакта связки и стружки.

Таблица 6.4. Влияние материала катода на его стационарные потенциалы в разных электролитах [71]

Материал катода	Стационарные потенциалы катодов, $\Delta\phi_{\text{к}}$, в электролитах	
	NaNO ₃ – 5,0 масс. % NaNO ₂ – 0,5 %	NaNO ₃ – 5,0 масс. % NaNO ₂ – 0,5 % Cr(NO ₃) ₃ – 0,5 %
	pH 7	pH 4
Алюминий	– 0,841	– 0,409
Связка МО13Э	– 0,556	–
Связка М2-12Э	– 0,353	– 0,283
Железо	– 0,265	–
Медь	– 0,093	+ 0,013

Укажем, что в процессе поляризации в прикатодном слое происходит повышение pH, вызванное разрядением ионов на катоде. Установлено [117], что в нитрит-нитратном электролите в области плотностей токов от 2 до 20 А/м² pH_с скачком достигает величины 11–12. Возникает вопрос возможности использования приведенного выше явления. Поскольку нас интересуют вопросы снижения избыточности электроэрозионного тока, то указанное явление возможно использовать для создания на катоде (в прикатодном слое) нерастворимых гидрооксидных образований, снижающих проводимость электрохимической ячейки и ухудшающих условия электрофизического контакта связки и стружки. Для достижения такого эффекта возможно использование любых солей, образующих гидрооксиды, дис-

социрующие одновременно по типу кислот и типу щелочей, то есть имеющих амфотерные свойства. Амфотерные гидроксиды имеют определенный рН-гидратообразования [117]: 3 – Fe(OH)₃, 4–5 – Al(OH)₃, 6 – Cr(OH)₃, 6–7 – Zn(OH)₂, Fe(OH)₂, 8 – Ni(OH)₃, Co(OH)₂, 9 – Mn(OH)₂.

При этом, необходимо, чтобы общий водородный показатель электролита не превышал рН-гидратообразования для используемой соли. В таком случае гидроксиды образуются непосредственно вблизи катода и покрывают его поверхность. Необходимо указать, что толщина диффузионного слоя невелика, поэтому, естественно, кислотность основной массы электролита остается такой же, как и в исходном растворе. Наличие такого гидроксидного блока в межэлектродном промежутке приводит к снижению технологического тока при электрохимическом шлифовании, что снижает его эрозионную составляющую и износ катода-инструмента. Например, при ЭХШ стали Р6М5Ф3 кругом 12А2-45° 150x10x3–КРС 125/100–М2-12Э–100 при $v_k=30$ м/с; $S_{пр}=0,3$ м/мин; $S_n=0,5$ мм/дв.х.; $U=6$ В использовании электролита с добавкой Cr(NO₃)₃ позволяет образовать в МЭП гидроксидный блок Cr(OH)₃, снизить ток в 2,6 раза и износ круга в 2,7 раза в сравнении с электролитом без добавок. Концентрацию соли необходимо подбирать таким образом, чтобы блокировался весь объем МЭП. В дальнейшем этот гидроксидный блок, поступая в основной объем электролита, регенерирует, восстанавливаясь до соли. Создание регенерируемого гидроксидного блока в МЭП возможно не только за счет использования соли азотнокислого хрома, а и соли азотнокислого никеля. Рассчитывается величина МЭП при ЭХШ сплава КНТ16 кругом 12А2-45° 150x10x3x32–АС4 100/80–ВСЭ–100. Условия расчета: $Q = 2 \cdot 10^{-8}$ м³/мин (1200 мм³/мин), $v_k=15$ м/с, $\beta^*=1,1$, $\beta=109^\circ 24'$, $\varepsilon = 0,8$, $\eta = 0,1$, $\varepsilon_V = 0,372 \cdot 10^{-10}$ м³/(А·с), $j_{ex}=0,33 \cdot 10^6$ А/м². Расчетная величина МЭП для данных условий равна $15,29 \cdot 10^{-6}$ м. Весь объем МЭП для образца толщиной 0,006 м равен $6,42 \cdot 10^{-10}$ м³. Титрованием установлено [117], что для соблюдения условий образования и регенерации гидроксидного блока в МЭП концентрация соли Ni(NO₃)₂ в электролите должна быть около 1 г/л. При больших объемах МЭП концентрация соли возрастает. Из табл. 6.5 видно, что введение в состав электролита соли Ni(NO₃)₂ снижает ток и соответственно износ круга.

Обратим внимание теперь на анодную пленку, а именно пленку, образующуюся на поверхности материала, являющегося анодом в процессах электрохимической обработки. Толщина анодной пленки, образующаяся на стали ШХ15 при алмазном ЭХШ, зависит от активности электролита и имеет толщину у NaNO₃ от 0,9 до 3,6 мкм, а у NaCl от 2,3 до 15,5 мкм. При этом пористость пленок составляет 50–80 %, причем у NaCl эта пористость более высокая [394].

Таблица 6.5. Влияние добавки азотнокислого никеля к базовому электролиту на технологические параметры при ЭХШ сплава КНТ16

Состав электролита (масс. %)		pH	Технологический ток, А	Эффективная мощность шлифования, кВт	Относительный расход алмазов, мг/г
NaNO ₃	5,0	7,6	80	1,0	7,7
NaNO ₂	0,2				
NaNO ₃	5,0	7,4	50	0,9	5,8
NaNO ₂	0,2				
Ni(NO ₃) ₂	0,1				

Автором [395] установлено, что потенциал анода определяет состав поверхностной фазы (солевая пленка, гидроксид, оксид), а вот ее характеристики являются следствием интенсивности массотеплопереноса и времени поляризации. Эти факторы определяют электросопротивление, толщину и структуру поверхностной пленки. В работе [396] показано, что электросопротивление анодных оксидных пленок на титане является достаточно значительным и находится в диапазоне от 10 до 40 Ом. Согласно пленочной теории пассивности [397], пассивация обусловлена образованием на поверхности металла фазовой оксидной или гидроксидной пленок:

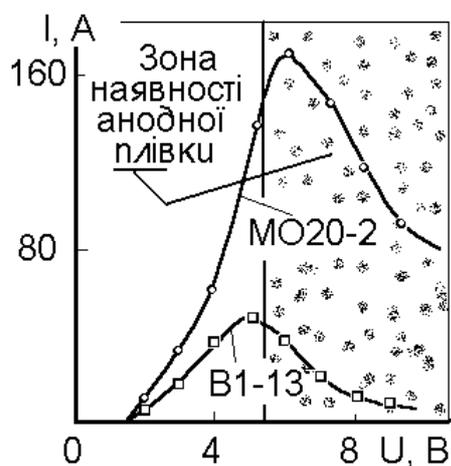
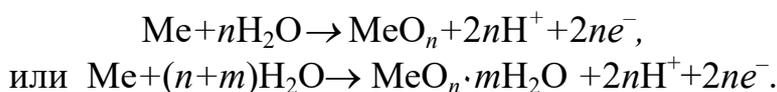


Рис. 6.18. Зависимость силы тока от напряжения при ЭХШ пластин из сплава ТН50 алмазными кругами на связках МО20-2 и В1-13. Закрашенная зона – область появления и функционирования анодных пленок и наличия сколов на кромках пластин [117]

Так, например, стали в процессе электрохимической обработки покрываются анодными пленками разного состава: $n\text{FeO} \cdot m\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot p\text{H}_2\text{O}$, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 [390], а также в них входят соединения на основе солей электролитов. Толщина пассивных пленок оценивается на железных электродах от 20 до 100 Å, а при отсутствии в электролите активных ионов – от 0,1 до 1,0 мкм.

В работе [71] состав и структура анодных оксидных пленок рассмотрена применительно к процессу ЭХШ БВТС, поскольку в этом случае они являются важным фактором, определяющим качество обработки по наличию трещин и сколов. Так, с повышением напряжения при ЭХШ алмазными кругами сплава ТН50 сила тока возрастает, достигая максимума в диапазоне напряжений 5–6 В, и далее снижается (рис. 6.18).

Такая зависимость характерна для глубинного ЭХШ, как быстрорежущих сталей, так и твердых сплавов. Снижение тока при повышении напряжения свыше 6 В обусловлено формированием и ростом плотности анодных оксидных пленок на поверхности обрабатываемого материала. Кроме того, выявлено, что появление трещин и сколов на этой поверхности при шлифовании, связано с наличием на ней анодной пленки. Поэтому, на первом этапе отработки методик и получения исходных данных, исследовались пленки, полученные на поверхностях сплавов ТН20 и КНТ16 в электрохимической ячейке, а также продукты анодного растворения (шлам). Для химического анализа пленка снималась с образцов по мере ее роста, а шлам удаляли фильтрованием с последующим просушиванием. Химический анализ полученных продуктов позволил установить основные химические элементы в них и их массовую долю (табл. 6.6).

Таблица 6.6. Результаты химического анализа шлама и анодных пленок при электрохимическом растворении БВТС [71]

Исследуемые образцы		Содержание химических элементов, масс. %						
Наименование	Марка БВТС	Ti	Ni	O	N	C	Mo	Na
Анодная пленка	КНТ16	37,8	5,8	36,0	10,2	7,3	2,2	–
Шлам		12,4	3,9	38,3	9,2	1,2	0,5	30,5
Анодная пленка	ТН20	34,2	13,3	36,4	8,4	3,7	1,8	–
Шлам		15,2	2,9	35,2	18,7	2,1	0,6	25,0

Результаты химического анализа подтверждены расшифровкой рентгенограмм полученных на установке ДРОН-3. Установлено, что в осадке, образующегося в электролите при анодном растворении как сплава ТН20, так и КНТ16, содержатся TiO_2 (рутил), соединения никеля (NiO и $Ni(OH)_2$) и соли электролита. Кроме того, при растворении КНТ16 в осадок выпадает TiN . Таким образом, можно представить следующий механизм анодного растворения БВТС. Сплав подвергается растравлению и в раствор переходит его связующее – Ni в виде $Ni(OH)_2$. В свою очередь, основа сплава (TiC) – окисляется до TiO_2 . Рутил частично поступает в раствор. Аналогично формируется и анодная пленка, с той разницей, что в растворе больше $Ni(OH)_2$, а в пленке – TiO_2 .

На втором этапе исследований изучались анодные оксидные пленки, возникающие непосредственно на сплаве при электрохимическом шлифовании. Количественный анализ поверхности с пленкой и без нее проводился на микроанализаторе «Кемскан-4ДВ». Результаты исследований приведены в табл. 6.7. Выявлено, что при наличии на поверхности сплава анодной пленки содержание титана, никеля и молибдена снижается, а содержание кислорода на поверхности возрастает достаточно ощутимо – в 3,5 раза.

Таблица 6.7. Содержание элементов на поверхности сплава ТН50, масс.% [71]

Элементный состав	Без анодной пленки	С анодной пленкой
Титан	43,0	37,2
Никель	28,0	24,2
Молибден	10,1	7,3
Вольфрам	4,2	3,4
Кислород	5,8	20,4
Другие элементы	8,9	7,5

Соединения, входящие в состав анодной оксидной пленки, определяли на дифрактометре ДРОН-3 в медном излучении [71] (табл. 6.8).

Таблица 6.8. Данные рентгенограмм поверхности ТН20 с анодной пленкой

Расчетная рентгенограмма			Согласно данным справочника [398]							
			TiC		Ni		(NH ₄) ₂ CO ₃ ·H ₂ O		NH ₄ NO ₂	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>I</i>	2θ	<i>d</i> , Å	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>
3	22,0	4,04	–	–	–	–	4,05	10	–	–
2	26,2	3,40	–	–	–	–	3,40	30	–	–
4	29,6	3,01	–	–	–	–	3,00	100	–	–
Следы	30,8	2,90	–	–	–	–	2,89	30	–	–
Следы	31,4	2,84	–	–	–	–	–	–	2,84	100
92	36,1	2,49	2,49	Сред.	–	–	–	–	–	–
115	42,0	2,15	2,15	Следы	–	–	–	–	–	–
2	44,4	2,04	–	–	2,03	100	–	–	–	–
2	51,4	1,77	–	–	1,76	50	–	–	–	–
62	60,7	1,53	1,53	Следы	–	–	–	–	–	–
31	72,7	1,30	1,30	Сред.	–	–	–	–	–	–
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17	76,5	1,25	1,25	Сред.	–	–	–	–	–	–
6	91,0	1,08	1,08	Сред.	–	–	–	–	–	–
12	102,0	0,99	0,99	Сред.	–	–	–	–	–	–
20	106,0	0,96	0,96	Сред.	–	–	–	–	–	–
18	122,0	0,88	–	–	–	–	–	–	–	–
15	136,0	0,83	–	–	–	–	–	–	–	–

Установлено, что шлифованная без тока поверхность сплавов ТН20 и КНТ16 содержит соединения TiC_{0,97}, Ni, TiO₂ (анатаз) и Mo₂C. При шлифовании с током в анодной пленке регистрируются соединения с TiC_{0,7-0,9},

$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Ni следи, рентгенограммы также подтверждают наличие NH_4NO_2 (табл. 6.8).

Таким образом, приведенное выше позволило предложить следующий механизм формирования анодных пленок при электрохимическом шлифовании БВТС (рис. 6.19). Из составляющих твердого сплава растворению подвергается Ni , который поступает в раствор в виде NiO или $\text{Ni}(\text{OH})_2$. Частично эти соединения задерживаются в пленке. Карбид титана подвергается окислению. Известно [344], что окисление карбидов и нитридов сопровождается растворением кислорода, которым насыщен прианодный слой, с выделением соответствующего металла (Ti) и неметалла (C , N_2) и с последующим образованием слоев оксидных пленок. В нашем случае титан окисляется с образованием рутила, а углерод (или азот в случае TiCN) принимает участие в формировании в составе пленок различных солей. В результате на поверхности сплава ТН20 мы имеем своеобразный «слоистый пирог», представленный схематически на рис. 6.20. Формируется верхний слой, условно названный нами «аморфным», а под ним образуется дефектный слой сплава со сниженным содержанием Ni и карбидами в области гомогенности TiC_{1-x} , поскольку существуют условия

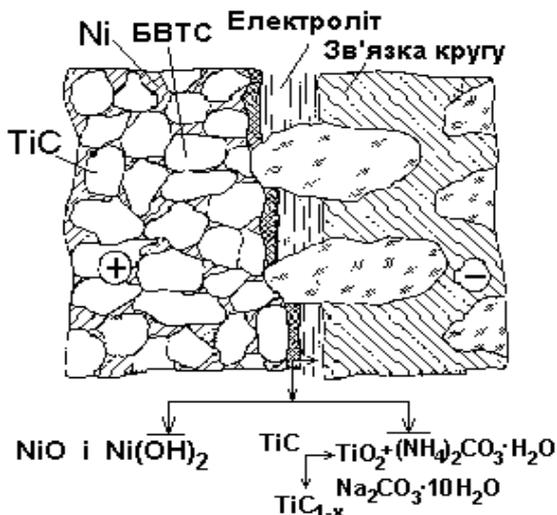


Рис. 6.19. Схема образования анодной оксидной пленки на БВТС [71]

выхода углерода из карбида. На сплаве на основе TiC (ТН20) этот слой можно представить в виде :

$\text{TiC}_{1-x} + \text{NiO} [\text{або Ni}(\text{OH})_2] + \text{TiO}_2^{\text{рутил}} + \text{соль с наличием углерода,}$
а на сплаве с основой $\text{TiC}(\text{N})$ (КНТ16):

$\text{TiC}_{1-x} + \text{NiO} [\text{або Ni}(\text{OH})_2] + \text{TiO}_2^{\text{рутил}} + \text{соль аммония с наличием углерода.}$

Наличие при ЭХШ TiC в области гомогенности в поверхностном слое при его фрикционном взаимодействии со связкой круга приводит к появлению трещин и сколов из-за ослабления его механических характеристик. Так, микротвердость $\text{TiC}_{0,96} - 31098 \pm 1668$ МПа, $\text{TiC}_{0,89} - 25408 \pm 1373$ МПа, $\text{TiC}_{0,79} - 25212 \pm 1177$ МПа, $\text{TiC}_{0,72} - 18933 \pm 1079$ МПа [345]. При обычном окислении ТН20 с нагревом до 973 К такого явления не происходит: TiC окисляется до $\text{TiO}_2^{\text{анатаз}}$ и $\text{TiO}_2^{\text{рутил}}$, а Ni – до NiO .

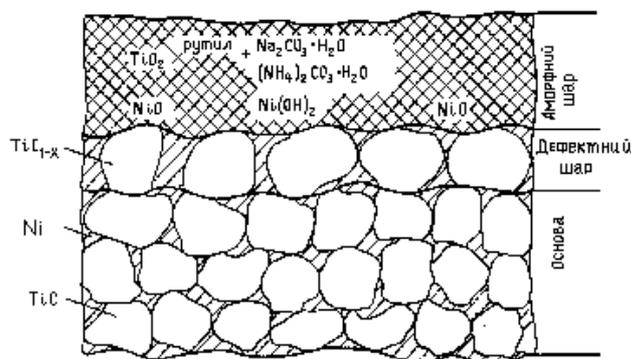


Рис. 6.20. Строение анодной оксидной пленки на БВТС [71]

сколькx могут быть причиной разрушения поверхности образца при силовых нагружениях.

Одним из путей снижения или избежания предразрушенного слоя является введение в состав электролита анионов брома, активных по отношению к титану. Как установлено [71], в этом случае трещины и сколы на обрабатываемой поверхности не образуются. Вероятно, это связано с тем, что активные по отношению к титану анионы брома уравнивают при ЭХШ процесс ухода углерода и титана из карбида титана. Как следствие, поверхность сплава с анодными оксидными пленками, в этом случае, имеет состав $TiC_{0,97}$, Ni, $TiO_2^{рутил}$ и NH_4Br , и, таким образом, «достроенность» карбида титана улучшается [71]. В случае отсутствия возможностей введения в электролит анионов брома необходимо заключительный проход при шлифовании проводить при сниженном напряжении (2–4 В), что позволит избежать образования предразрушенного слоя. Укажем, что таких проходов может быть не более чем два. Если проводить обработку без тока продолжительно, то режущая способность кругов ухудшается, возрастает трение связки круга по БВТС и ухудшается состояние поверхностного слоя. Так, рентгенографическим анализом поверхностей после ЭХШ с заключительным проходом без тока и шлифования с охлаждением сплава КНТ16 выявлено, что в первом случае линии на рентгенограмме узкие, наблюдается расщепление дуплетов на дальних углах, что указывает на отсутствие наклепа поверхности. Во втором случае, линии на рентгенограмме размытые и широкие, что указывает на дефектность кристаллической структуры. Это подтверждается исследованиями стойкости, при точении стали 40Х (НВ240), пластин из сплавов ТН20 и КНТ16 после их шлифования с охлаждением ($Q = 600 \text{ мм}^3/\text{мин}$) и ЭХШ ($Q = 1500 \text{ мм}^3/\text{мин}$) с заключительным проходом при сниженном напряжении (табл. 6.9). Видно, что алмазное ЭХШ в сравнении с шлифованием с охлаждением позволяет повысить

Таким образом, при электрохимическом шлифовании на поверхности БВТС за счет анодных процессов образуется своеобразный дефектный слой, состоящий из анодной пленки и предразрушенного слоя из TiC_{1-x} и питтингов от растворения Ni. Оба эти процесса могут влиять на разрушение слоя. С одной стороны они благоприятны, поскольку облегчают процесс резания, с другого – неблагоприятны, по-

стойкость пластин (увеличить длину пути резания пластиной при лимитированной величине затупления по задней грани в 0,4 мм).

Таблица 6.9. Влияние методов шлифования на их показатели при точении стали 40X (круг 12A2-45° 150×10×3×32–АС4 100/80ма–В1-13–100) [71]

Метод шлифования	q_p , мг/г	Ra , мкм	Длина резания (стойкость пластин), м·10 ³
С охлаждением	2,8 / 7,7	0,28 / 0,38	15,8 / 12,0
ЭХШ	1,9 / 5,6	0,37 / 0,41	21,5 / 17,7

Примечание: данные перед чертой относятся к сплаву ТН20, после – к КНТ16.

Анодные и, соответственно, катодные пленки, возникающие при ЭХШ, естественно влияют на работоспособность кругов из СТМ, поскольку изменяют условия фрикционного контакта с изделием. Например, если взять круг из кубонита на металлической связке М1-10, которая в определенной степени самозатачивается в процессе резания, и шлифовать с охлаждением электролитом быстрорежущую сталь, то при производительности 1000 мм³/мин эффективная мощность шлифования устанавливается на уровне 1,6 кВт. В случае подачи потенциала в зону резания мощность сразу прыжком поднимается до 2,0 кВт. При отключении потенциала мощность шлифования постепенно снижается, проходит исходный уровень и достигает 1,4 кВт. Далее, через некоторое время она возвращается к исходному уровню. Такая эволюция мощности объясняется [71] следующим. При подаче потенциала практически мгновенно образуются пленки: на поверхности обработки – анодные, а на поверхности связки – катодные. Мощность шлифования прыжком повышается. В случае отключения потенциала анодные пленки исчезают быстро, а катодные не исчезают, а только со временем истираются, поэтому мощность падает не прыжком, а постепенно. Поскольку электрические разряды при наличии потенциала способствуют лучшему вскрытию поверхности круга, поэтому мощность возвращается не в исходное состояние, а становится меньшей. С временем режущая поверхность круга прирабатывается и мощность возвращается к начальному значению. Тем самым, для снижения энергоемкости процесса и износа кругов важное значение имеет способность катодных пленок сопротивляться абразивному воздействию шлама и истиранию в процессе трения круга с обрабатываемым изделием.

Обратим внимание на то, что катодная поляризация оказывает влияние на силовые параметры процесса шлифования в основном при малых значениях скорости круговой подачи. Насыщение обрабатываемой поверхности катодным водородом, имеющим очень высокую диффузионную подвижность, способствует снижению энергоемкости механохимических

процессов образования сдвига и разрушения, происходящих в контактной зоне при стружкообразовании [399]. Катодные процессы в значительно большей степени отражают влияние разных факторов на электрохимические процессы для условий электрохимического шлифования кругами из СТМ, чем анодные процессы [117]. За счет введения в электролит соответствующих добавок можно снижать или повышать интенсивность катодных процессов и, соответственно, регулировать величину износа кругов при ЭХШ. Отдавая преимущество катодным процессам над анодными при управлении характеристиками ЭХШ, следует указать, что эти два процесса безусловно взаимосвязанные, так как анодная и катодная поляризации являются сопряженные реакции. На взгляд [117], базовым является выбор акцентов – на что влиять в первую очередь – на анодную или катодную поляризацию. Изменяя катодную можно более активно влиять на интенсивность анодных процессов.

В работе [117] этот вопрос рассмотрен на примере базового электролита ($\text{NaNO}_3 - 5,0$, $\text{NaNO}_2 - 0,5$, $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 - 0,5$ масс. %). Изменяя рН данного раствора от 4,1 до 1,0 добавлением HNO_3 (1:1) или от 4,1 до 8,5 добавлением 0,1 Н раствора KOH , можно влиять на ход катодных и анодных кривых (рис. 6.21).

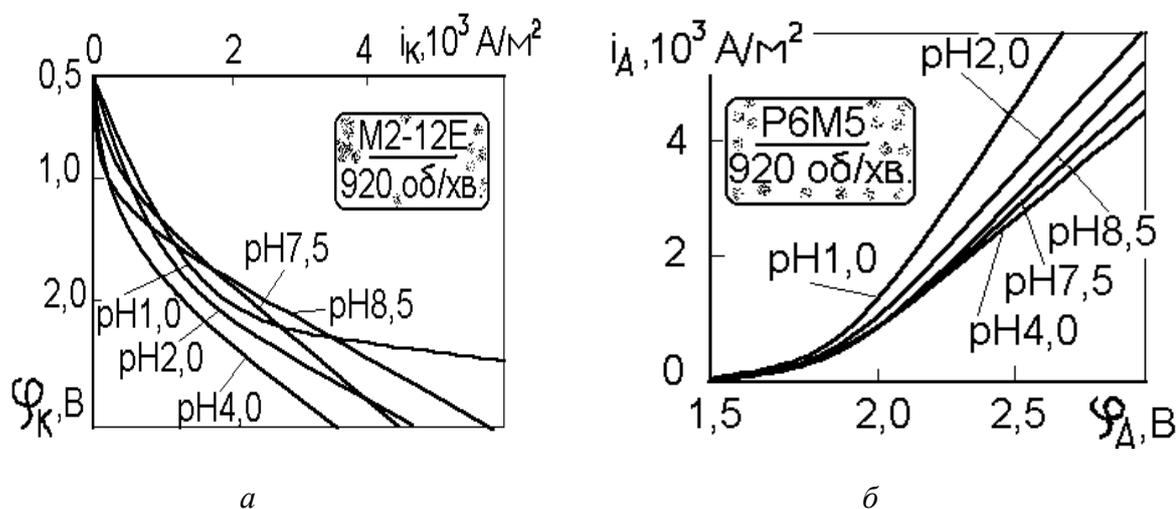


Рис. 6.21. Зависимости плотностей токов на катоде из связки М2-12Э (а) и аноде из стали Р6М5 (б) от их потенциалов разных водородных показателей водного состава электролита (50 г/л NaNO_3 + 5 г/л NaNO_2 + 5 г/л $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$) при: 1 – рН 4,0; 2– рН 7,5; 3 – рН 8,5; 4 – рН 2,0; 5 – рН 1,0

Снижение рН до 1,0 приводит к снижению перенапряжения в системе анод-электролит, а также катод-электролит, однако очень кислотные электролиты имеют повышенную коррозионную активность, тогда как увеличение рН до 8,5 способствует, вследствие выпадения в осадок (при

pH > 5,3) нерастворимого Cr(OH)₃, преобразованию данного состава электролита с азотнокислым хромом фактически в базовый. В этом случае анодный процесс не изменяется (рис. 6.22). С увеличением pH электролита стационарные потенциалы анода и катода становятся более отрицательными, однако на катоде, в отличие от анода, такие изменения происходят во всем исследованном диапазоне pH (табл. 6.10). Приведенное выше указывает на то, что преимущество следует отдавать катодным процессам, поскольку их влияние распространяется на более широкую область состояния электродов и возникает возможность регулировать с их помощью технологический ток [117], поэтому обратим далее внимание на катодные пленки.

Таблица 6.10. Влияние водородного показателя базового электролита с добавкой Cr(NO₃)₃ на стационарные потенциалы анода и катода [117]

Водородный показатель электролита, pH	Стационарные потенциалы, В	
	катода (связка М2-12Э) Δφ _к	анода (сталь Р6М5) Δφ _а
1,0	+0,119	-0,125
1,9	+0,119	-0,170
2,9	+0,050	–
3,9	-0,226	-0,280
5,3	-0,228	-0,281
5,5	-0,324	–
6,5	-0,366	–
7,5	-0,403	–
8,5	-0,424	-0,283

Катодная пленка – пленка, образующаяся на поверхности материала, являющегося катодом в процессах электрохимической обработки. Под катодными пленками понимается измененный поверхностный слой связки круга с учетом массопереноса в межэлектродном промежутке [117].

Окраска пленок и их толщина. Наблюдение за рабочей поверхностью кругов показывает, что при ЭХШ она приобретает разную окраску – от серой до черной. Особенно хорошо это наблюдается при использовании разных составов электролитов и при подсушивании круга [400]. Для определения толщины катодных пленок изготавливали длинные (до 50 мм) пластинки из материала связок и наносили на их поверхность пленки при разных режимах и условиях. Далее с помощью оптической головки ИЗВ-2 измеряли их толщину в сравнении с базой. В [400] приведены толщины катодных пленок для разных анодов и катодов:

Анод	Катод	Толщина пленки, мкм
Сталь Р6М5	М2-01	1 ± 0,5
Твердый сплав ТТ8К10Б	МО13Э	3 ± 0,5

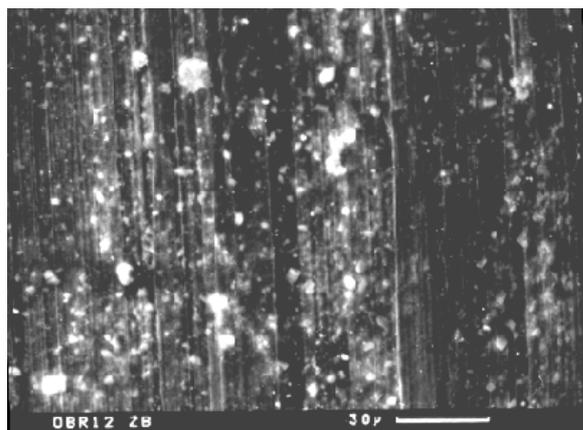


Рис. 6.22. Состояние поверхности связки М2-01 с катодной пленкой при рН электролита – 10 и аноде – твердом сплаве ТТ8К6

полимерной связки В1-13. Кроме того, для выявления общих закономерностей использовали базовый состав (NaNO_3 – 5,0, NaNO_2 – 0,2 масс. %) электролита с приданием ему разных рН (4 – 10).

Установлено [400], что катодная пленка (рис. 6.22) содержит в целом элементы всех трех составляющих, находящихся в МЭП: инструментального материала (W, Ti, Co, Fe, Ni), электролита (Na) и связки круга (Cu, Sn, Al, Zn). Выявлены основные факторы, влияющие на склад катодных пленок: рН-электролита, составы катода и анода. Так, например, при обработке твердого сплава с увеличением рН снижается содержание Co в пленке, а возрастает содержание Cu. Кроме того, на связке МО13Э с повышением рН электролита увеличивается содержание Al в пленке и снижается содержание Zn. Данные по влиянию рН на элементный состав катодной пленки, формирующейся на поверхности связки М2-01 (анод – сплав ТТ8К6) приведены в табл. 6.11.

Таблица 6.11. Состав катодных пленок в зависимости от рН-электролита

Элементы	Исходная поверхность, масс. %	Содержание элементов (масс. %) при рН электролита			
		4	7	8	10
Cu	77,8	59,2	56,3	59,9	68,7
Sn	20,8	17,2	14,6	18,1	18,2
Na	–	2,4	4,5	4,5	2,6
W	–	1,4	3,1	1,8	1,1
Ti	–	0,6	0,5	1,0	0,6
Co	–	17,7	19,2	13,4	7,6

Состав катодных пленок. Для выявления особенностей формирования состава катодных пленок проводились исследования [400] в специальной электрохимической ячейке, позволяющей постоянно создавать перемещение электролита и выдерживать стабильную величину МЭП в 0,1 мм. В качестве анодов использовались образцы из инструментальных материалов: твердого сплава ТТ8К6, БВТС марки ТН20 и стали Р6М5. Катодами служили образцы из металлических связок М2-01, МО13Э, МО20-2 и металло-

Материал анода оказывает влияние на состав катодных пленок в первую очередь за счет массопереноса элементов анода (рис. 6.22). Так, из твердых сплавов преимущественно переносится – Co, из БВТС – Ni, из быстрорежущих сталей – Fe. В табл. 6.12 приведены данные по изменению состава пленок на поверхности катода из связки М2-01 при рН7. Определенное влияние оказывает на состав пленки и материал катода. Кроме того, что он, естественно, непосредственно влияет на состав пленок, он также влияет и на массоперенос элементов из анода. Например, пленка на связке М2-01 содержит 19,2 масс. % Co, а пленка на связке МО13Э содержит 15,7 масс. % Co. Вероятно, это связано с более низким отрицательным стационарным потенциалом связки МО13Э. Особое внимание следует обратить на катод из связки В1-13. В случае продолжительной выдержки под напряжением поверхность связки перенасыщается Co и Ti (анод – сплав ТТ8К6) и настолько ощутимо теряет Cu, что это даже приводит к растрескиванию поверхности (рис. 6.23). Аналогично, даже при непродолжительном анодном растворении (более 5 мин) поверхность сплава ТН20 начинает разрушаться, что связано с формированием дефектных анодных пленок.

Таблица 6.12. Состав катодных пленок в зависимости от состава анода

Элементы	Содержание элементов (масс. %) при материале анода		
	ТТ8К6	ТН20	Р6М5
Cu	56,3	80,3	58,5
Sn	14,6	17,2	14,2
Na	4,5	–	0,4
Ti	0,5	0,3	–
W	3,1	–	0,7
Co	19,2	–	–
Ni	–	1,1	–
Mo	–	–	1,1

Фрикционные характеристики. Появление пленок на поверхности круга приводит к изменению характера фрикционного контакта и величины коэффициента трения. Так, при трении связки М2-01 по сплаву ТН20 в случае принудительного формирования на поверхности связки *анодных* пленок (к кругу подводится «+» от источника тока) коэффициент трения составляет 0,06, а при принудительном формировании на поверхности связки *катодных* пленок (к кругу поводится «–») он составляет – 0,045 (при отсутствии пленок – 0,049). Поэтому на поверхности круга для получения лучшего фрикционного контакта необходимо формировать катодные пленки [400].

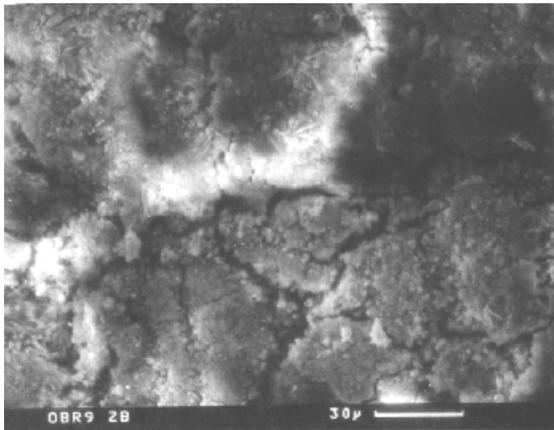


Рис. 6.23. Состояние поверхности связки В1-13 с катодной пленкой при продолжительной выдержке под напряжением

в обоих случаях далее шлифовали сталь Р6М5 с охлаждением и без тока.

В течение определенного времени абразивное воздействие шлама и фрикционный контакт связки круга со сталью истирают пленки. Фиксировали эффективную мощность шлифования, относительный расход СТМ при этом и время существования пленок по возврату к исходному значению величины показателя мощности. Установлено (табл. 6.13), что по вре-

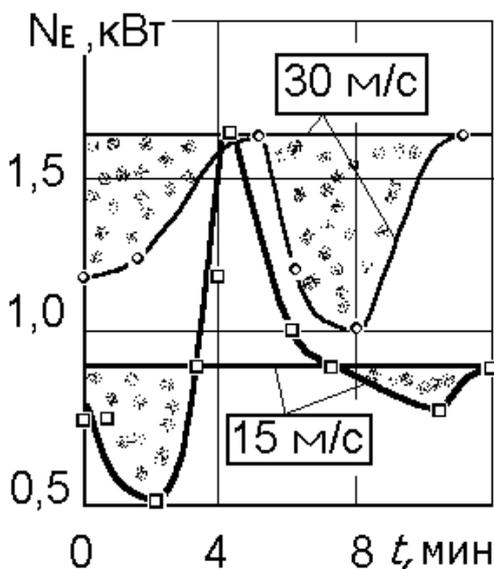


Рис. 6.24. Изменение величины эффективной мощности шлифования за время трения при наличии на поверхности связки катодной пленки

Износостойкость пленок. Кроме фрикционных характеристик, для оценки эффективности наличия пленок на поверхности круга применительно к условиям шлифования важно оценить также их способность сопротивляться изнашиванию в условиях абразивного воздействия шлама и истирания от контакта с обрабатываемым материалом, т.е. оценить продолжительность их существования в таких условиях. Для этого [400] на режущей поверхности круга 12А2-45° 150×10×3×32-ГА 100/80С52-М1-01-100 формировали на протяжении 30 мин последовательно анодную и катодную пленки и в

мени существования катодные пленки на поверхности круга задерживаются более долгий период, позволяют больше снижать эффективную мощность и имеют меньшую конечную интенсивность износа. Анализ табл. 6.13 показывает, что лучше всего катодные пленки сопротивляются изнашиванию в условиях высоких скоростей вращения круга (30 м/с). Укажем, что в этом случае катодные пленки, во всем диапазоне времени их существования, позволяют снизить мощность шлифования (рис. 6.24), тогда, как для скорости 15 м/с наблюдается период превышения исходной мощности. Обращаем также внимание на то, что зависимость эффективной мощности от времени существования катодных пленок имеет как бы два периода (рис. 6.24), которые, по нашему мнению,

связаны со слоистостью строения этих пленок. В первый период – (0–5 мин) изнашивается верхний слой, содержащий продукты массопереноса, существующие в составе пленки (табл. 6.11 и рис. 6.22), а далее, во второй период – (5–12 мин) сама основа пленки.

Таблица 6.13. Влияние электродных пленок на показатели их изнашивания

Состояние поверхности круга	Время существования пленки, мин	Эффективная мощность шлифования, кВт		Конечная интенсивность износа, Å/с
		начальная	конечная	
Без пленки	–	0,9 / 1,6	0,9 / 1,6	317 / 194
С анодной пленкой	7,5 / 6,5	1,8 / 1,6	0,9 / 1,6	432 / 433
С катодной пленкой	12,5/16,0	0,7 / 1,2	0,9 / 1,6	352 / 137

В числителе – данные для скорости круга 15 м/с, а в знаменателе – для 30 м/с

Анодные пленки на поверхности круга также позволяют снизить эффективную мощность (рис. 6.25), однако время их существования значительно меньше и более высока интенсивность износа. Кроме того, специфика формирования анодных пленок неминуемо приводит к определенному анодному растворению связки круга, что нежелательно, поскольку повышает расход дорогостоящих СТМ. Динамика изменения интенсивности изнашивания катодных пленок приведена на рис. 6.26.

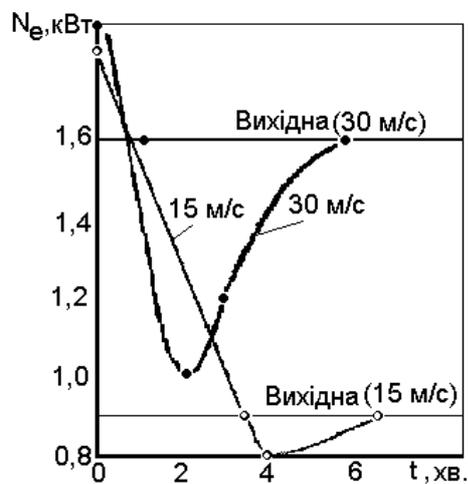


Рис. 6.25. Изменение величины эффективной мощности шлифования за время трения при наличии на поверхности связки анодной пленки

Видно, что при скорости вращения круга 15 м/с интенсивность износа поверхности с катодной пленкой более высокая, чем без нее, но со временем она снижается, практически достигая износа матрицы (кривая 1, рис. 6.26). В случае скорости круга в 30 м/с катодная пленка более эффективно снижает износ связки (матрицы) за все время существования пленки (кривая 2, рис. 6.26).

Приведенное выше дает возможность выдвинуть [400] положение о том, что катодные пленки, формируясь на поверхности круга являются не только покрытием, изменяющим условия электрофизического контакта, но и служат своеобразным защитным покрытием, повышающим способность режущей поверхности круга сопротивляться изнашиванию абразивного действия шлама в процессе обработки. Такое положение базируется на том, что ка-

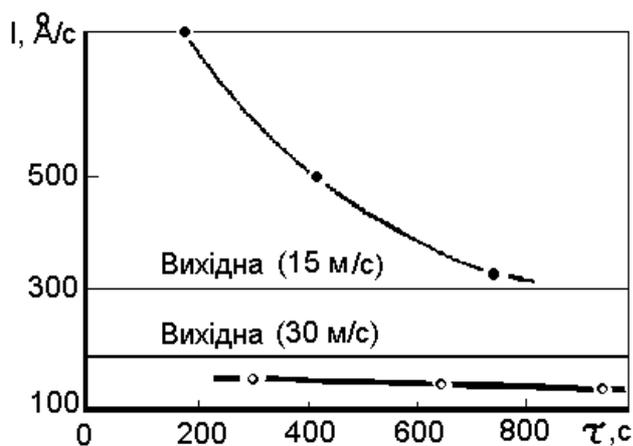


Рис. 6.26. Изменение износоустойчивости режущей поверхности круга с катодными пленками за время существования пленок при разных скоростях вращения круга [400]

но и без введения тока в зону обработки. Для этого можно использовать эффект электрохимической гетерогенности поверхности связки.

Эффект электрохимической гетерогенности поверхности связки – как направление при исследовании процессов шлифования практически не развивается, хотя, по нашему мнению, он заслуживает внимания как раз для кругов на связках, имеющих медную матрицу и металлы или неметаллы, в виде включений, отличающихся по своим физико-химическим свойствам от металлической матрицы. Это приводит к появлению коррозионных микроэлементов и усилению электрохимической гетерогенности поверхности связки. Как пример, это возможно проиллюстрировать на связках, имеющих основу Cu–Al–Zn с базовыми элементами, значительно отличающихся между собой по значениям стационарных электродных потенциалов (табл. 6.10).

Это связано с тем, что поверхность таких связок является химически неоднородной и на ней образуются микроскопические гальванические элементы: Cu–Al и Cu–Zn. Поскольку эти металлы находятся в водной среде (например, в условиях действия эффекта водопоглощения), то элемент является замкнутым и возникает локальный ток, ускоряющий анодное растворение. Алюминий направляет ионы в раствор, где они соединяются с ионами гидроксила: $Al - 3e^- \rightarrow Al^{3+}$, $Al^{3+} + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3$, и быстро подвергается коррозии. В целом, коррозия Al, Zn и других металлов, находящихся в ряду напряжений слева от водорода, сводится по сути к вытеснению ионов водорода из раствора и переходу самого металла в раствор в виде ионов. В контакте с менее активным металлом этот процесс резко ускоряется. Благодаря этому, формируются условия возникновения

тодные пленки, формируясь на поверхности круга, задерживаются на ней более длительный период, чем бы это были анодные, имеют меньший коэффициент трения и лучше влияют на снижение эффективной мощности шлифования, чем поверхность без такой пленки. Тем самым, катодные пленки на поверхности круга имеют большие преимущества в сравнении с анодными и для повышения износоустойчивости необходимо обеспечивать их наличие на поверхности круга в условиях не только электрошлифования,

на поверхности связки пленок, близких к катодным, имеющих, как указано выше, положительные эффекты.

Для реализации этого, режущая поверхность круга на некоторое время помещается в технологическую жидкость, например, водный состав электролита NaNO_3 – 5,0 %, NaNO_2 – 0,5 %, с образованием локальной безтоковой ячейки с промежутком 0,1 мм в которой «катодом» является поверхность круга, а «анодом» – обрабатываемый материал (твердый сплав). Изучено 4 варианта поведения материалов связок при выдержке в течение 3 часов в такой безтоковой ячейке. Поскольку, как указано выше, наиболее благоприятными для этого являются связки типа Cu–Al–Zn, то эксперименты проводились на связке MO13Э в средах с разным pH – 4, 7 и 11, а также для сравнения была использована связка M2-01 (Cu–Sn). В качестве технологической жидкости использовался указанный выше состав электролита, а изменение pH происходило добавлением кислоты или щелочи. Установлено, что с увеличением pH раствора содержание Al и Zn на поверхности снижается, а Cu, соответственно, возрастает. Эти тенденции аналогичны тем, которые проходят в электрохимической ячейке. Выявлено, что при этом необходимо использовать электролит с pH 11 и выдержку не менее 3 часов. В таком случае, содержание Al (22,4 масс.%) на поверхности рабочего слоя спадает на 4,3 %, почти как и в электрохимической ячейке (на 5,7 масс. %), что и позволяет формировать на поверхности пленки, близкие к электрохимическим. Напомним, что это возможно только на связках с основой Cu–Al–Zn. В случае связок с основой Cu–Sn такие процессы не происходят и на такой связке пленка не появляется даже при выдержке в 21 час. Это показал и анализ поверхности на микроанализаторе «Camscan-4DW»: соответственно (исходное состояние и при выдержке 21 час, масс. %) Cu – 78,1 и 78,0, Sn – 21,5 и 21,0. Содержание Cu–Sn практически не изменилось, хотя в спектре поверхности, которая выдерживалась 21 час в воде, все же появились определенные следы твердого сплава, который подвергался слабому растворению. Укажем, что на связку MO13Э поступает больше W, а такие элементы, как Ti и Co, почти не регистрируются. Таким образом, возможное нахождение условий формирования на поверхности круга из связок типа Cu–Al–Zn таких пленочных образований, которые были бы близкими к катодным.

6.3. Электроэрозионное (электроконтактное) шлифование кругами из СТМ

Как нами было показано выше, высокую режущую способность возможно обеспечить электроэрозионными процессами. Укажем, что электрические разряды в межэлектродном промежутке могут формироваться за

счет как регулируемого, так и не регулируемого, его пробоя. Для достижения первого, в зоне шлифования возбуждаются разряды от источника импульсного технологического тока (электроэрозионное шлифование). В качестве источника тока используют генераторы типа ШГИ, ГКИ, ГТИ, возбуждающие в рабочей зоне разряды частотой в несколько кГц, продолжительностью от единицы до нескольких десятков микросекунд при амплитудном значении напряжения от 60 до 150 В, а также низкочастотные генераторы типа ИТТ на частоту 50 Гц та амплитудное напряжение в 5–10 В. Характерным при этом является то, что для преимущественного воздействия разряда на связку кругов из СТМ используют подключение положительного полюса источника тока к кругу, а отрицательного – к обрабатываемому изделию. Во втором случае процессы электрошлифования являются или электрохимическими или электроискровыми. Источником тока являются выпрямители типа ВАКР, ВУ и т.п. с выпрямленным постоянным током напряжение от 0 до 24 В. При электрохимическом положительный полюс источника тока подключается к изделию, а отрицательный к кругу. При электроискровом шлифовании подключение полюсов обратное, как у электроэрозионного.

Для более детального рассмотрения особенностей представленных выше процессов и оценки роли электроэрозии у них, интересным будет их сравнение с точки износа режущей поверхности круга. Так, например [62], при глубинном шлифовании стали Р6М5 электроискровой и электроэрозионный методы, несмотря на разные источники дополнительной энергии, поступающей в зону обработки, обеспечивают приблизительно одинаковую работоспособность кругов из КНБ на связке М2-12Э, но в сравнении с ЭХШ при их использовании наблюдается возрастание (до 2-х раз) расхода КНБ и, соответственно себестоимости съема. Причиной повышенного износа рабочего слоя шлифовальных кругов являются интенсивные электроэрозионные (электроискровые) разряды, от термического воздействия которых разрушается связка и, соответственно, ухудшается удержание кубонитовых зерен.

Сравнение разных методов шлифования показывает, что при глубинном шлифовании быстрорежущей стали кругами из КНБ на металлической связке более эффективно ЭХШ [71]. Для оценки возможностей эффективно использования метода алмазно-электроэрозионного шлифования проводились сравнительные исследования работоспособности кругов с алмазами марки АС6 при упругом способе шлифования, который выполнялся на стенде, созданном на базе станка модели 3А64Д, модернизированном для электрообработки. Использовались образцы из твердого сплава ВК8 и стали 45 размерами 100×15×7 мм, безвольфрамового твердого сплава марки ТН20 (100×18×6 мм), быстрорежущей стали Р6М5 (100×20×8 мм). Режимы шлифования: $v_k = 30$ м/с, частота осцилляции стола – 70 дв.х./мин [71].

Установлено, что электроэрозионное шлифование в 2–7 раз повышает производительность в сравнении с ЭХШ (табл. 6.14). Характерным является то, что при данном методе, в отличие от упругого ЭХШ, круги на связках с основой Cu–Sn–Sb обеспечивают более высокую производительность, чем круги на связках с основой Cu–Al–Zn. Таким образом, при упругом шлифовании БВТС та твердого сплава совместно со сталью алмазными кругами на связках с основой Cu–Sn–Sb (М2-12Э, МО20-2) электроэрозионный метод является более экономичным. Данный вывод не распространяется на обработку инструментов из быстрорежущих сталей, поскольку в этом случае при упругом ЭЭШ производительность хотя и повышается в 2 раза, однако значительно (до 4 раз) увеличивается износ круга, а потому стоимость обработки значительно выше, чем при упругом ЭХШ (табл. 6.14). Выявлено также, что во всех случаях характерным для ЭЭШ является наличие повышенного износа кругов из СТМ, что крайне нежелательно, учитывая их достаточно высокую стоимость. Величину износа возможно в значительной степени регулировать за счет изменения рабочего напряжения источника импульсного тока (ЭЭШ стали Р6М5, круг КР 100/80–М2-12Э–100):

Рабочее напряжение, В	46	37	28
Относительный расход КНБ, мг/г	10,50	4,00	1,90
Шероховатость поверхности, Ra, мкм	0,75	0,63	0,42 .

Таблица 6.14. Влияние методов упругого шлифования инструментальных материалов на работоспособность алмазных кругов (12А2-45° 150×10×3×23)

Характеристика круга	Метод шлифования	Материал	U_p , В	P , МПа	I_T , А	Q , мм ³ /мин	q_p , мг/г
АС6 125/100М–М2-12Э–100	ЭХШ	ВК8+	6	1,08	200	250	0,59
	ЭЭШ	+Ст45	30		6–16	1200	3,50
АС6 125/100–М2-12Э–100	ЭХШ	ВК8+	6	1,08	150	210	0,52
	ЭЭШ	+Ст45	30		4–6	1260	4,50
АС6 125/100М–МО20-2–100	ЭХШ	ВК8+	6	1,08	200	220	0,86
	ЭЭШ	+Ст45	30		4–8	1610	6,00
АС6 125/100М–МО13Э–100	ЭХШ	ВК8+	6	0,75	90	350	0,61
	ЭЭШ	+Ст45	30		4–10	1030	4,65
АС6 125/100М–М2-12Э–100	ЭЭШ	ТН20	35	1,47	2	270	2,40
АС6 125/100М–МО13Э–100						185	7,36
КР 100/80С–М2-12Э–100	ЭХШ	Р6М5	8	0,80	80	368	1,05
	ЭЭШ		30		2–10	830	4,70

Таким образом, с повышением напряжения в межэлектродном промежутке инициируются избыточные электроразряды, вызывающие повышение износа кругов. Вместе с тем, хотя со снижением напряжения при ЭЭШ износ кругов и уменьшается, однако при этом уменьшается и производительность обработки. Обратим внимание (табл. 6.14), что для безвольфрамовых твердых сплавов даже в условиях ЭЭШ производительность упругого шлифования невелика, а износ кругов – достаточно велик. Так, для круга с характеристикой АС6 125/100М–М2-12Э–100 при ЭХШ сочетания ВК8+сталь 45 износ круга равен 0,59 мг/г, а при ЭЭШ сплава ТН20 при почти той же производительности – 2,4 мг/г, что в 4 раза больше, хотя производительность является совсем небольшой – 250–270 мм³/мин.

Приведенное выше указывает на то, что для инструментальных материалов, содержащих карбиды металлов IVb–Vb подгруппы (быстрорежущих сталей и БВТС) с точки зрения работоспособности и износостойкости кругов нежелательно использовать процесс ЭЭШ из-за наличия негативных избыточных электроразрядов. Аналогичные избыточные электроразряды формируются и при электрошлифовании, однако, если в первом случае излишние электроразряды относительно легко регулируются напряжением, то во втором, регулирование является более сложным, поскольку значительную роль начинают играть электрохимические процессы, а именно, описанная выше анодная и катодная поляризация. Например, с повышением напряжения при электрошлифовании стали Р6М5 растет анодная пассивация, а это приводит к снижению тока, и непосредственно его эрозионной составляющей, что отражается на повышении износостойкости кругов (круг КР 100/80–М2-12Э–100, $v_k = 30$ м/с, $Q = 1200$ мм³/мин):

Напряжение, В	4	6	8	10
Технологический ток, А	80	70	65	50
Относительный расход КНБ, мг/г	0,40	0,37	0,33	0,27

Аналогичный эффект мы имеем и при электрошлифовании БВТС (рис. выше). Причина снижения электроэрозии из-за образования на обрабатываемой поверхности анодных пленок состоит в том, что они создают достаточно большое переходное электросопротивление, вплоть до отсутствия металлического контакта при малых усилиях, а это снижает эрозию, как при непосредственных контактах связки круга и материала, так и при замыкании их через стружку.

Теперь рассмотрим особенности электроэрозионного воздействия на поверхность связки. Качественно фазовый состав поверхностного слоя у всех связок на основе оловянистой бронзы после электроэрозионного воздействия характеризуется тем, что ощутимо слой разделяется на 2 зоны: верхнюю (α -твердый раствор) и нижнюю – эвтектоид ($\alpha + \delta$) [113]. Элек-

троэрозионные процессы при электрошлифовании выполняют одно важное позитивное действие – поддержание стабильной режущей способности кругов, однако имеют и ряд негативных, например, возникновение трещин при воздействии разряда как на обрабатываемую поверхность, так и на связку круга. Задача как раз и состоит в том, чтобы максимально снизить их действие, и особенно для инструментальных материалов, содержащих в структуре карбиды металлов IVb–Vb подгрупп. В работе [117] рассмотрено влияние электрофизических процессов на поддержание режущей способности кругов из СТМ. Электроэрозионные явления при электрошлифовании могут возникать вследствие непосредственного пробоя МЭП, имеющего наименьшую диэлектрическую прочность, или из-за короткого замыкания электродов, вследствие наличия между ними стружки, что приводит к появлению нерегулярных биполярных скачков тока, оплавлению мостиков контакта и локальному выбросу материала анода и катода. Характерным для обоих случаев является воздействие электроэрозионного разряда на связку круга.

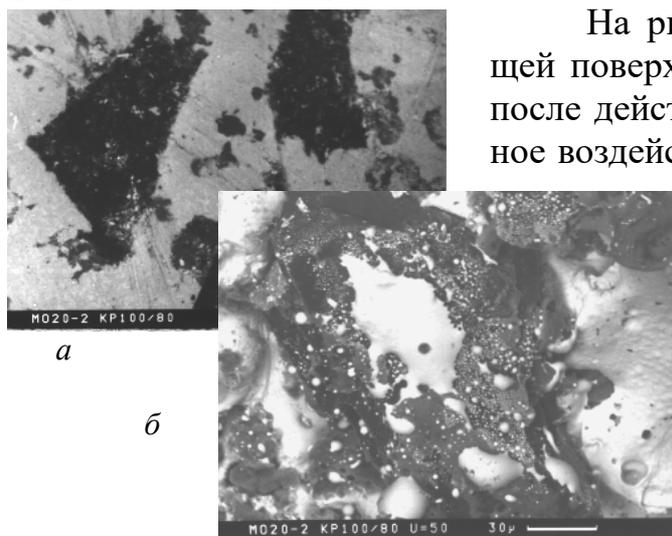


Рис. 6.27. Воздействие электроэрозионных разрядов на режущую поверхность: *a* – шлиф; *б* – после электроразряда

На рис. 6.27 представлен шлиф режущей поверхности круга с зёрнами КНБ до и после действия разряда. Видно, что эрозионное воздействие приводит к оплавлению связки и выбросу ее материала на зёрна. В работе [71] установлен ряд особенностей электроэрозионного воздействия на изменение элементного состояния режущей поверхности кругов из СТМ, состоящих в следующем:

1. С повышением напряжения источника импульсного тока ИТТ-35 от 30 до 60 В существенного изменения в элементном составе продуктов плавления в зоне разряда связок с основами Cu–Sn и Cu–Sn–Sb не наблюдается:

Напряжение, В	30	40	50	60
Медь, ат. %	70,8	78,7	73,5	77,4
Олово, ат. %	13,3	13,4	14,9	13,2
Сурьма, ат. %	10,0	6,3	8,5	6,9
Алюминий, ат. %	5,6	0,5	1,6	1,6

В то же время, на связках с основой Cu–Al–Zn с ростом напряжения источника тока в продуктах плавления при электроразрядах количество меди и алюминия возрастает:

Напряжение, В		30	40	50
Медь,	ат.%	15,1	22,2	21,4
Алюминий,	ат.%	54,4	57,3	68,1
Цинк,	ат.%	9,1	10,4	1,6
Кремний,	ат.%	17,5	8,3	5,7

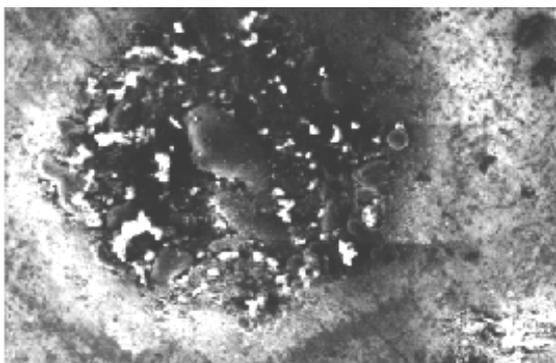


Рис. 6.28. Влияние электрических разрядов на связку М2-12Э

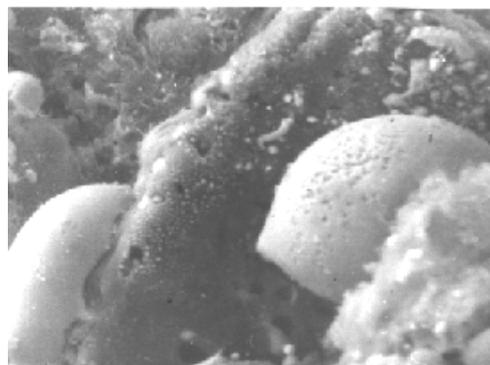


Рис. 6.29. Влияние электрических разрядов на алмазное зерно с покрытием МА в связке В1-13

2. Принципиальной разницы в элементных составах продуктов плавления (шариках) при электроразрядах на воздухе и в воде не наблюдается. Так, для связки М2-12Э содержание элементов в этом случае равно соответственно в ат.‰: Cu – 76,8 и 70,9; Sn – 13,9 и 13,3; Sb – 5,7 и 10,0; Al – 1,9 и 5,6.

3. При электроэрозионном воздействии на связку круга с основой Cu–Al–Zn в продуктах электроразряда наблюдается преимущественное содержание меди и алюминия: Cu – повышается с 26,8 до 35,6 мас.‰, а Al – с 29,4 до 41,4 мас.‰, в то же время, Zn снижается с 12,9 до 7,4 мас.‰.

4. Характерно то, что при действии электроразряда на связку с основой Cu–Sn в лунках наблюдаются продукты плавления в виде шариков (рис. 6.29), а на связках с основой Cu–Al–Zn их нет (рис. 6.30, а), однако при этом в лунках возникают термические трещины (рис. 6.30, б).

5. Электроэрозионный разряд, который произошел возле зерна СТМ, имевшего никелевое покрытие, раскрывает поверхность вокруг зерна и на нем вместо сплошного покрытия остаются островки расплава Ni и Cu в соотношении, соответственно, 55,2 и 44,8 ат. ‰. Медь, при этом, поступает из связки (рис. 6.30).

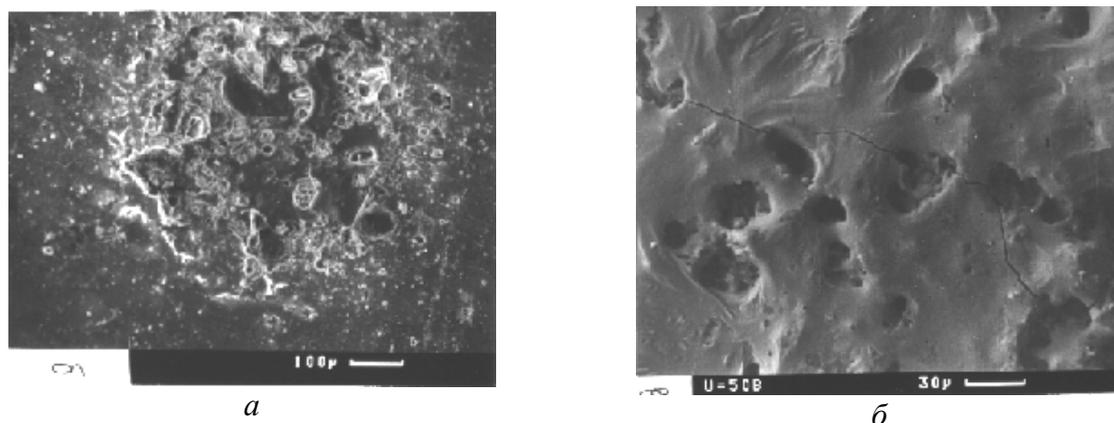


Рис. 6.30. Влияние электрических разрядов на связку MO13Э: *a* – общий вид, *б* – в глубине лунки

6. Выявлено соответствие процессов, происходящих при обычном плавлении связок и при действии электроразряда (ат. %):

Элементы	Исходная связка	Плавленный шарик (рис. 6.32)	Шарик после электроразряда (рис. 6.33)
Медь	52,8	82,6	77,6
Олово	18,2	11,8	14,5
Сурьма	12,3	5,5	6,4
Алюминий	15,8	–	–

Как видим, плавленный шарик связки с основой Cu–Sn–Sb и шарик на поверхности этой же связки после электроразряда имеют одинаковый элементный состав.

7. Установлено [71], что двухкомпонентные связки на основе Cu–Sn при плавлении образуют шарик, который сосредотачивает в себе весь материал связки (рис. 6.31). На поверхности шарика находится больше Sn, чем в глубинных слоях. Содержание меди и олова на поверхности соответствует δ -фазе ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$), а в середине шарика β -фазе (Cu_5Sn). По мере удаления от поверхности шарика количество Cu снижается, а Sn – растет (рис. 6.33):

Элементы связки, мас. %	Поверхность шарика, (рис. 6.31)	Сечение шарика, (рис. 6.33, <i>a</i>)		
		т. 1	т. 2	т. 3
Медь	65,7	87,4	78,0	77,0
Олово	32,3	11,9	19,0	21,9

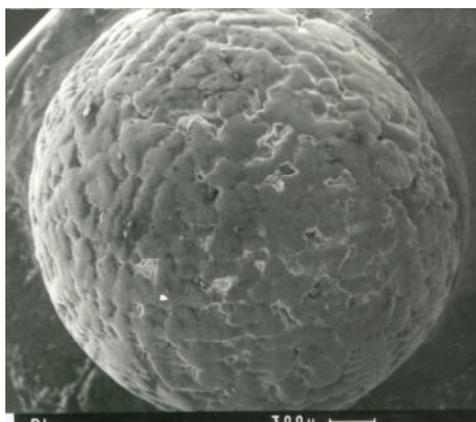


Рис. 6.31. Шарик плавления образца связки на основе Cu-Sn (M2-01)

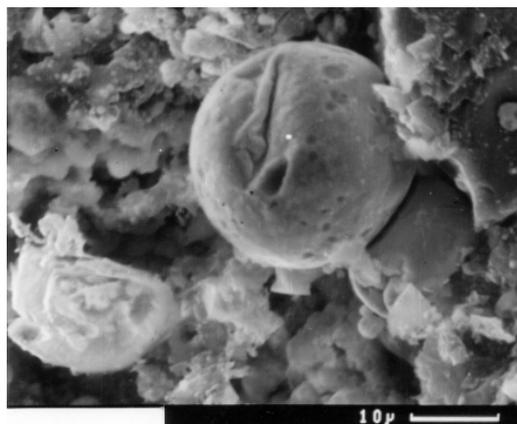
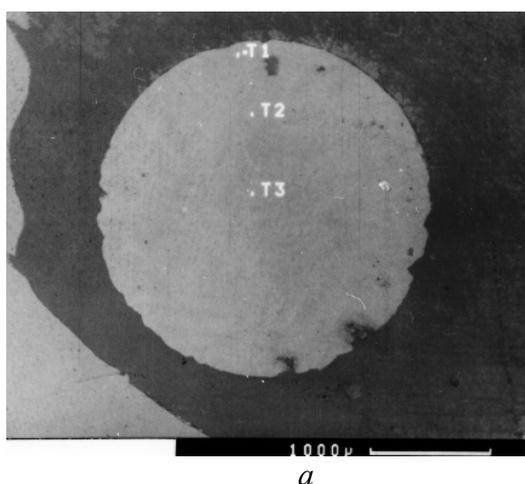
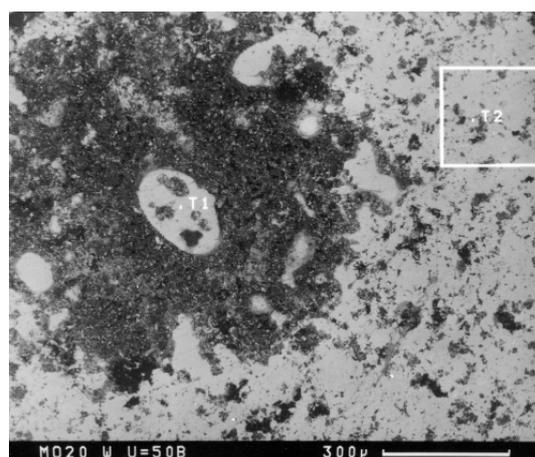


Рис. 6.32. Шарик плавления при электроэрозии на связке M2-12Э



а



б

Рис. 6.33. Поперечные разрезы шариков плавления связки M2-01 (а) и шарика в лунке электроэрозии на связке M2-12Э (б)

Исследования фазового состава поверхностных слоев алмазных инструментов на металлической связке M2-01 после электроэрозионной правки установлено, что рентгенограммы, снятые со слоев, расположенных на определенной глубине от поверхности обработки, свидетельствуют об отсутствии полиморфного превращения алмаза в графит. Вероятно, это является следствием хорошей теплопроводности медно-оловянной связки и относительно малой протяженности тепловых воздействий при электроэрозионных разрядах. Образец до обработки имел отражение от трех фаз: α (твердый раствор олова и меди), β (Cu_5Sn) и δ ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$). Исчезновение отражения от двух фаз в поверхностном слое после электроэрозионной обработки свидетельствует о том, что происходит выплавление β -фазы и

выкрашивание хрупкой δ -фазы. Поэтому в поверхностном слое присутствует только основная фаза связки – α -фаза и ε -фаза (Cu_3Sn), образующиеся при распаде δ -фазы: $\delta \rightarrow \alpha + \varepsilon$. Подобный эвтектоидный распад является возможным, поскольку δ -фаза при 380°C является нестойкой [91].

Исследования электроэрозионной стойкости металлических связок проводили [401] с использованием генератора импульсов ШГИ 40-440 при частоте 44 кГц, продолжительности и энергии импульсов – 4 мкс и 0,05 Дж, времени обработки 5 мин. Эрозионную стойкость оценивали величиной относительного износа – отношением объема материала, снятого с катода (ШХ15), к объему материала связки, снятого за время обработки. Данные электроэрозионной стойкости связок представлены в табл. 6.15.

Таблица 6.15. Электроэрозионная стойкость металлических связок [401]

Связка	Состав, масс. %	Относительная стойкость
M2-01	20 % Sn + 80 % Cu	0,30
M6-15	M2-01 + Fe_3O_4	0,50
M5-04	M2-01 + силикаты	0,55
M6-14	32 % Cu + 8 % Sn + 51 % Fe + 9 % Ni	1,54
M6-16	93 % Co + 6 % Cd + 1 % FeS	2,20

После электроискрового воздействия приповерхностный слой связки M2-01 имеет мелкокристаллическую структуру. Толщина слоя с измененной структурой составляет приблизительно 5 мкм. Выявлено, что α -фаза имеет микротвердость 1,7 ГПа, а эвтектоид ($\alpha + \beta$) – 3 ГПа (β -фаза – электронное соединение Cu_5Sn). Рентгеноструктурные исследования показывают, что в поверхностном слое обработанной связки M2-01 образуется ε -фаза (Cu_3Sn), которая имеет повышенную твердость и хрупкость в сравнении с α - и β -фазами. С повышением продолжительности и энергии импульсов содержание ε -фазы увеличивается, а содержание α - и β -фаз снижается. Вследствие этого, после электроэрозионного воздействия поверхностный слой связки M2-01 становится более хрупким, что наряду с эрозионным съемом повышает износ связки M2-01 в процессе эксплуатации [401].

Рентгенографические исследования связки M6-14 показали, что в исходном состоянии она содержит следующие фазы: α -Fe, α -Cu и электронное соединение Cu_5Sn . После электроэрозионного воздействия интенсивность линий указанных фаз снижается и вследствие процессов закаливания появляются линии фазы CuSn [401]. Исследования связки M6-16 показали, что в исходном состоянии она содержит преимущественно α -Co (гексагональная модификация) и β -Co (кубическая, высокотемпературная модификация). После электроэрозионного воздействия в обработанном слое повышается содержание высокотемпературной модификации. Плас-

тичность кобальта является максимальной, если в его структуре превалирует β -фаза, поэтому возможно утверждать о повышении пластичности связки М6-16 после электроискрового воздействия [401].

Обратим внимание на то, что при чистовых режимах алмазно-искрового шлифования энергия электрических разрядов не превышает 0,005–0,020 Дж [402]. Укажем, что распределение разновысотности зерен при алмазно-искровом шлифовании описывается распределением Вейбулла и при этом, концентрация алмазных зерен в рабочем слое от 50 до 150 % круга 1А1 – АС6 125/100–М2-01 при алмазно-искровом шлифовании стали Х12Ф4М не оказывает влияния на показатели параметра распределения разновысотности зерен [403].

Электроэрозионные и тепловые процессы на электрохрупких материалах являются особенно актуальными для процессов электрошлифования инструментальных материалов, содержащих карбид титана, которые достаточно чувствительны к действию электрических разрядов на их поверхность. Так, при воздействии электроразряда на поверхность сплава марки КНТ16 в его лунке возникают трещины. Микроанализ элементов сплаву (масс. %), находящихся в лунке, показывает, что после электроразрядов с поверхностного слоя в лунке теряется наиболее легкоплавкий элемент (Ni)

Элементы сплава	Титан	Никель	Молибден
Исходный сплав	61,5	16,4	5,9
Лунка разряда	70,6	3,1	5,4

а ослабленный слой сплава подвергается растрескиванию.

Не менее чувствительным является и карбид титана. В работе [71] рассмотрены особенности его поведения при воздействии высоких температур на примере керамик оксидно-карбидной группы. Выявлено, что нагрев керамик уже до 1700 К приводит к формированию трещин в поверхностном слое, и они же могут возникать при наличии электроразрядов в зоне обработки при электрошлифовании керамик, наряду с процессами их плавления. Потому в работе [71] впервые рассмотрены особенности плавления инструментальных керамик. Нагрев образцов керамик ВОК60, ВОК71 и ВО13 проводили до 2400 К, когда происходит плавление Al_2O_3 , что ближе к реальным условиям электроэрозионного разряда. Установлено, что оксидная керамика начинает плавиться при 2313 К. После нагрева до 2443 К и охлаждения образец (куб 3×3×3 мм) принимает форму тигля (рис. 6.34, а), причем на его периферии наблюдается корка плавления (рис. 6.34, б), а в центре – правильные кристаллы (рис. 6.35, а). Разницы в элементных составах корки и кристаллов не наблюдалось. В отличие от оксидных керамик оксидно-карбидные, например, ВОК60, при нагреве до 2443 К плавятся в каркасе. Характерным является образование большого

количества пор, на внутренней поверхности которых, формируются кристаллы, как продукты плавления и охлаждения (рис. 6.35, б). Количественный анализ элементного состава кристаллов показывает, что они содержат алюминий, углерод и кислород и практически не содержат титан. Приблизительно их состав возможно определить как $Al_3O_2C_6$. В то же время, на изломе образца, в месте между порами, характерным является отсутствие углерода и наличие повышенного содержания титана [71].

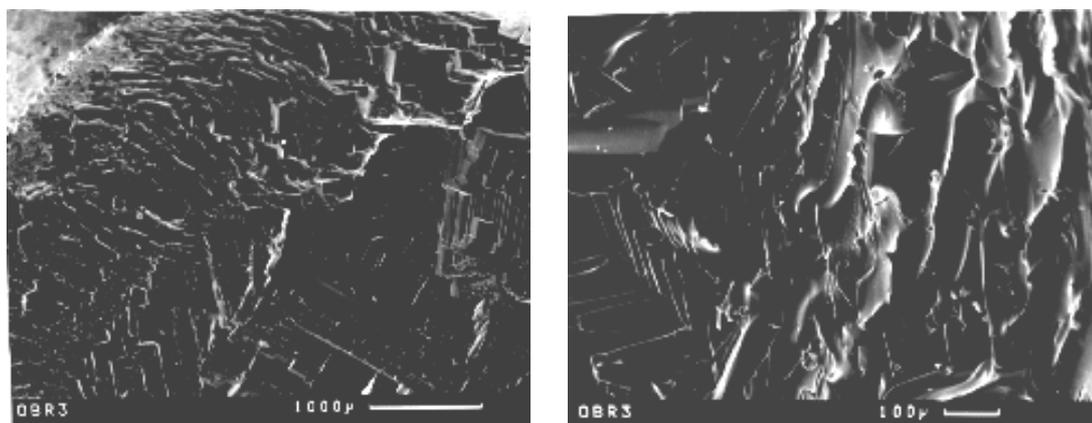
*a**б*

Рис. 6.34. Плавная оксидная VO13 керамика: *a* – общий вид; *б* – корка плавления

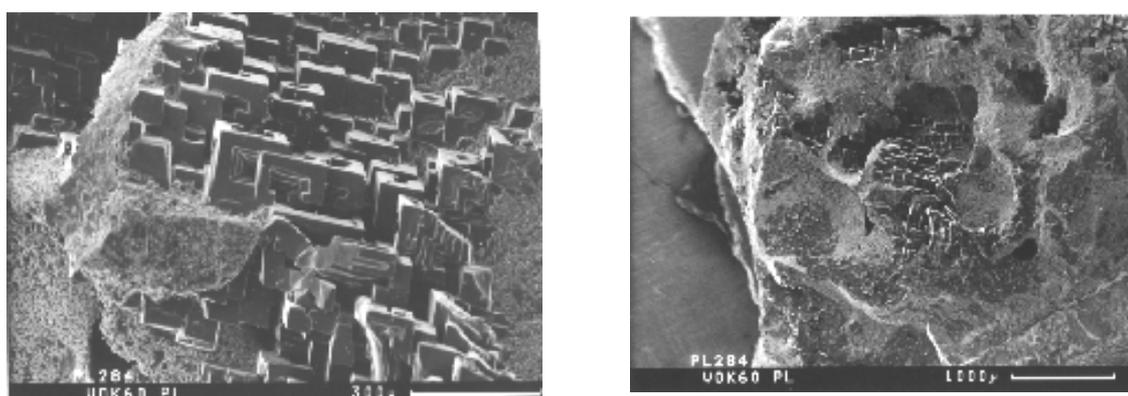
*a**б*

Рис. 6.35. Плавная оксидно-карбидная VOK60 керамика: *a* – кристаллы; *б* – излом плавленого образца

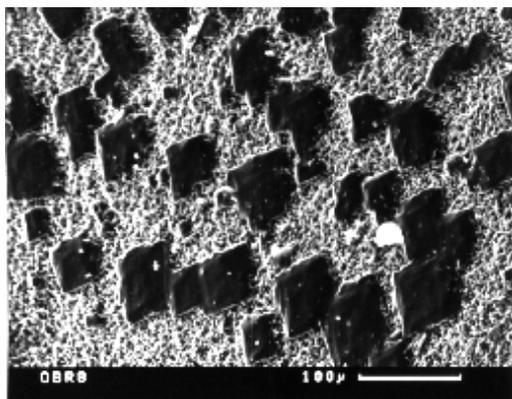
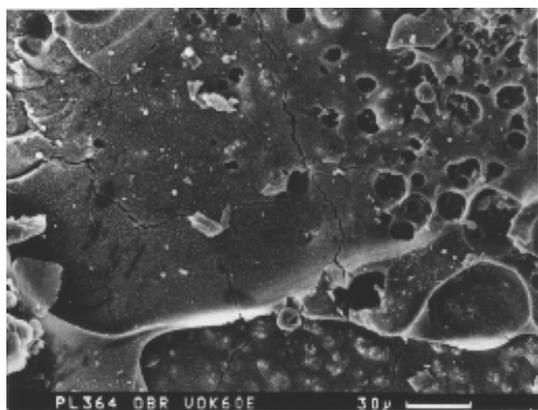


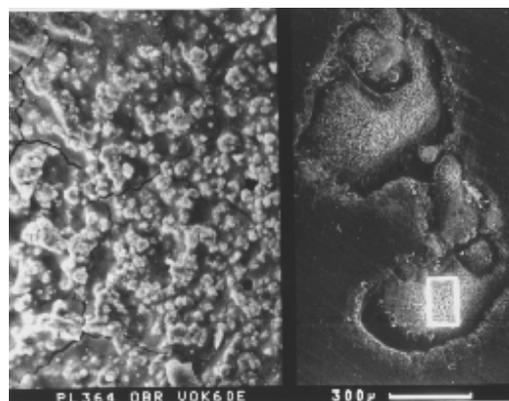
Рис. 6.36. Корка плавления на оксидно-карбидной керамике ВОК71

Аналогичные процессы происходят и при плавлении керамики ВОК71. Однако наблюдается и отличие: на поверхности не образуется общая алюминио-кислородная корка, как на ВОК60, а наблюдается выход отдельных кристаллов на поверхность (рис. 6.36). Обратим внимание, что и в этом случае образуются поры с наличием кристаллов [71].

Учитывая изложенные выше данные по нагреву и плавлению, рассмотрим особенности электроэрозионного воздействия на поверхность керамических материалов. Как и следовало ожидать, электроразряды вызывают трещины в лунках (рис. 6.37). Аналогично процессам термического плавления, и в этом случае образуются корки плавления. Количественный анализ продуктов плавления показывает, что в лунках образуется структура, близкая к излому образца после плавления, в которой отсутствует кислород. Приблизительный состав поверхности излома после плавления – $Al_{10}Ti_2O_{15}$, а в лунке разряда – $Al_{15}Ti_2O_{26}$.



a



б

Рис. 6.37. Влияние электроразрядов на поверхность керамики ВОК60: *a* – трещины в лунке, *б* – лунки разряда

Описанные процессы изменения поверхностного слоя при действии разряда характерны и для других электрохрупких материалов. Так, при достаточно высокой производительности шлифования ($1380 \text{ мм}^3/\text{мин}$) электроэрозионные разряды, попадая на поверхность магнитотвердых сплавов,

приводят к резкому тепловому воздействию и, как следствие, к их растрескиванию [71].

Для того, чтобы оценить особенности электрошлифования керамик оксидно-карбидного типа, необходимо в первую очередь оценить уровень их электропроводности. Известно [404], что электросопротивление оксидных керамик является достаточно большим ($10^9 \dots 10^{12}$ Ом·м). С повышением температуры оно спадает и составляет при 1273 К уже 10^5 Ом·м. Для нас большой интерес представляет оксидно-карбидная керамика, электросопротивление которой существенно меньше – $3,3 \cdot 10^{-2}$ Ом·м [357], что связано с введением в нее карбида титана, удельное электросопротивление которого, составляет $5,3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Таким образом, добавкой TiC в оксидную керамику возможно существенно улучшить ее электрофизические свойства.

Горячепрессованная оксидно-карбидная керамика неоднородна в микромасштабе и однородна в макромасштабе, содержит большое количество примесных центров рассеивания, как тепловых, так и объемных. Кроме того, на сопротивление влияет прослойка между зернами керамики с другим химическим составом со значительным отклонением от стехиометрии зерна матрицы, контакт материалов разной структуры и т.п. [404]. Анализ поверхности проведенный [71] с помощью микроанализатора «Кемскан-4ДВ» по распределению титана на ней показывает, что керамику ВОК60 по структуре в наибольшей степени можно отнести к статистическим системам, состоящих из зерен, расположенных хаотично и нерегулярно. Рассчитать электропроводность статистической системы по электропроводности составляющих ее фаз (γ_1 и γ_2) принципиально возможно, если известны объемное содержание (c_1 и c_2) каждой фазы [405]. Однако, расчеты при значениях γ_{TiC} и $\gamma_{Al_2O_3}$, которые значительно, как в нашем случае, отличаются, приводят к значительной погрешности. В связи с вышеизложенным, для расчета электропроводности таких керамик предложен другой подход, который исходит из концентрации носителей заряда. В оксидной керамике потенциальный барьер на границе зерна является значительным, а концентрация носителей низкая. В преимущественном большинстве случаев электропроводность керамики носит ионный характер и более подвижными являются те ионы, которые находятся в межузлиях и дефектах кристаллической решетки. Тогда, в общем виде, электропроводность керамики может быть обчислена по формуле [404]:

$$\gamma_K = q_n \cdot n_n \cdot u_n.$$

В композиционной керамике n_n и u_n являются переменными. С повышением концентрации TiC в ней, количество носителей возрастает. При этом, структура межзеренной прослойки изменяется: зерна TiC вкореня-

ются в алюмошпинель, нарушая ее цельность (TiC взаимодействует с MgO, создавая новые фазы [404]). Хотя концентрация носителей возрастает, их подвижность остается низкой. С дальнейшим повышением содержания TiC (более 15 %) отдельные зерна TiC соединяются в цепочки, образуя непрерывный объемный наполнитель. Тем самым, тип системы изменяется из матричной на статистическую, в которой концентрацию носителей можно рассчитать как:

$$n_H = \gamma_{TiC} \cdot c_V \cdot N_A / M.$$

Рассеивание носителей на нейтральных дефектах не зависит от температуры [406], а размер зерна Al_2O_3 – от содержания TiC в керамике. Поэтому количество объемных центров рассеивания уменьшается со снижением доли Al_2O_3 . Изменение подвижности носителей имеет нелинейный характер и с учетом данных работ [407, 408], оно может быть записано в виде:

$$u = u_0 \cdot \exp[F(c)],$$

где u_0 – подвижность носителей в металлоподобном TiC, равная $u_0 = 1 / (q_H \cdot n_0 \cdot \rho_{V_0})$.

Пользуясь приведенными выше уравнениями можно получить зависимость удельного электросопротивления композиционной керамики оксидно-карбидного типа от содержания TiC в следующем виде:

$$\rho_V = \rho_{V_0} \cdot \exp[F(c_V)] / c_V.$$

Для анализа этой экспоненциальной зависимости экспериментально определено [409] электросопротивление образцов размерами $5 \times 5 \times 35$ мм из керамики ВОК60, которая содержала 15, 20, 25, 30, 40, 50 и 60 об. % TiC. Электросопротивление образцов измеряли методом двойного моста с помощью специального приспособления, а экспериментальные данные обрабатывали с помощью программ, позволяющих, исходя из метода наименьших квадратов, проводить расчеты при аппроксимации заданной дискретной функции $f(x)$ функциями типа $f(x) = ae^{bx^n}$ или $f(x) = ae^{bx^n + cx^k}$.

Установлено, что при содержании 15–60 % по объему карбида титана в керамике электросопротивление смеси удовлетворительно (относительная погрешность значений электросопротивления составляет 49,4 %, а их логарифмов 12,8 %) описывается как:

$$\rho_V = \frac{\rho_{V_0}}{c_V} \exp \left[4,4c_V^{2,5} + \frac{1}{5,65c_V^{2,5}} \right].$$

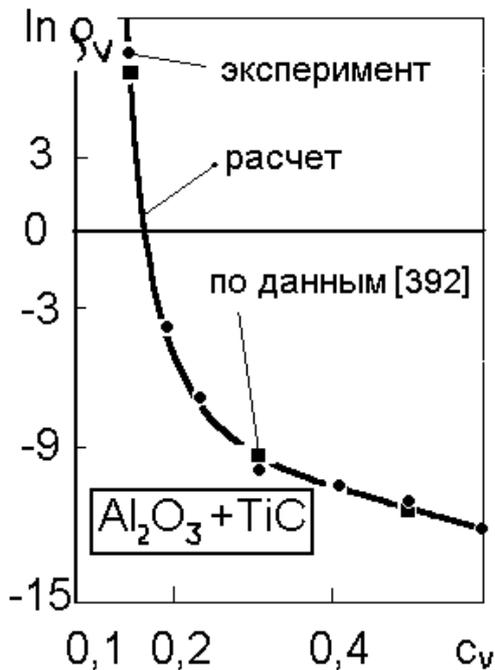


Рис. 6.38. Зависимость логарифма удельного электросопротивления горячепрессованной смеси $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ от удельной доли карбида титана в ней

Для проверки зависимости $\rho_V(c)$, которая в полулогарифмическом виде приведена на рис. 6.39, использованы данные экспериментов по определению при 293 К электросопротивления керамики, содержащей 15, 30 и 50 % TiC [410]. Из рис. 6.38 видно, что экспериментальные данные удовлетворительно совпадают с расчетными. Разброс в результатах экспериментов можно объяснить тем, что образцы из-за намола содержат определенные добавки металлов (W , Fe). Кроме того, хотя горячепрессованная керамика теоретически безпориста (пористость не превышает 0,5 %), однако поры, хотя и в небольшом количестве, все же присутствуют, а также имеются разного рода объемные и линейные дефекты, играющие роль центров рассеивания. Но в целом, как нам представляется, приведенная формула пригодна для расчета электросопротивления горячепрессованной смеси $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiC}$, содержащей от 15 до 60 % TiC . Из анализа зависимости ρ_V-c возможно предположить, что в интервале содержания TiC 5–15 % в керамике идет процесс формирования непрерывного электропроводного каркаса. Количество объемных дефектов сокращается, проводимость повышается. Начиная с 15 %, добавки TiC в оксидную керамику гарантированно обеспечивают удовлетворительную для электрошлифования проводимость.

Исследования по электрошлифованию проводили на модернизированном универсально-заточном станке 3В642 при обработке керамики марки ВОК60. В качестве электролита использовался водный раствор солей NaNO_3 – 5 масс. % и NaNO_2 – 0,5 масс. %. Использовались круги на металлической связке МО20-2 и электропроводной металлополимерной связке В1-13. Характерным для процесса электрошлифования оксидно-карбидной керамики является достаточно низкий уровень значений технологического тока. При этом, в диапазоне напряжений 2–10 В технологический ток с повышением напряжения растет пропорционально (рис. 6.39), что позволяет сделать вывод об отсутствии активной пассивации поверхности керамики, поскольку при наличии, как это было указано нами выше, на обрабатываемой поверхности анодных оксидных пленок

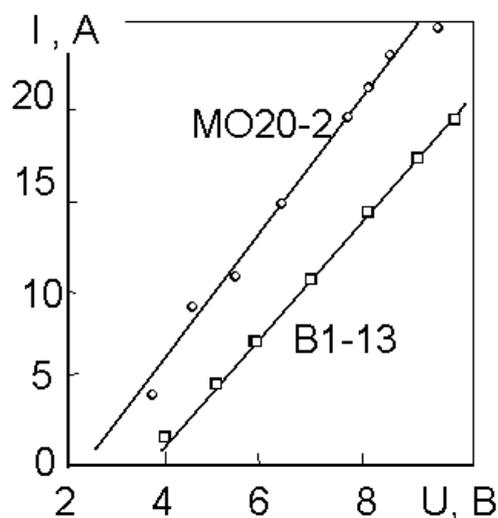


Рис. 6.39. Зависимость величины тока от напряжения при электрошлифовании керамики ВОК60 кругами АС6 100/80 100 % на разных связках

зависимость «напряжение–ток» имеет перегиб. А вот катодные пленки на поверхности круга формируются, и как раз их наличие и дает нам возможность достичь позитивный эффект. Данные по электрошлифованию керамики ВОК60 приведены в табл. 6.16, из которой видно, что введение электрического тока в зону обработки позволяет снизить износ кругов, как на металлической (в 1,65 раза), так и на металлополимерной (в 2,15 раза) связке.

Повышенный износ алмазных кругов при шлифовании керамики связан с активным истирающим воздействием шлама на связку круга. Поэтому, снижение износа кругов при электрошлифовании вызвано, во-первых, своеобразной «овализацией» частичек шлама, за счет электро-разрядов в зоне обработки, и снижением, вследствие этого, их абразивного воздействия на поверхность круга, которая к тому же покрыта износостойкой катодной пленкой. В пользу «овализации» говорит и тот факт, что на металлополимерной связке эффект снижения износа оказался большим. Это указывает на то, что электроэрозионные разряды в большей степени разрушают металлическую связку, чем полимерную с металлическим наполнителем.

Таблица 6.16. Показатели процесса электрошлифования оксидно-карбидной керамики ВОК60

Характеристика круга	U, В	I, А	Q, мм ³ /мин	N _{эф} , кВт	q _p , мг/г
АС6 100/80–МО20-2–100	0	–	800	0,66	0,53
	8	21,0		0,62	0,32
АС4 100/80ма–В1-13–100	0	–	1050	0,65	1,30
	7	10,5		0,62	0,60

Указанное нами выше влияние пленок на поверхностях круга и обрабатываемого изделия отражается также и на эффекте снижения коэффициента трения при введении электрического тока в зону обработки, или эффекте «смазывания» электрическим током [117]. Укажем, что в соответствии с традиционными представлениями [411], при электрическом скользящем контакте токовую нагрузку можно рассматривать как дополнитель-

ный входной фактор фрикционной системы, наряду с механической нагрузкой, скоростью, температурой, промежуточной средой и др., что приводит к изменению ее внутренних факторов (шероховатости, свойствам пленок, тепловыделению в зоне трения, структуре и механических свойствах приповерхностных слоев, т.п.), а это, в свою очередь, отражается на фрикционных характеристиках. Для самосмазывающихся контактных материалов, например, электрощеточных, повышение токовой нагрузки приводит к снижению коэффициента трения. При эксплуатации электрических машин эти изменения настолько ощутимы, что во многих случаях речь идет о «смазывающем» действии электрического тока или о «смазке током». Отличительной особенностью материалов, для которых наблюдается эффект смазывания, является хрупкость, а также относительно низкие (в сравнении с металлами) модуль и граница упругости. Основной причиной, обуславливающей такой эффект, признается тепловое влияние электрического тока на поверхность материала [411].

В работе [117] была принята рабочая гипотеза о том, что электроконтактные процессы при электрошлифовании необходимо рассматривать не с точки зрения непосредственного пробоя промежутка, а с точки зрения взаимодействия скользящих электрических контактов, поэтому возник вопрос о существовании и использовании описанного эффекта «смазывания» для подтверждения выдвинутой гипотезы. Исследованиями [117] установлено, что при наложении потенциала на зону фрикционного контакта, применительно к условиям электрошлифования кругами из СТМ, наблюдается изменение скачком коэффициента трения в диапазоне 0–9 В, причем характер такого изменения зависит от материалов контактных поверхностей (рис. 6.40). Анализ рисунка показывает, что в поведении кривой $f = f(U)$ можно выделить 4 этапа: 1-й – коэффициент трения снижается; 2-й – коэффициент возвращается в исходное состояние; 3-й – коэффициент продолжает повышаться, пройдя исходное состояние; 4-й – коэффициент трения стабилизируется. Укажем, что первый и второй этапы как раз и характеризуют эффект «смазывания» током, когда коэффициент трения является меньшим, чем исходный, что и подтверждает гипотезу работы [117]. Как видно из рис. 6.41 этот эффект приходится на диапазон напряжений 0–6 В в зависимости от материала контактов. Более четко он проявляется при сравнении материалов, когда один из них имеет меньшие значения модуля упругости по отношению к другому, например, металлополимерной связки с металлической, или стали Р6М5 с твердыми сплавами. Для вольфрамовых твердых сплавов, имеющих наиболее высокий модуль, эффект «смазывания» имеет место, но в меньшей степени. В целом, можно утверждать, что в условиях электрошлифования инструментальных материалов кругами из СТМ эффект «смазывания» током наблюдается в

следующих диапазонах напряжений: для быстрорежущих сталей – 0–6 В (наилучше 4 В); для вольфрамовых твердых сплавов – 0–3 В (наилучше 1 В); для БВТС – 0–2 В (наилучше 1 В) [117].

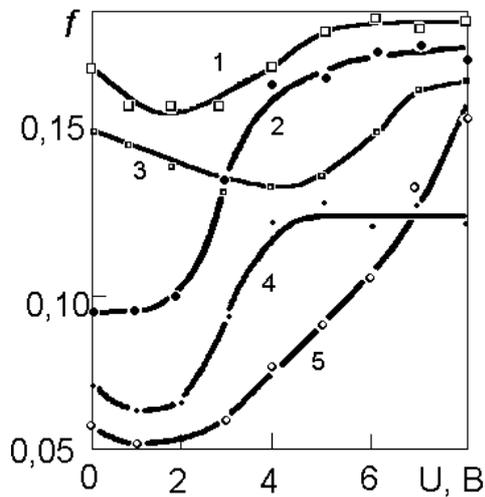


Рис. 6.40. Зависимость коэффициента трения от напряжения технологического тока в зоне контакта: 1 – полимерной связи ВСЭ по сплаву ТН20; 2 – БВТС по металлическим связкам; 3 – стали Р6М5 по металлической связке МО20-2; 4 и 5 – сплавов Т15К6 и ВК8 по металлическим связкам [117]

Еще одним примером использования электроэрозионных процессов является электрическая правка шлифовальных кругов из СТМ как один из вариантов возобновления режущей способности шлифовальных кругов или размерной правки. Наиболее распространенный метод – правка кругов из СТМ, основанная на воздействии обычных абразивных материалов (электрокорунда белого и карбида кремния зеленого) на режущую поверхность круга. Правка тут главным образом состоит во воздействии абразивных зерен на связку, в ее разрушении и раскрытии зерен СТМ. Однако, после такой правки зерна выступают на связке не более чем на 10 % от их размера. Более эффективными в этом направлении являются разные методы электрического воздействия на связку. Производительность электрической правки определяется преимущественно интенсивностью электроэрозионных процессов и, за счет выбора материала электрода, может быть повышена на 30–40 %. В работе [412] исследовались методы правки: электроискровой на обратной полярности (источник тока – выпрямитель ВУ300/12, напряжение – 7 В) и электроэрозионный (источник тока – выпрямитель ИТТ-35, напряжение – 60 В). Режимы правки: скорость вращения круга – 15 м/с, продольная подача – 1 м/мин, поперечная подача – 0,25 мм/дв.х. Размеры образцов электродных материалов – 10×20×200 мм. Технологическая жидкость – техническая вода. Правке подвергались алмазные круги – 12А2-45° 150×32×10×3–АС6С 100/80–М2-12Э–75. Для сравнения использовали абразивный брусок из электрокорунда 25АСМ1К5, алмазный брусок АС15 250/200–М2-01–100 и алмазный правящий карандаш типа МААС. При проведении испытаний контролировали износ правящего электрода в граммах, линейный износ алмазного круга в микрометрах и в качестве основного показателя регистрировали производительность ($Q_{пр}$) правки в мм³/г, а именно объем рабочего слоя круга, снятый при правке, приходящийся на 1 грамм правящего электрода. Чем большим является $Q_{пр}$, тем

более эффективным является процесс правки. Результаты испытаний приведены в табл. 6.18, из которой видно, что электродные правящие материалы условно можно разделить на три группы:

А – материалы, образующие при правке длинную сливную стружку, которая плотно пакетирует промежуток и вызывает интенсивные электроэрозионные процессы. К ним относятся – медные сплавы и стали. Данные материалы от 3 до 10 раз превышают производительность материалов группы Б;

Б – группа материалов, образующих при правке элементную стружку и имеющих в процессе правки удовлетворительную производительность правки. К ним относятся – алюминиевые сплавы, чугуны и латуни;

В – группа абразивных правящих материалов, из которых абразивный брусок фактически в 60 раз по производительности уступает алмазному бруску при правке с током, а правящему карандашу в 150 раз.

Таблица 6.17. Сравнение показателей электроправки при различных электродных правящих материалах

Правящий материал				Электроискровая правка		Электроэрозионная правка	
Группа	Материал	Плотность $\cdot 10^3$ кг/м ³	Твердость, <i>HRB</i>	<i>I</i> , А	$Q_{пр}$, мм ³ /Г	<i>I</i> , А	$Q_{пр}$, мм ³ /Г
А	Медь	8,9	53	300	472,0*	20	1136*
	Сталь	7,8	62	270	127,0	19	501
Б	Алюминий	2,8	75	25	42,6	7	244
	Чугун	7,0	85	120	44,7	9	192,3
	Латунь	8,6	78	40	7,8	13	128,2
В	25АСМК5	2,1	–	б/о*	4,6	охл.*	54,3
	Алм. брусок	7,5	104	–	–	20	3333**
	МААС	–	109	–	–	20	8333**

Примечание:

* – абразивная правка (б/о – без охлаждения, охл. – с охлаждением)

** – наблюдается засаливание круга

Анализ табл. 6.17 позволяет сделать следующие выводы:

- Наибольшую производительность правки обеспечивают правящие карандаши МААС и далее по мере снижения производительности в следующем ряду: алмазный брусок, медь, сталь, алюминий, чугун, латунь и абразивный брусок.

- Выявлено, что электроправка алмазными инструментами и электродом из меди имеет тот недостаток, что выправляемый круг теряет ре-

жущую способность после правки. Поэтому при их использовании следует снижать режимы правки, что снизит ее продуктивность. В связи с изложенным выше, электродные материалы необходимо выбирать из ряда: *сталь, алюминий, чугун.*

- Установлено, что электроэрозионная правка более производительна (приблизительно в 3 раза), чем электроискровая, что вызвано дополнительным, кроме перемигания промежутка стружкой, электроэрозионным воздействием на связку круга.

- Абразивными брусками следует проводить правку только с охлаждением, поскольку без охлаждения производительность правки падает до 10 раз.

- Установлено, что шероховатость поверхности электродов при правке формируется приблизительно одинаковой, однако наблюдаются определенные тенденции, а именно:

- электроискровая правка дает большую шероховатость электродов в процессе правки, чем электроэрозионная, поэтому режущая способность алмазных кругов в первом случае после правки является более высокой;
- сталь и латунь имеют приблизительно одинаковую шероховатость электродов в процессе правки, алюминий и чугун меньшую в сравнении с ними, а это означает, что для повышения режущей способности круга, который правят, лучше использовать – латунь, и далее по мере снижения режущей способности – сталь, чугун, алюминий.

6.4. Шлифование кругами из СТМ с дополнительным плазменным воздействием на режущую поверхность кругов

Плазменная обработка рабочей поверхности шлифовальных кругов из СТМ вызвана тем, что, наряду с указанными выше методами воздействия на режущую поверхность кругов, желательно иметь такой метод воздействия, который, наряду с определенными физическими воздействиями на возобновление режущей способности, позволял бы вносить дополнительные положительные изменения в поверхностный слой рабочей поверхности, например, такие как формирование необходимых пленок на нем или изменение физических свойств этого слоя.

Выбор рациональных параметров (режимов) плазменной обработки рабочего слоя кругов из СТМ выполнялся [413] по расчетной методике с дальнейшей экспериментальной проверкой. Основными управляемыми параметрами были мощность плазменной струи N (которая определялась

величинами тока I и напряжением U плазменной струи) и скорость перемещения плазматрона v . В исследованиях [413] указанные параметры изменяли в следующих границах: $N = 12\text{--}18$ кВт, $v = 16\text{--}90$ см/мин. Исследования показали, что наиболее уязвимыми для плазменной обработки являются круги на полимерных связках, когда хотя и наблюдается вскрытие зерен (рис. 6.41), однако имеют место поверхностные структурные изменения в виде выгорания верхнего рабочего слоя и образования трещин на рабочей поверхности. Выявлено, что для полимерных связок, чтобы не вносить негативного влияния на рабочую поверхность круга, необходимо

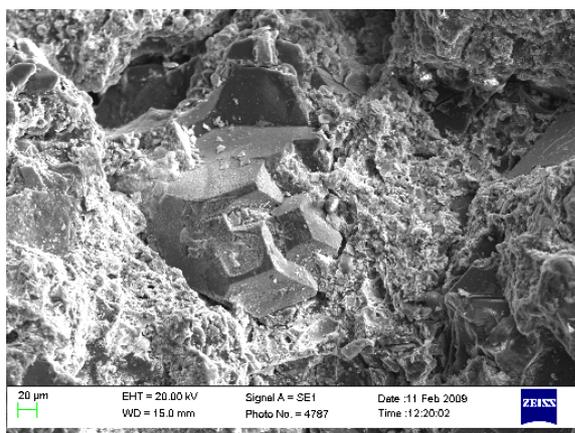


Рис. 6.41. Состояние режущей поверхности круга на полимерной связке В2-08 после умеренного плазменного воздействия ($N = 12$ кВт, $v = 25$ см/мин) [413]

ток плазменной струи держать поменьше (в пределах 150 А), а скорость перемещения струи – повышать. В том случае, когда нам необходимо достаточно активно воздействовать на рабочую поверхность, необходимо ток держать таким же небольшим, а вот скорость перемещения плазменной струи – снизить. В целом, для полимерных связующих шлифовальных кругов из СТМ основным выводом по регулированию плазменного воздействия является следующее: ток необходимо удерживать небольшим, а основным регулятором интенсивности воздействия является скорость перемещения.

В таком случае имеется возможность достичь необходимого эффекта раскрытия зерен без негативного явления по образованию трещин (рис. 6.41). Кроме того, обратим также внимание и на то, что при плазменной обработке возможным является достижения эффекта нанесения определенного покрытия, как на зернах СТМ (рис. 6.42, а), так и на связующем (рис. 6.42, б), что, как следствие, может изменить контактные процессы в зоне обработки при шлифовании.

Для металлических связующих аналогично имеют место поверхностные структурные изменения в местах интенсивного воздействия плазменной струи, проявляющиеся в плавлении связки (рис. 6.43). Выявлено, что для металлических связующих, чтобы не вносить таких негативных влияний на рабочую поверхность круга необходимо, аналогично полимерным связкам, ток удерживать меньшим, а скорость перемещения плазменной струи повышать.

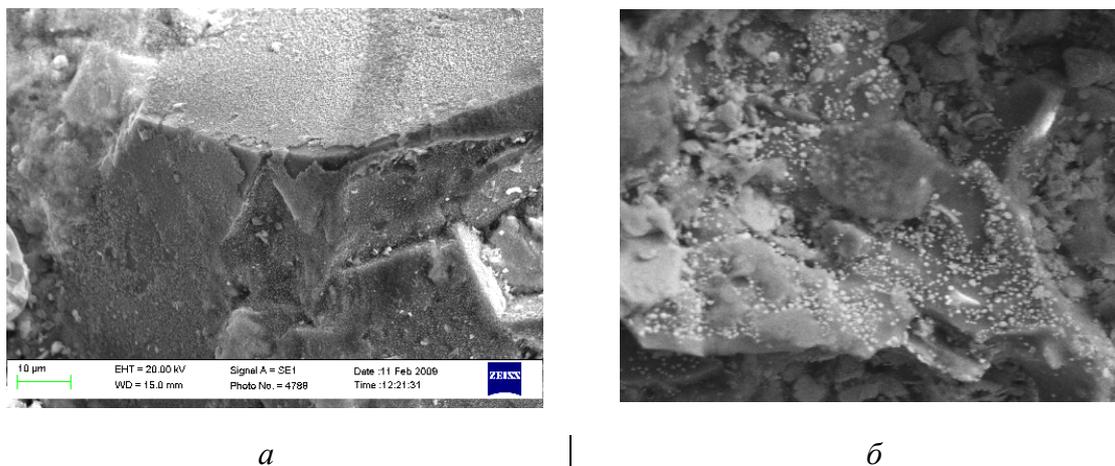


Рис. 6.42. Формирование пленок после плазменного воздействия на абразивном зерне (а) и полимерной связке В2-08 (б)

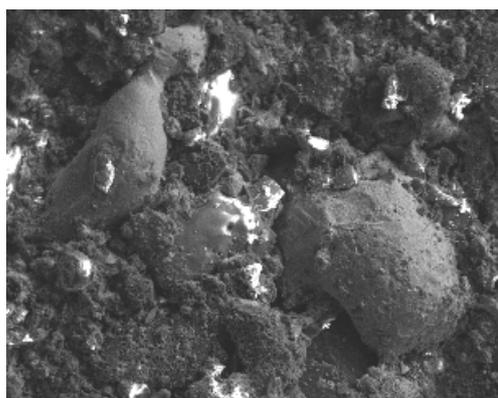


Рис. 6.43. Наличие участков с шариками плавления на режущей поверхности круга на металлической связке MO20-2 после интенсивного плазменного воздействия ($Q = 18$ кВт, $v = 25$ см/мин)

В том случае, когда имеется необходимость достичь повышенного воздействия, например, для таких связок как M2-01, то ток необходимо повышать, а скорость перемещения, наоборот, снижать. Тем самым, на металлических связующих регуляторах интенсивности плазменного воздействия выступают оба фактора. Это дает возможность достичь необходимого эффекта вскрытия зерен абразива без негативного эффекта образования трещин на связующем. Обратим также внимание на то, что и в этом случае при плазменной обработке возможно достичь срабатывания эффекта нанесения определенного покрытия как на зернах СТМ (рис. 6.44, а), так и на связующем (рис. 6.44, б), а это дает возможность регулировать контактные процессы в зоне шлифования [413].

Анализ элементного состава пленок, возникающих на абразивных зернах и связке в зоне плазменного воздействия, представленных на рис. 6.44, показал, что в них достаточно много кислорода, причем на зернах его фиксируется больше – от 26,7 до 33,6 масс. %, в тоже время, как на связующем его меньше – от 16,9 до 25,0 масс. %.

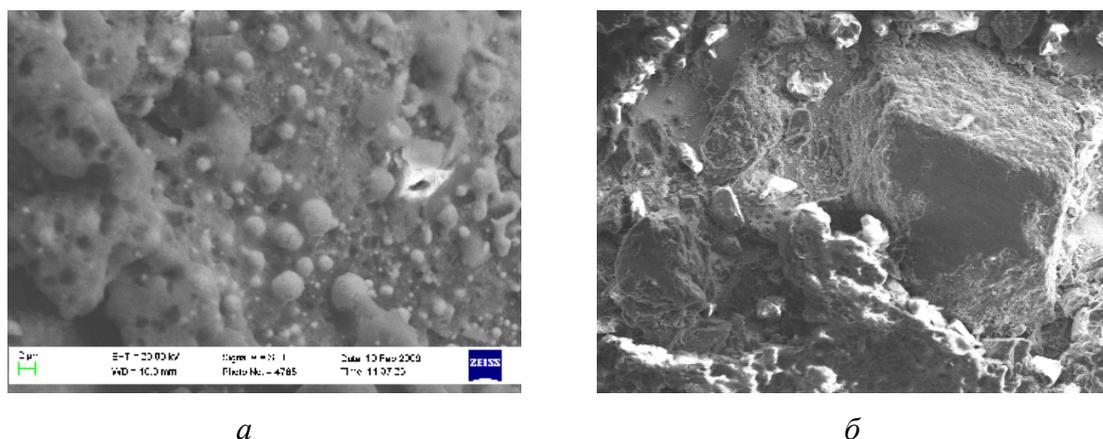


Рис 6.44. Формирование пленок после плазменного воздействия на связке MO20-2 (а) та абразивному зерне (б) [413]

Несколько другое и распределение элементов связующего, входящего в состав пленок. Если для исходной смеси связки MO20-2 соотношение между основными составляющими связки $\text{Cu} : \text{Sn} : \text{Sb}$ составляет $8,75 : 2 : 1$, то на абразивных зернах это соотношение уже такое – $5 : 2 : 1$, т.е. наблюдается сниженное количество меди. В свою очередь, на поверхности связующего указанное соотношение имеет вид – $8,95 : 3,78 : 1$. То есть, тут почти вдвое, а фактически в 1,79 раза, количество олова в пленке превышает исходное в смеси. На такое перераспределение элементного состава связки указывают и проведенные исследования на шлифе сечения связки в лунке действия плазменной струи (рис. 6.45). Так в глубине связующего (спектр 2, рис. 6.45) соотношение между медью и оловом составляет – 4, а на поверхности лунки оно равно – 2,88 (спектр 3, рис. 6.45) и 1,28 (спектр 4, рис. 6.45). Это свидетельствует опять же о том, что после плазменного воздействия в поверхностном слое связки олова становится больше. Такое перераспределение более характерно для мощного плазменного воздействия и влияет оно также и на изменение твердости рабочего слоя круга.

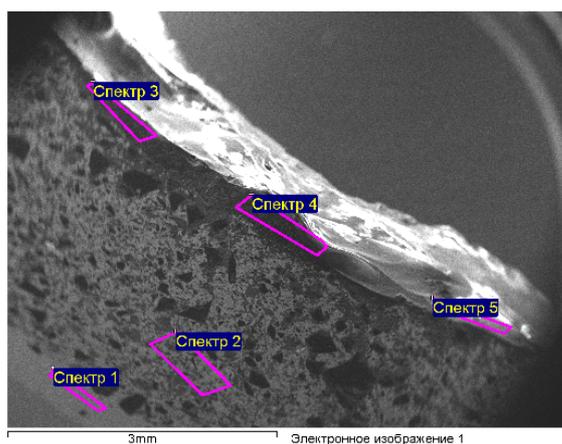


Рис. 6.45. Структура сечения рабочего слоя круга на связке MO20-2 в зоне образования лунки от действия мощной плазменной струи ($Q = 18$ кВт, $v = 25$ см/мин) [413]

Так, при отсутствии плазменного воздействия твердость рабочей поверхности круга на

связке MO20-2 составляет 99 HRB. По краях лунки мощного плазменного воздействия – 95–97, а в центре лунки твердость – 93 HRB [413].

Вместе с тем, плазменная обработка разной интенсивности может приводить не только к снижению твердости рабочей поверхности круга, но и к ее повышению, когда происходит только частичное перераспределение легкоплавкой составляющей связующего вследствие теплового воздействия плазменной струи. Исследования по выявлению упрочняющего действия (по повышению твердости рабочего слоя круга на металлической связке MO20-2), проведенные при разных мощностях плазменной струи (сила тока в 150 и 200 А) и разных скоростях перемещения плазменной струи вдоль рабочей поверхности круга (от 16 до 50 см/мин) выявили (рис. 6.46), что в целом наблюдается общая тенденция в повышении твердости рабочего слоя круга, однако с повышением скорости перемещения твердость снижается. При этом, на токе в 200 А увеличение скорости перемещения свыше 30 см/мин фактически приводит к разупрочнению рабочего слоя круга. Тим самым, выявлено, что в зависимости от того, на что именно направлена плазменная обработка – на изменение рабочей поверхности круга в виде упрочнения рабочего слоя та создания на нем необходимых функциональных пленок, или – на преимущественное обеспечение хорошего выступания зерен и повышения недостаточной режущей способности, путем разупрочнения рабочего

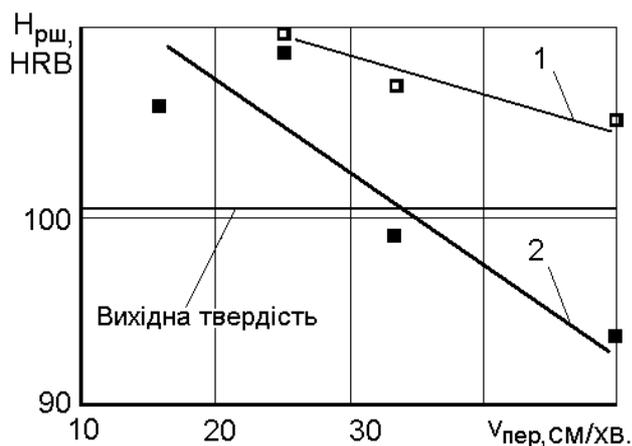


Рис. 6.46. Изменение твердости рабочего слоя круга на связке MO20-2 после воздействия плазменной струи от скорости его перемещения при силе плазменного тока: 1 – 150 А, 2 – 200 А

го слоя, это возможно регулировать через интенсивность плазменного воздействия и его направленность.

Приведенные выше исследования и выводы из них позволяют сделать предположение о том, что плазменное воздействие на режущую поверхность круга вследствие изложенных выше эффектов в виде создания пленок с измененным элементным составом поверхности связки и зерен может привести к повышению износостойкости шлифовальных кругов. Исследования процесса шлифования твердого сплава ВК6 при производительности обработки в 100 мм³/мин алмазным кругом 12A2-45° 125×5×3×32-AC6 125/100-M2-01-100 после различных методов воздей-

ствия на режущую поверхность круга проводили на исследовательском стенде, созданном на базе модернизированного универсально-заточного станка мод. 3В642. Установлено, что после предварительного механического воздействия на режущую поверхность круга свободным абразивом относительный расход алмазов в круге составил 1,2 мг/г. После электроэрозионного воздействия при $U = 30$ В, $I = 2$ А относительный расход алмазов – 1,97 мг/г. А после плазменного воздействия – предварительной правки режущей поверхности круга плазменной струей при $I = 150$ А, $v_{\text{пер}} = 25$ см/мин относительный расход алмазов составил – 0,87 мг/г. Это говорит о том, что предварительное плазменное воздействие именно небольшой интенсивности позволяет в сравнении с механическим абразивным воздействием повысить износостойкость круга в 1,4 раза, а также необходимо указать на то, что после плазменного воздействия происходит более «мягкое» резание кругом. У определенной степени, на наш взгляд, это связано с образованием тех пленок на поверхности связующего и зерен круга, на которые мы уже обращали внимание выше. Для проверки этого предположения были вырезаны небольшие сегменты круга, который подвергался плазменному воздействию. Так, поверхность алмазных зерен, после такой обработки содержит 2,0–5,3 масс. % кислорода та 0,5–1,2 масс. % меди. Следовательно, имеется определенное, хотя и небольшое, окисление алмазного зерна и наличие оксидной пленки меди на нем. Укажем, что на связующем кислорода значительно больше – от 9,1 до 20,9 масс. %. Тем самым, вероятно наличие на поверхности связки оксида Cu_2O , который характеризуется малым коэффициентом трения ($f = 0,12$ [219]), и именно это и позволяет достичь «мягкого» резания таким кругом [413].

6.5. Шлифование литого пористого белого чугуна кругами из СТМ

В машиностроении широко используются антифрикционные самосмазывающиеся пористые материалы и сплавы [414, 415]. Однако не все они удовлетворяют требованиям промышленности, например, по строению порового пространства. Поэтому, необходима разработка новых, в частности анизотропных материалов, одним из которых является литой анизотропный пористый материал (ЛАПМ), впервые созданный в Днепропетровском металлургическом институте [416, 417] и представляющий собой, по существу, белый газокристаллический чугун. Компоненты последнего – высокой чистоты железо и углерод эвтектической концентрации ($\approx 4,3$ %), – взаимодействуя с газами при кристаллизации, в определенных условиях и образуют ЛАПМ.

Структура ЛАПМ обладает некоторыми особенностями по сравнению с известными материалами, описанными в работе [416]. Так, пористая

среда ЛАПМ на втулках состоит из цилиндрических радиальных каналов. Подобные материалы могут применяться в различных отраслях машиностроения, например, в качестве самосмазывающихся подшипников. При этом эффективность работы данных подшипников в значительной степени будет зависеть от проницаемости поверхности трения, по нормали к которой располагаются поровые каналы.

Механическая обработка пористых материалов обычно связана с риском завальцовки пор на их поверхности. Известно [418, 419], что правильно подобранные методы и режимы обработки, характеристики режущего инструмента позволяют обеспечить требуемые параметры поверхности. На примере ЛАПМ в данной подглаве мы и покажем особенности механической обработки пористых материалов для достижения их необходимых триботехнических характеристик, основанных на как можно большем вскрытии пор на поверхности таких материалов.

В качестве контролируемых триботехнических характеристик были взяты проницаемость и шероховатость обработанной поверхности. Критерием оценки проницаемости служил диаметр незавальцованных при обработке пор. Предварительно устанавливалось соотношение пористости ЛАПМ и диаметров пор на изломах. По минимальному диаметру пор определяли пористость материала, проницаемость которого может быть обеспечена при исследуемых условиях обработки кругами из СТМ.

Пористость материала Π (в %) находили путем изменения разницы в массе при взвешивании в воде ($m_{\text{вод}}$) и на воздухе ($m_{\text{воз}}$) и используя методику [420] рассчитывали ее по соотношению: $\Pi = (1 - m_{\text{вод}} / m_{\text{воз}}) \cdot 100$.

Диаметр пор на изломах и диаметр вскрытых пор оценивали с помощью инструментального микроскопа ИМЦ 100X50А. Соотношение пористости и соответствующих ей минимального (d_{min}) и максимального (d_{max}) диаметров пор ЛАПМ приведено в табл. 6.18.

Таблица 6.18. Соотношение пористости и диаметров пор ЛАПМ

Π , %	d_{min} , мм	d_{max} , мм	Π , %	d_{min} , мм	d_{max} , мм
10	0,032	0,185			
12	0,041	0,228	28	0,261	0,600
14	0,063	0,262	30	0,340	0,640
16	0,082	0,305	32	0,422	0,690
18	0,101	0,340	34	0,561	0,740
20	0,133	0,400	36	0,642	0,880
22	0,152	0,420	38	0,740	0,960
24	0,181	0,510	40	0,880	0,980
26	0,222	0,560	42	0,960	0,990

При исследованиях применяли образцы ЛАПМ из белого чугуна с исходной пористостью 10 % для того, чтобы изучить влияние методов шлифования на проницаемость в наиболее тяжелых условиях, когда диаметры пор минимальны. Шлифование ЛАПМ осуществляли на модернизированном универсально-заточном станке мод. 3В642. Во всех случаях использовали круги формы 12А2-45° типоразмера 150×42×32×10×3 с постоянной относительной концентрацией СТМ (100). При электроэрозионном шлифовании применяли источник импульсного технологического тока ИТТ-35, при электрохимическом – выпрямитель ВУ300/12. Эффективная мощность шлифования $N_{эф}$ измерялась с помощью самопишущего ваттметра НЗ48. Показатели шероховатости регистрировали с помощью профилометра Subtronic. При этом оценивались: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм, R_{max} – максимальное расстояние между линиями выступов и впадин неровностей, мкм, n – число пересечений профиля по базовой линии, $t50$ – относительная опорная длина профиля на уровне 50 % R_{max} . В качестве СОТС служил водный раствор натрия азотнокислого (1,0 %) и азотистокислого (0,2 %).

На первом этапе изучали влияние методов обработки на триботехнические показатели ЛАПМ. Предварительно было выявлено, что точение резцами из киборита не способствует вскрытию пор. Аналогичный вывод можно сделать и при шлифовании алмазными кругами без охлаждения (табл. 6.19). Введение электрического тока в зону обработки позволяет снизить завальцовку пор и улучшить проницаемость материала. При изучении электроэрозионного и электрохимического шлифования алмазными и кубонитовыми кругами установлено (табл. 6.19), что предпочтительнее электрохимическое, так как оно обеспечивает лучшую проницаемость обработанной поверхности. Это связано с тем, что электроэрозионные разряды, попадая на пористую поверхность, расплавляют металл на ней и вызывают завальцовку пор. В то же время при электрохимическом шлифовании воздействие искровых и химических процессов одновременно обуславливает анодное растворение поверхности чугуна, способствуя вскрытию пор.

Из табл. 6.19 следует, что электроэрозионное и электрохимическое шлифование ЛАПМ кругами из кубонита эффективнее, чем алмазными, а также, что заключительный проход следует делать с выхаживанием без тока. Однако круги из кубонита при этом быстро изнашиваются. Поэтому на втором этапе изучали влияние характеристик кругов из СТМ при шлифовании с охлаждением на проницаемость ЛАПМ. Использовался инструмент из алмазов АС4 и АС6, кубонита КР и гексанита-А (ГА) на керамической связке СК6, металлических МО20-2, М1-01, М1-10, полимерных В1-11П, В2-01, металлополимерной В1-13. Минимальные диаметр вскрытых пор и шероховатость поверхности были достигнуты при обработке алмазными кругами на металлической связке М1-10 (табл. 6.20).

Таблица 6.19. Результаты шлифования ЛАПМ различными методами

Шлифование	$N_{эф}$, кВт	Ra , мкм	R_{max} , мкм	n	t_{50} , %	d_{min} , мм вскры- тых пор	Проницаемость поверхности по отношению к исходной, %
Алмазное шлифование однослойным кругом АС32 315/250							
без охлаждения	0,65	1,40	13,32	250	15,7	не вскр.	0
с охлаждением	0,70	1,65	17,20	246	10,7	0,150	26
Алмазное шлифование кругом АС4 100/80–ПК							
без охлаждения	0,50	0,89	6,78	672	14,7	не вскр.	0
с охлаждением	0,46	0,66	5,01	844	26,0	0,125	42
Электроэрозионное алмазным кругом АС6 100/80–МО20-2 (U=50 В, I=6 А)							
без выхаживания	0,31	1,41	14,09	601	58,0	0,138	33
выхажив. без тока	0,35	0,96	7,93	589	16,0	0,100	57
Электроэрозионное кубонитовым кругом КР 100/80–МО20-2 (U=50 В, I=10 А)							
выхажив. без тока	0,32	1,08	9,68	587	8,0	0,063	80
Электрохимическое алмазным кругом АС6 100/80–МО20-2 (U=7 В, I=100 А)							
без выхаживания	0,38	0,95	7,70	543	11,7	0,075	73
выхажив. без тока	0,35	0,80	6,62	666	26,6	0,088	65
Электрохимическое алмазным кругом АС6 100/80ма–ВС-Э (U=7 В, I=10 А)							
выхажив. без тока	0,66	0,87	8,25	425	27,0	0,050	88
Электрохимическое кубонитовым кругом КР 100/80–МО20-2 (U=7 В, I=300 А)							
без выхаживания	0,31	1,78	9,66	554	15,3	0,075	73
выхажив. без тока	0,50	0,86	9,59	691	9,7	0,040	95

Таблица 6.20. Влияние характеристик кругов из СТМ на результаты шлифования ЛАПМ с охлаждением

Круг	$N_{эф}$, кВт	Ra , мкм	R_{max} , мкм	n	t_{50} , %	d_{min} , мм вскры- тых пор	Проницае- мость поверхности по отношению к исходной, %
АС6 100/80–СК6	2,00	0,56	4,48	585	26,0	не вскр.	0
АС6 100/80–МО20-2	1,00	0,54	4,76	591	8,7	0,150	26
АС4 100/80–В1-13	0,76	0,87	6,53	426	36,0	0,100	57
АС4 100/80маи–В1-13	0,95	0,70	4,70	396	15,0	0,075	73
АС4 100/80маи–В2-01	0,85	0,54	4,54	584	26,0	0,050	88
АС4 100/80маи–В1-11П	0,55	0,59	5,46	635	18,0	0,050	88
АС4 100/80–М1-10	0,50	0,66	9,73	774	27,8	0,035	98
КР 100/80–МО20-2	0,41	0,99	9,20	653	22,7	0,075	73
КР 100/80М–В1-13	0,80	0,77	6,33	295	18,7	0,063	80
ГА 100/80С52–М1-01	0,80	1,04	8,91	671	38,0	0,125	42

В целом из табл. 6.18–6.20 видно, что для достижения наибольшей проницаемости ЛАПМ с исходной пористостью 10 % и более следует применять шлифование с охлаждением алмазным кругом на связке М1-10. При $\Pi \geq 12$ % целесообразно электрохимическое шлифование кубонитовым кругом с выхаживанием, а в случае $\Pi \geq 14$ % возможны электрохимическое шлифование алмазными кругами на связке ВС-Э, электроэрозионное кубонитовыми кругами или алмазное с охлаждением кругами на полимерных связках и т.д. Неприемлемы только точение и шлифование без охлаждения, так как в этих случаях поры завальцовываются полностью.

В ходе исследований [417] установлено, что существует статистическая связь между шероховатостью обработанной поверхности и минимальным диаметром вскрытых пор. Для диапазона $Ra = 0,4–1,6$ мкм такую связь можно выразить уравнением $d_{\min} = 0,103 \cdot Ra - 0,011$. Следовательно, для лучшего вскрытия пор следует стремиться к снижению шероховатости поверхности изделий из ЛАПМ.

Диаметр вскрытых пор и шероховатость обработанной поверхности во многом зависят от скорости круга и производительности шлифования. С повышением скорости в 2 раза шероховатость несколько понижается (табл. 6.21). Особенно заметно влияние изменения производительности, достигаемого за счет изменения продольной подачи. Шлифование с $S_{\text{пр}} > 2$ м/мин приводит к росту шероховатости и завальцовки пор на обработанной поверхности (табл. 6.21).

Таблица 6.21. Результаты шлифования ЛАПМ различными методами

Параметр режима обработки	Производительность шлифования, мм ³ /мин	$N_{\text{эф}}$, кВт	Ra , мкм	d_{\min} , мм вскрытых пор	Проницаемость поверхности по отношению к исходной, %
Изменение скорости вращения круга, м/с					
15	923	0,60	0,60	0,075	73
30	923	0,50	0,53	0,075	73
Изменение $S_{\text{пр}}$, м/мин (в режиме выхаживания)					
0,5	308	0,30	0,41	0,050	88
1,0	614	0,45	0,35	0,035	98
1,5	923	0,60	0,41	0,040	95
2,0	1228	0,75	0,56	0,040	95
2,5	1437	0,80	0,93	0,063	80
3,0	1846	0,85	1,21	0,075	73

Оценивалась также [417] износостойкость (относительный расход алмазов q_p) кругов, обеспечивающих минимальный диаметр вскрытых пор

не более 0,05 мм. Установлено, что и в этом случае наилучшие показатели обеспечивают алмазные круги на связке М1-10 (табл. 6.22).

Таблица 6.22. Работоспособность алмазных кругов при шлифовании ЛАПМ ($v_{кр} = 15$ м/с, $S_{пр} = 1,5$ м/мин, $S_{поп} = 0,05$ мм/дв.ход)

Круг	$N_{эф}$, кВт	q_p , мг/г	Ra , мкм
АС4 100/80 _{маи} -В2-01	1,25	42,3	0,60–0,61
АС4 100/80 _{маи} -В1-11П	0,85	11,5	0,53–0,56
АС6 100/80 _{маи} -ВС-Э*	0,90	11,3	0,55–0,57
АС4 100/80-М1-10	0,55	2,3	0,60–0,61
АС4 100/80-М1-10 ($v_{кр} = 30$ м/с)	0,45	1,7	0,53–0,59

* Данные получены при электрохимическом шлифовании ($U = 7$ В, $I = 55$ А)

Таким образом, комплекс проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы [417]:

1. Изменяя режимы шлифования и характеристики алмазных кругов, можно достичь практически 100%-ного вскрытия пор даже у материалов с исходной пористостью 10–12 %.

2. Высокую производительность и минимальную завальцовку пор обеспечивает алмазное шлифование с охлаждением кругами на металлических связках типа М1-10 или на полимерных связках типа В2-01, В1-11П.

3. Для достижения наименьшей завальцовки пор производительность при выхаживании не должна превышать 1200–1300 мм³/мин.

4. Установлено, что наилучшей износостойкостью обладает алмазный инструмент на связке М1-10, причем с ростом круга износ падает.

5. Минимальный диаметр вскрытых пор зависит от шероховатости и со снижением Ra он уменьшается.

Г Л А В А 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

7.1. Электрические явления в процессах фрикционного контакта

Исследования по влиянию электрических явлений на износ при процессах трения материалов впервые были опубликованы в литературе в 1952 г. П. Л. Гордиенко и С. Л. Гордиенко [421]. Применительно к процессам износа металлорежущих инструментов такие влияния изучались рядом исследователей [422–432], которые показали, что процессы трения и износа представляют собой сложную совокупность механических, физических, химических, электрических, физико-химических и электрохимических явлений, которые могут замедлять или, наоборот, интенсифицировать процесс изнашивания.

Принцип действия основан на эффекте Зеебека или, иначе, термоэлектрическом эффекте. Между соединёнными проводниками имеется контактная разность потенциалов; если стыки связанных в кольцо проводников находятся при одинаковой температуре, сумма таких разностей потенциалов равна нулю. Когда же стыки находятся при разных температурах, разность потенциалов между ними зависит от разности температур. Коэффициент пропорциональности в этой зависимости называют коэффициентом термо-ЭДС. У разных металлов коэффициент термо-ЭДС разный и, соответственно, разность потенциалов, возникающая между концами разных проводников, будет различная. Помещая спай из металлов с отличными от нуля коэффициентами термо-ЭДС в среду с температурой T_1 , мы получим напряжение между противоположными контактами, находящимися при другой температуре T_2 , которое будет пропорционально разности температур T_1 и T_2 .

Укажем, что при механической обработке инструмент, обрабатываемая деталь и снимаемая стружка нагреваются. В условиях образования термопары из разнородных материалов с разницей температурных потенциалов вследствие нагревания спая-стыка, из-за трения возникает разница электрических потенциалов и перемещение свободных электронов и возникают термоэлектродвижущие силы (термо-ЭДС). В определенных условиях они могут также возникать в зоне контакта инструмента и детали со станком, а также в зонах контакта трущихся узлов станка. Общий вид температурного поля, возникающий при резании в инструменте, стружке и обрабатываемой детали, а также физическая сущность термоэлектронной

эмиссии, термоэлектрических, термомагнитных и гальваномагнитных эффектов убеждает в том, что при резании в той или другой степени наблюдаются все эти явления, однако, их влияние на результирующую величину термоЕРС или на характер распространения тепловых потоков является безусловно разным [427].

Исследователи уделяли внимание, в первую очередь, термоэлектрическим явлениям, проходящим через систему станок–инструмент–деталь–станок, и локальным термоэлектрическим явлениям, циркулирующим в пределах контакта инструмента с обрабатываемой деталью. Большинство исследователей исследовали влияние на процессы механической обработки именно термоэлектрических явлений [423, 427, 431, 432]. Исследования показали, что термоэлектрические явления являются лишь компонентом целого ряда явлений, наблюдающихся в процессах при фрикционном контакте двух тел. Так, одним из них является трибоэлектрический эффект – возникновение электрических зарядов при сухом трении некоторых материалов.

Статическое электричество – явление, при котором на поверхности диэлектриков, проводников и полупроводников возникает и накапливается свободный электрический заряд [433]. Чаще всего причиной возникновения избыточного заряда является трибоэлектрический эффект – электризация -трением [434]. Статическая электризация охватывает все процессы, которые приводят к образованию и разделению положительных и отрицательных электрических зарядов вследствие механической деформации, имеющей место при столкновении или контакте поверхностей двух твердых тел, поверхностей твердого тела и жидкости, а также при разрыве или отделении поверхностей твердых тел и жидкости газами, в частности, ионизированными газами. Сюда следует отнести такие процессы, как контактная электризация, явления, возникающие вследствие трибоэлектризации, электризация при разбрызгивании, электризация порошков, снега и, наконец, электризация, имеющая место во время грозы [435].

В целом, в процессе механической обработки может возникать следующий комплекс явлений [435]:

1. Контактная электризация или электризация Вольты возникает при контакте двух металлов или металла с полупроводником и обусловлена переходом электронов через границу раздела.

2. Электризация трением (трибоэлектризация) является единичным случаем контактной электризации и происходит в результате контакта или столкновения сухих поверхностей двух твердых тел и их последующего разделения. Это в первую очередь относится к контакту поверхностей разнородных тел, например, двух диэлектриков, диэлектрика и проводящего материала, или же двух твердых тел, имеющих разную концентрацию одних и тех же ионов. Явление основано на предположении про переход

электронов или ионов между контактирующими поверхностями под действием поверхностных сил, похожих на те, что имеют место при контакте двух металлов.

3. Электролитические явления (обусловленные переходом ионов), начиная от процессов, лежащих в основе действия гальванического элемента, заканчивая процессами, ведущими к образованию так называемых двойных слоев Гельмгольца на поверхности металлов или других веществ при контакте с жидкостями с высокой диэлектрической проницаемостью.

4. Однородное или симметричное разделение зарядов, наблюдающееся при отделении относительно малых твердых частичек или капелек жидкости одна от одной. При этом образуются частички, несущие одинаковые по величине, однако противоположные по знаку заряды, тогда как вся система остается в целом нейтральной.

5. Поляризация кристаллов, куда относятся пьезоэффект в кристаллах кварца и пироэлектрический эффект, а также вторичный эффект, когда нагрев кристалла вызывает его деформацию, приводящую к появлению пьезоэлектрических зарядов.

Как видим, в процессе фрикционного контакта возникает ряд электромагнитных явлений и эффектов и желательно было бы оценить их долю в эксплуатационных характеристиках трибосистем. В работе [436] сделана попытка провести классификацию электромагнитных явлений в триботехнике использованием априорного ранжирования. Основные электромагнитные явления могут быть условно разделены на три большие группы: термоэлектрические явления, термомагнитные явления, гальваномагнитные явления (рис. 7.1). Сущность метода априорного ранжирования состояла в том, что факторы, согласно априорной информации ранжируют в порядке снижения их вклада в конечный результат. Авторы [436] проанализировали 4 статьи – [437, 438–440] и привели сведенное ранжирование в табл. 7.1. Вследствие априорного ранжирования получен [436] коэффициент конкордации $W = 0,461$, который говорит о том, что между данными, указанными в табл. 7.1 имеется устойчивая связь. Определение величины значимости коэффициента конкордации $(\chi_p)^2 = 25,82$ показывает, что с 95 % доверительной вероятностью, можно утверждать, что мнение специалистов в указанных литературных источниках о степени влияния явлений на износ фрикционной пары согласуется с указанным коэффициентом конкордации $W = 0,461$.



Рис. 7.1. Основные электромагнитные явления в парах трения [436]

Таблица 7.1. Результаты ранжирования электромагнитных явлений [436]

№	Наименование явлений	Ранги явлений				Σa_{ij}	Δ_i	$(\Delta_i)^2$
		[438]	[439]	[437]	[440]			
1	Термоэлектронная эмиссия	1	1	1	1	4	28	784
2	Эффект Крамера	2	14	2,5	5	23,5	8,5	72,3
3	Эффект Пельтье	4	2,5	11,5	2,5	20,5	11,5	132
4	Эффект Томпсона	4	2,5	11,5	2,5	20,5	11,5	132
5	Эффект Зеебека	4	14	3	2,5	23,5	8,5	72,3
6	Электрохимические явления	6	14	3,5	11,5	35	3	9
7	Эффект Ребиндера	11	14	2,5	11,5	39	7	49
8	Эффект Риги-Ледюка	11	4	11,5	11,5	38	6	36
9	Эффект Нернста-Эттинггаузена	11	4	11,5	11,5	38	6	36
10	Эффект Маджи-Риги-Ледюка	11	4	11,5	11,5	38	6	36
11	Эффект Холла	11	6	11,5	11,5	40	8	64
12	Эффект Эттинггаузена	11	6	11,5	11,5	40	8	64
13	Эффект Нернста	11	6	11,5	11,5	40	8	64
14	Электропластический эффект	11	14	11,5	3	39,5	7,5	56,3
15	Акустоэлектрический эффект	11	14	4	11,5	40	8,5	72,5

Примечание: в таблице обозначено: a_{ij} – i -й ранг в j -ом ранжировании; Δ_i – абсолютная величина разности суммы рангов по фактору и средней суммы рангов

Получение значимого коэффициента конкордации, а именно подтверждения согласованности данных литературы, дает возможность построить среднюю априорную диаграмму рангов (рис. 7.2). Как следствие, получено неравномерное, близкое к экспоненциальному, распределение и по снижению влияния эффектов существует возможность отсеять ряд эффектов, отнесенных к шумовому полю. При анализе диаграммы было отобрано шесть факторов, которые наиболее влияют на процессы трения и изнашивания, на которые собственно, на наш взгляд, и нужно обратить внимание в оценке исследовании электрических явлений при шлифовании кругами из СТМ: термоэлектронная эмиссия, эффект Пельтье, эффект Томпсона, эффект Зеебека, эффект Крамера и электрохимические явления.

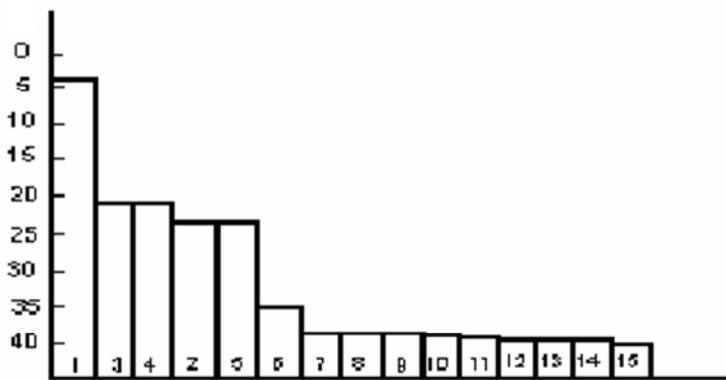


Рис. 7.2. Диаграмма рангов [436]

В процессе обработки металлической заготовки возможно возникновение эффекта Зеебека (термоэлектрический эффект) [438, 440], который состоит в том, что в замкнутом контуре, состоящем из разнородных проводящих материалов, возникает термоЭДС. Контур, который складывается только из

двух разнородных материалов, называется термоэлементом или термопарой.

В работе [441] исследован характер термоЭДС при трении пар разнообразных металлов и сплавов. На специальной установке регистрировалась разница потенциалов, возникающая между элементами пар трения. Использовались металлы и сплавы, отличающиеся своими физико-механическими свойствами: алюминий, медь, молибден, константан, углеродистые и легированные стали. Если пренебречь снижением напряжения внутри источника, то указанную разницу потенциалов можно объяснить как интегральную электродвижущую силу фрикционной системы. Интегральная ЭДС (E_i) обусловлена не только термоэлектрическими и термоэлектронными явлениями на поверхности раздела металлов, но и эффектом Крамера. Вместе с тем, низкотемпературная электронная эмиссия, исходящая из поверхности твердых тел в результате их механической обработки, структурных преобразований, адсорбционно-оксидных и других физико-химических процессов, рассматривается в данном случае как эффект второго порядка. Поэтому интегральная ЭДС по своей величине близка к тер-

моЭДС. Также необходимо указать, что по мере нагревания пары трения величина термоЭДС может изменяться в очень широких диапазонах, аж до изменения ее знака (полярности источника). Явление возникновения термоЭДС при механообработке изучалось рядом исследователей [423, 427, 431, 432, 439, 441–443].

В работе [442] показано, что естественная термопара, возникающая в зоне резания, может быть использована в качестве датчика адаптивной системы управления станком. Автором работы [443] уточнено, что величина термоЭДС может быть интегральным критерием оценки свойств инструментальных и обрабатываемых материалов.

Исследования показали, что величина термоЭДС в определенной мере связана с износостойкостью металлорежущего инструмента. Так, Ю. М. Коробовым [423] получены зависимости величин термотоков и термоэлектрических потенциалов, величина которых колеблется от 0,25 до 2,5 мВ. Такие зависимости показывают, что во всех случаях с увеличением скорости резания как потенциалы, так и термотоки возрастают (рис. 7.3). Анализ данных, полученных при обработке чугуна резцами из твердого

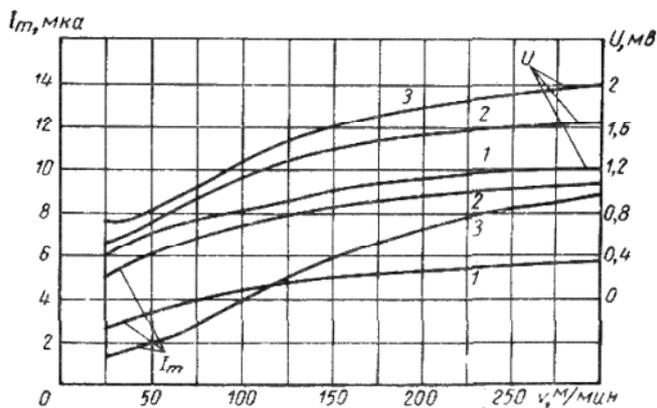


Рис. 7.3. Влияние скорости резания на величину термотоков I_m и U (при глубине резания 0,1 мм и подаче 0,1 мм/об.): 1 – Т30К4–сталь; 2 – Т15К6–сталь; 3 – ВК3М–чугун [423]

сплава группы ВК, показывает, что имеется зависимость между износом резцов и величиной термоэлектрических потенциалов. Вместе с тем, закономерной связи между величиной износа и термотоками автор [423] не выявил. Как вывод, автор указывает на то, что возможно увеличение износа при возрастании потенциалов, вызванное действием электрических разрядов на поверхностях трения, возникающих при непрерывном замыкании и размыкании субмикрочонтактов. Снизить величину разрядов автор [423] предлагает за счет метода термоэлектрической компенсации термотока или изоляции резца. Укажем, что сторонниками этой гипотезы об электроэрозионном износе являются и авторы [444]. Они указывают на то, что вследствие электроэрозионных явлений образуется ослабленный дефектный слой на контактных поверхностях и увеличивается шероховатость обрабатываемой поверхности.

Для современных исследователей открытым остается вопрос о природе измеренного сигнала ЭДС резания [445]. До 1980-х гг. получило ши-

роко распространения гипотеза о том, что термоЭДС возникает в результате термоэлектрических потенциалов, возникающих в зоне трения. Однако, как указывают авторы [444], термоЭДС может возникать и в результате электроэрозионных процессов. В работе [445] показано, что термоЭДС может возникать в результате электроэрозионных процессов. В работе [445] показано, что термоЭДС может возникать в результате электроэрозионных процессов.

рокое распространение измерение температуры в зоне резания методом естественной термопары, при котором полученное на измерительном приборе значение ЭДС отождествляется с термоЭДС резания, что давало возможность рассчитывать температуру контакта. Этот метод был подвергнут в 1980 г. критике С. В. Васильевым [446], которым было показано, что оценка температуры при обработке хромоникелевого сплава та хромистых сталей достигает величин, не имеющих физического смысла. Это дало повод к введению ним понятия «деформационная ЭДС», возникающей в условиях интенсивного трения и больших давлений при резании, когда имеет место деформационное возбуждение контактирующих слоев металла. Использование в его экспериментах одинаковых (сталь 45 – сталь 45) и неодинаковых (сталь 45 – Т15К6) пар трения показало, что при достижении одинаковой скорости резания прыжком повышается значение сигнала ЭДС, из чего был сделан вывод о том, что эта дополнительная разница потенциалов обусловлена исключительно относительным перемещением металлов пары.

В работе [447] теоретически обоснована и экспериментально подтверждена методика оценки физико-механических и теплофизических свойств контактирующих пар с применением термоэлектрических явлений сопровождающих процесс резания, что, в свою очередь, обеспечивает реализацию концепции 100 % контроля индивидуальных свойств контактирующих пар и коррекции режимов резания с целью сохранения заданного (безотказного) периода работы инструмента. Установлено, что термоэлектрические свойства пар инструмент–стальная заготовка имеют хорошую корреляционную связь с их теплофизическими свойствами, интенсивностью износа инструмента, обрабатываемостью стальных заготовок и имеют единую физическую основу при оценке свойств инструментальных и обрабатываемых материалов.

В целом, исследователи сходятся на том выводе, что чем более высокой является величина термоЭДС – тем интенсивнее изнашивается металлорежущий инструмент. Например, в работах [427, 439, 448] отмечено, что бороться с таким износом можно, в частности, разрывом контура результирующего термотока путем изолирования инструмента, детали или узлов станка. Кроме того, известен компенсационный метод, когда в зону резания вводится от постоянного источника ЭДС противоположная по знаку результирующая термоЭДС, но равная ей по величине. Также известен метод противотока. Согласно этому методу, в зону резания от постоянного источника вводится ЭДС, противоположная по знаку термоЭДС, но по величине – большая, чем термоЭДС. В результате в зону резания проходит противоток, направление которого обратно результирующему току. Эффективность данных методов подтверждена в работах [449, 450].

Вместе с тем, в работах [423, 425] отмечено, что прямой связи между величиной термоЭДС и износом инструмента не наблюдается. Так, в работе [423] пришли к выводам, что термотоки, возникающие при резании металлов, имеют две составляющие: постоянную, связанную с термоэлектродвижущей силой, и сменную, характеризующую интенсивность термоэлектрических процессов на контактных трущихся поверхностях. Энергетические термоэлектрические процессы, отражающиеся величиной быстроизменяющихся электрических потенциалов, имеют негативное влияние на процесс резания, что также связано с разрядами на поверхностях трения. Установлено, что минимальный износ режущего инструмента наблюдается при наименьших значениях потенциалов. Однако, обращено внимание на то, что четкой связи между величиной износа и термотока (постоянной составляющей) не наблюдается. В тоже время, при больших величинах радиуса при вершине резца износ увеличивается. Причиной этого является ощутимая величина радиальной составляющей силы резания, что вызывает возникновение вибраций, нарушение микроконтактов и повышение термоэлектрических потенциалов. Величина же термотока почти не изменяется.

В работе [445] обращается внимание на то, что термотоки, циркулирующие в контуре инструмент-деталь, оказывают непосредственное влияние на качество обработанной поверхности. Так при точении стали 20 резцом с пластиной твердого сплава T15K10 шероховатость обработанной поверхности снижается в сравнении с точением без изоляции.

Как уже было указано выше, для борьбы с нежелательным износом лезвийного инструмента предлагается использовать изоляцию инструмента, или же бороться с возникновением термотоков в зоне обработки, например, введением туда компенсационного термотока другого направления и знака. Однако в ряде исследований рассматривается возможность использования сигнала термоЭДС для контроля и диагностики процесса обработки. В частности, эти методы контроля состояния инструмента представлены в работах [443, 447, 451–454].

Так в [451] предложен способ контроля состояния режущей кромки многолезвийного инструмента. Результат достигается преобразованием аналогового сигнала термоЭДС каждой режущей кромки в цифровой с помощью аналогово-цифрового преобразователя с частотой не менее 1 кГц и определения перед началом обработки значений термоЭДС всех режущих кромок инструмента. С момента начала обработки непрерывно измеряют значения термоЕРС каждой режущей кромки и проводят непрерывное сравнение текущих значений с установленным граничным значением термоЭДС, фиксируют значение термоЭДС режущей кромки, которое может быть ниже или равным граничному и определяют коэффициент износа инструмента.

В [452] представлен способ определения допустимой скорости резания при механической обработке, который включает предварительное определение обрабатываемости детали в условиях безвибрационного резания в диапазоне скоростей выше зоны наростообразования и одновременного измерения термоЭДС в паре инструмент–деталь. Для сокращения подготовительного времени при наладке станка, измеряют термоЭДС пары инструмент–деталь на рабочих параметрах технологического процесса и определяют ее отношение к предварительной термоЭДС. Потом для следующих контактных пар, составленных из тех же марок инструментального материала и материала детали, измеряют термоЭДС на рабочих параметрах технологического процесса, после чего по скорегированной величине термоЭДС судят о допустимой величине скорости резания.

Подобно этому разработаны способы определения составляющих силы резания [443, 427], нагрева режущей кромки инструмента [453] и шероховатости обработанной поверхности [454].

Ряд исследователей выдвинули гипотезу о том, что термоотоки, возникающие при резании, вызывают износ режущего инструмента поскольку они интенсифицируют процесс окисления в зоне обработки [424, 428–430, 439, 455]. Вместе с тем, есть мнение, что окисление в процессах резания невозможно, так как существует плотный контакт поверхности инструмента со стружкой и обрабатываемой деталью и отсутствует возможность попадания кислорода в зону резания. Трение проходит, так сказать, по ювенильным поверхностям. Но в ряде работ [439, 449, 455] поясняется причина такого окисления, где выдвинуто гипотезу о том, что при введении в контур термотока, возникающего при резании или трении, дополнительного сопротивления, снижение фиксированной величины тока наблюдается только до определенной границы [439, 455]. Базируясь на этом, автор [455] сделал вывод, что закон Ома в данном случае нарушается, а введение дополнительного сопротивления в электрическую схему позволяет нивелировать термоотоки в контуре и установить наличие термоэлектрической эмиссии.

Также авторы [422, 451, 456, 457] пришли к выводу, что в процессах резания и трения на контактирующих поверхностях возникают большие электрические потенциалы, а генерирование электрических зарядов на поверхностях трения и их разряды возникают за достаточно короткий промежуток времени, сопровождаясь эрозионным разрушением микроконтактов взаимодействующей пары. Электрическая эрозия состоит в разрушении металла электрическими разрядами, возникающими при протекании тока через диэлектрическую среду. Электрическое изнашивание не является следствием электрической эрозии разрядами, возникающими при прохождении тока в диэлектрической среде, а имеет характер электрической

диффузии, то есть перераспределения компонентов материала инструмента и обрабатываемого материала при прохождении тока через микроплощадки фактического взаимного контакта инструмента со стружкой и деталью. Контакт между поверхностями инструмента, стружкой и изделием из-за наличия шероховатости, во-первых, носит не сплошной характер. Мельчайшие частички инструментального материала переносятся потоком снимаемой стружки, и в местах отрыва образуется мгновенный вакуум, куда направляются молекулы кислорода. При резании на небольших скоростях, например при сверлении, когда периодически возникает и срывается нарост, задняя поверхность инструмента подвергается воздействию кислорода воздуха. Во-вторых, в результате пластической деформации поверхностных контактных слоев инструмента и отсутствия на них в начальный момент резания промежуточных пленок эти поверхности становятся химически активными. В результате этого, а также за счет изменения кристаллической решетки, обеспечивается высокая скорость диффузии кислорода в решетку материала в сравнении с обычными скоростями резания [458]. Образующиеся оксидные пленки удаляются при трении с поверхностей инструмента и происходит их изнашивание. Термоток помогая интенсификации окисления, может помогать интенсификации окисного износа.

Как показали исследования [455], долю окисного износа инструмента можно снизить, осуществляя процесс резания в нейтральной среде, или устраняя неблагоприятное воздействие термотока разрывом его контура, или же введя в зону резания противоток. Схема влияния термотока, а также направления внешней ЭДС при резании представлены на рис. 7.4. Если резание осуществляется при средних и повышенных температурах, то рост оксидной пленки на инструменте при работе с разомкнутым контуром термотока подчиняется закону Вагнера и происходит только за счет диффузии или миграции катионов инструментального материала (Me) в электрическом поле, образуемом разницей потенциалов между внешней и внутренней поверхностями первичной пленки оксида (рис. 7.4, б). При обычном резании, когда по контуру инструмент–деталь–станок протекает термоток (рис. 7.4, а), ускоряется поступление электронов к границе оксид-кислород, поскольку электрическое сопротивление внешней цепи меньше, чем в слое оксида. Одновременно усиливается миграция катионов инструментального материала к границе оксид-кислород для получения стойкого термодинамического равновесия. При обычном резании (цепь термотока замкнута) и с внешней ЭДС, полярность которой совпадает с полярностью термоЭДС, происходит непрерывный рост пленки оксида на инструменте [455].

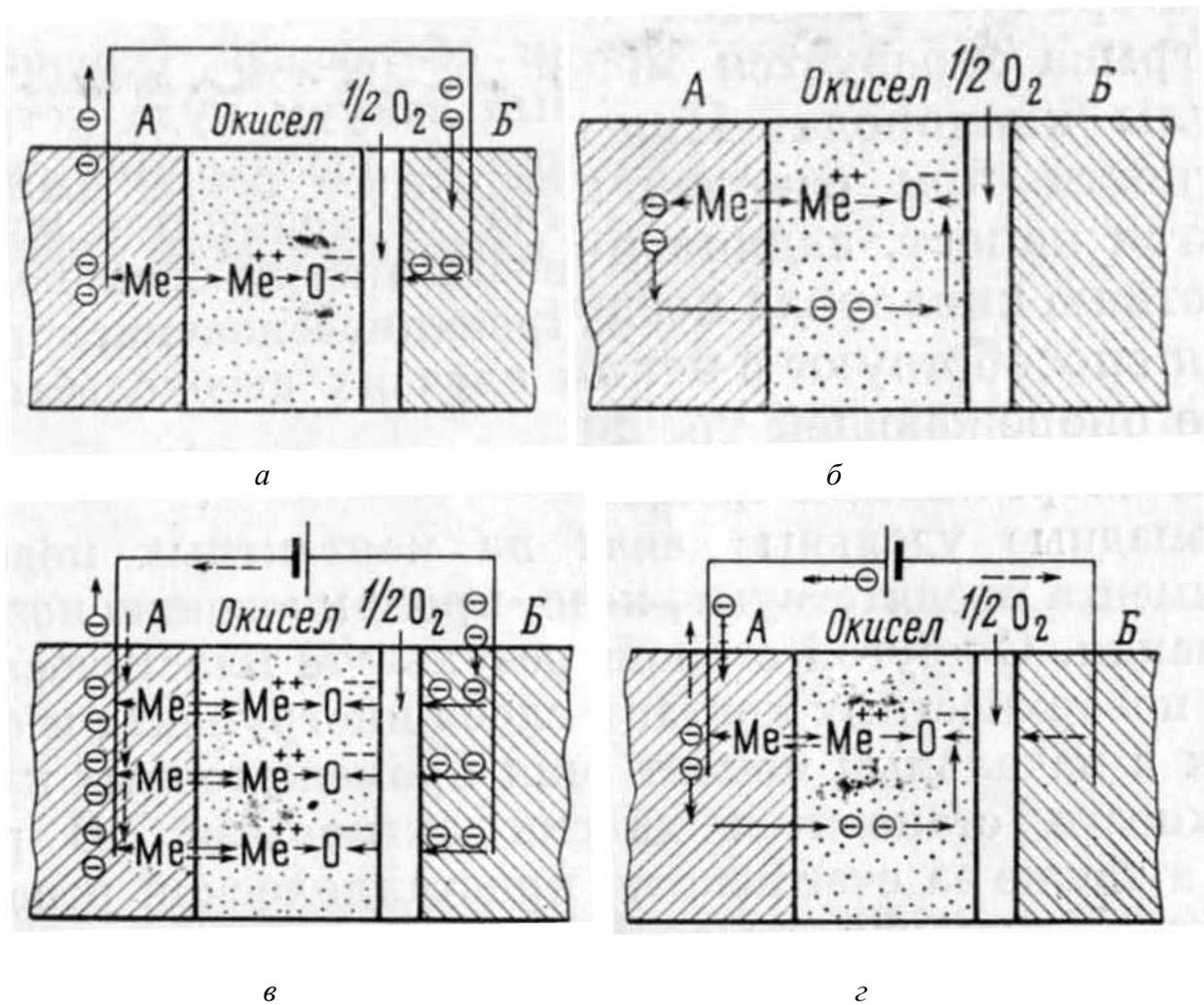


Рис. 7.4. Схема влияния термотока и направления ЭДС на скорость окисления *а* – обычное резание; *б* – компенсация термоЭДС; *в* – положительная ЭДС; *г* – отрицательная ЭДС) [455]

В случае наложения на инструмент ЭДС того же знака, что и термоЭДС (рис. 7.4, *в*) картина принципиально не изменяется; тут также ускоряется встречная миграция катионов материала (Fe^{2+} , W^{6+} – для быстрорежущих сталей, W^{6+} , Co^{2+} – для однокарбидных твердых сплавов), анионов кислорода и электронов, в результате чего оксидная пленка становится толще. Наложение встречной внешней ЭДС (рис. 7.4, *г*), наоборот, усложняя миграцию электронов, необходимых для ионизации кислорода, приводит к образованию более тонкой оксидной пленки [455, 459]. В работе [455] также обращено внимание на то, что исследование оксидных пленок, проводящееся не в процессе резания, а после его окончания, методически неверно, потому что оксиды на металлических поверхностях образуются мгновенно, особенно при высоких температурах нагрева. Кроме того, известно, что внешняя газовая среда оказывает большое влияние на темпера-

туру трущихся поверхностей. При наличии кислорода в окружающей среде температура поверхностей трения значительно ниже, чем в случае отсутствия кислорода.

В работе [460] обращено внимание на то, что образование разных оксидов может воздействовать на инверсию термоЭДС и это может влиять на процессы ускорения или снижения износа поверхностей трущихся пар.

Обратим внимание, что во всех изложенных выше случаях мы имеем дело с классическим случаем возникновения термоЭДС непосредственно в зоне съема материала (лезвийная обработка). Отличие процесса абразивной обработки от лезвийной состоит в первую очередь в том, что с обрабатываемым материалом контактируют неэлектропроводные зерна, а трибоконтакт в значительной степени происходит между электропроводной связкой, шламом и обрабатываемым материалом. Как следствие, в этом случае, из-за неравномерности рабочего слоя шлифовального круга и большей площади контакта, в отличие от резания лезвийным инструментом, где наблюдается точка контакта режущей кромки и обрабатываемого материала или же прямая контакта, фактически наблюдается не термоЭДС, а трибоЭДС, которая по своей природе близка к термоЭДС. Вследствие изложенного выше в зонах контакта связки круга и обрабатываемого материала и будут возникать описанные механизмы окислительного износа, электродиффузии, электроэрозии и электрохимические процессы.

В литературе работ по электрическим явлениям в процессах абразивной обработки немного, но в них обращено внимание на то, что именно две характеристики трибопроцесса – заряженность поверхности и возникновение термоЭДС являются важными для таких процессов и это подтверждается исследованиями Б. Н. Лысова [461, 462]. Так, в авторском свидетельстве [462] способ определения величины припуска при абразивной обработке отличается тем, что в качестве сигнала используют разные по величине, протяженности и частоте электрические заряды, возникающие в зоне контакта абразивного инструмента и обрабатываемой детали (рис. 7.5).

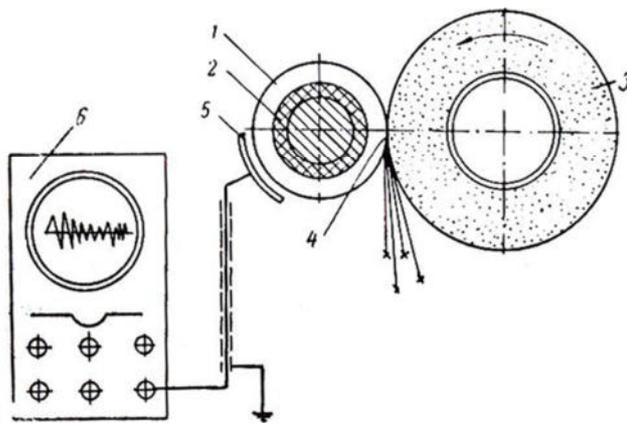


Рис. 7.5. Способ использования электрических зарядов в зоне контакта для контроля процесса обработки [461]: 1 – обрабатываемая деталь, 2 – изоляция, № – абразивный круг, 4 – заряды в зоне обработки, 5 – пластина, регистрирующая заряд, 6 – осциллограф

В целом при абразивной обработке имеют место несколько механизмов возникновения электрических явлений:

1. Контактная электризация, связанная с периодическим контактом отдельных зерен шлифовального круга с деталью, а также возможным контактом связки круга с деталью. В отличие от лезвийной обработки, этот контакт не является постоянным. Тип контакта – различный. Контакт «полупроводник-металл» наблюдается при шлифовании металлических деталей кругами с зёрнами карбида кремния и карбида бора, которые имеют те же свойства, что полупроводники. В работе [462] показано, что явление контактной электризации при шлифовании инструментом с зёрнами карбида кремния, электрокорунда или алмаза имеют место. Схема контакта микровыступов зерен с обрабатываемой деталью и электрическая схема перетекания зарядов на микровыступах приведены на рис. 7.6. Также он возможен в случае возникновения оксидных пленок на поверхности зерен. Особенности электризации полупроводника при его контакте с металлом заключаются в том, что количество свободных электронов в нем значительно меньше, чем в металле. Вследствие этого в месте контакта образуется достаточно большой слой полупроводника, обедненный электронами, и возникает объемный заряд, величина которого определяется не только разницей работ выхода электронов, но и кристаллографическим строением и площадью зоны контакта контактирующих тел [462]. Контакт «диэлектрик-металл» характерен для шлифования кругами на полимерных связках без металлопокрытия рабочих зерен. Механизм электризации при этом обусловлен не только обменом электронами, но и их адсорбцией с поверхности диэлектрика на поверхность металла за счет ионной проводимости [435]. Контакт «металл-металл» возможен при шлифовании кругами на металлической связке или же с металлопокрытием абразивных зерен. Также он может иметь место при «засаливании» пор рабочего слоя кругов шламом. Характерно при этом, что при разрыве контакта не удастся получить ощутимую разницу контактных потенциалов, а величина заряда мало зависит от площади зоны контакта. Концентрация свободных электронов через истечение мало зависит от температуры. Металлические поверхности также легко адсорбируют ионы, что вызывает образование двойного электрического слоя и снижает или увеличивает энергию истечения [433].

2. Трибоэлектризация, которую было бы правильнее называть контактной электризацией, поскольку она имеет место только при асимметричном трении двух одинаковых веществ. Суть трибоэлектризации состоит в том, что ограниченная по размеру поверхность подвергается трению, вследствие чего нагревается. Нагрев при этом связан как с общим нагревом всей трущейся поверхности, так и с очень сильным локальным нагревом отдельных неоднородных поверхностей, когда возможна термическая

эмиссия электронов. Однако более нагретая поверхность имеет и более высокую плотность носителей заряда, у результате чего большее количество ионов будет переходить за единицу времени с более нагретой поверхности до менее нагретой, чем в обратном направлении. При шлифовании трибоэлектризация наиболее вероятна при засаливании абразивного круга, когда частички снятого материала детали налипают на контактные поверхности зерен круга и происходит скольжение по поверхности детали [461].

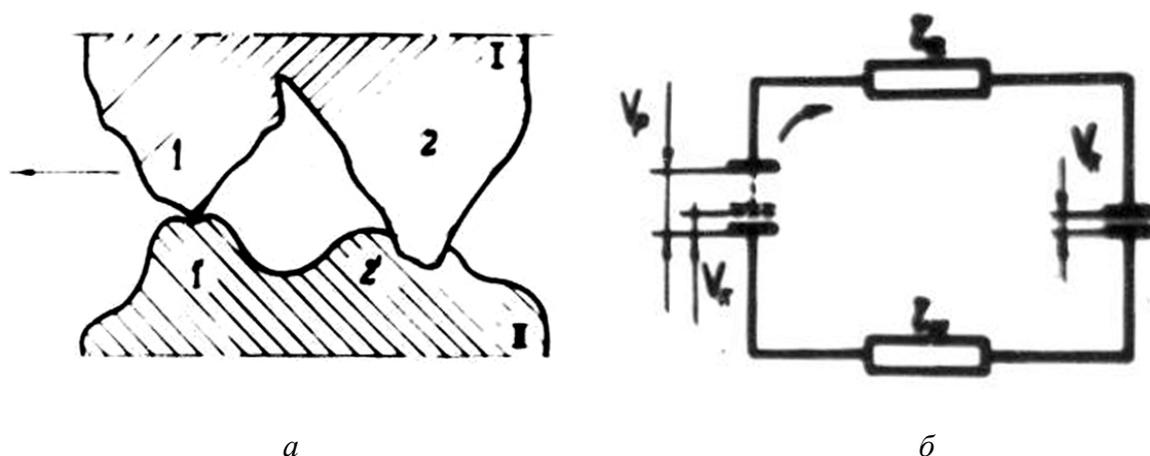


Рис. 7.6. Схема контактирования микронеровностей зерна с обрабатываемой деталью (а) и электрическая схема перетекания зарядов на микровыступах (б) [461]

3. Возникновение электролитических явлений, которое возможно при наличии на поверхностях контактирующих материалов тонких водных пленок. Из-за наличия на поверхностях следов солей или же каких-то загрязнений, тонкая жидкая пленка обеспечивает перенос ионов H^+ и OH^- на поверхность соответствующего металла. Поскольку поверхностная плотность зарядов в этом случае на несколько порядков ниже, чем при контактной электризации, этот эффект не может считаться главным и должен рассматриваться только как сопровождающий другие, в том числе контактную электризацию [461]. На это указывают и авторы работы [463], когда возникновение электрического поля при наличии технологически сред обуславливается электрохимической термоЭДС. Как пример, этого в работе [464] описан опыт шлифования твердого сплава Т15К6 кругом 68 % алмазной концентрации на металлической связке. Шлифование проводилось с электролитом и без него. Шлифование с электролитом алмазными кругами твердого сплава позволило увеличить стойкость шлифовальных кругов в 4 раза. В работе [461] показано, что фиксированный при шлифовании электрический сигнал является суммарным, полученным в результате совокупного действия различных по своей природе электрических явлений, но трудно указать на отдельную роль конкретного явления. Наиболее

интенсивной является контактная электризация, к которой можно отнести трибоэлектризацию и термоэлектрические явления. Другими, учитывая их низкие величины, можно пренебречь.

На электризацию при шлифовании, по сути, влияют физико-механические свойства шлифовального инструмента и обрабатываемого материала, величины площадок контакта, термические явления. Поэтому, электрические явления, сопровождающие шлифование, несут в себе информацию по моменту контакта шлифовального круга и заготовки, тепловых процессов, а также характера контакта, применительно к величине снимаемого слоя обрабатываемого материала. Эта информация может быть использована для автоматизации процесса шлифования. Например, в работе [462] предложено использовать электрический сигнал для контроля за состоянием поверхности шлифовального круга и своевременной остановки процесса правки.

7.2. Электризация в процессах абразивной обработки кругами из СТМ

Учитывая то, что в литературе практически отсутствуют сведения о показателях трибоэлектризации при шлифовании, то в работе [465] исследовано влияние обрабатываемых материалов на величину и знак напряженности электростатического поля, как характеристику, отражающую интенсивность электризации как на поверхности шлифовального круга, так и обрабатываемого материала. Материалы, использованные в экспериментах, были поделены на группы, отличающиеся по составу и природе: керамические, полимерные и металлические.

В качестве керамических материалов были использованы режущие керамики – ВО13 (оксидная) и ВОК71 (оксидно-карбидная).

В качестве полимерных брали материалы приближенные к связующему шлифовальных кругов – текстолит (как слоистый материал, получаемый методом горячего прессования стеклотканей, пропитанных связующим материалом на основе эпоксидной и фенолформальдегидной смолы) и непосредственно полимерную связку ТО2 (В1-10), которая содержит смолу фенольную СФП-012А – 66,7 об. %, остальное – наполнители.

Металлические материалы, поскольку они наиболее представлены в группе обрабатываемых материалов, дополнительно были поделены на подгруппы: стали (Р6М5, 40Х, Х12М), твердые сплавы – вольфрамовые (ВК6, ВК8, ВК15), вольфрамотитановые (Т5К10, Т15К6) и безвольфрамовые (ТН20). Одновременно были использованы образцы из металлических связок шлифовального инструмента: материалы связок с содержанием

алюминия, материалы связок с преимущественным содержанием меди и никель, как материал, характеризующий покрытие зерен СТМ.

Методически исследования были построены таким образом, что по шлифовальному диску 6A2 200×7×3 АСМ 40/28–В1-13–100 происходило трение указанных выше образцов материалов. Определяли абсолютную величину среднего значения изменения напряженности электростатического поля при трении материалов. При этом, начальное значение напряженности электростатического поля на шлифовальном диске составило – $E_0 = -0,3$ кВ/м.

Обобщенные значения величин среднего значения изменения (прироста, спада) напряженности электростатического поля при трении материалов на шлифовальном диске и образцах представлены в табл. 7.2 для шлифовального диска и табл. 7.3 для образцов исследуемых материалов.

Таблица 7.2. Среднее значение изменения напряженности электростатического поля на шлифовальном диске 6A2 200×7×3 АСМ 40/28–В1-13–100 при трении по нему образцов из разных групп материалов

№	Группа материалов	Обрабатываемый материал	$ \Delta E_{\text{ср}} $, кВ/м
1	Керамика	ВОК71	0,22
		ВО13	0,13
2	Полимерные материалы	Текстолит	0,18
		ТО2	0,11
3	Никель	Никель	0,30
4	Стали	40Х	0,36
		Р6М5	0,37
5	Твердые вольфрамовые и безвольфрамовые сплавы	ТН20	0,27
		ВК6	0,43
		ВК15	0,39
		Т5К10	0,30
		Т15К6	0,40
6	Материалы с содержанием алюминия	Алюминий	0,38
		М1-04	0,40
7	Материалы с содержанием меди	Медь	0,51
		Латунь	0,43
		М2-01	0,50

Для более наглядного представления данных результатов они поданы в виде диаграмм (рис. 7.7 и рис. 7.8). Анализ значений напряженности, возникающей на шлифовальном диске при трении по нему разных материалов (рис. 7.7) показывает, что наибольшее изменение напряженности электростатического поля на шлифовальном диске наблюдается после абразивного

контакта с образцами из меди или медьсодержащими материалами (0,43–0,51 кВ/м). Наличие в составе связки алюминия несколько снижает напряженность. Никель в сравнении с указанными материалами также снижает электризацию [465, 466].

Таблица 7.3. Среднее значение изменения напряженности электростатического поля на образцах из разных материалов при их трении по шлифовальному диску 6A2 200×7×3 АСМ 40/28–В1-13–100

№	Группа материалов	Обрабатываемый материал	$ \Delta E_{\text{сер}} $, кВ/м
1	Керамика	ВОК71	0,19
		ВО13	0,14
2	Полимерные материалы	Текстолит	0,17
		ТО2	0,13
3	Никель	Никель	0,18
4	Стали	40Х	0,18
		Р6М5	0,24
5	Твердые вольфрамовые и безвольфрамовые сплавы	ТН20	0,14
		ВК6	0,18
		ВК15	0,12
		Т5К10	0,25
		Т15К6	0,27
6	Материалы с содержанием алюминия	Алюминий	0,19
		М1-04	0,34
7	Материалы с содержанием меди	Медь	0,22
		Латунь	0,18
		М2-01	0,39

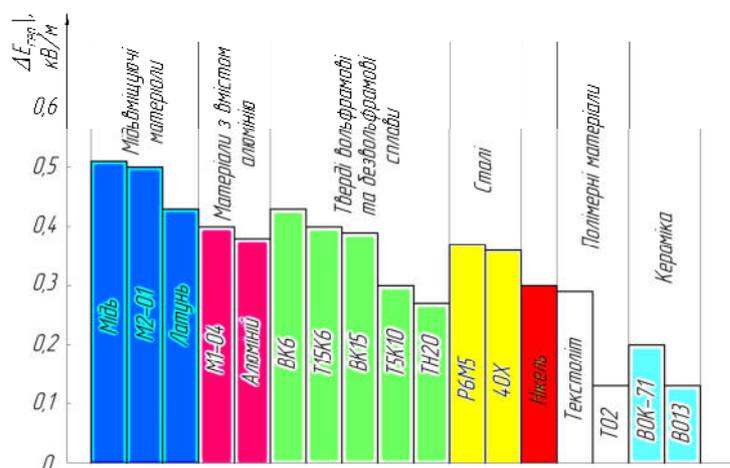


Рис. 7.7. Среднее значение изменения напряженности электростатического поля на шлифовальном диске для разных групп материалов

Сравнение разных инструментальных материалов показывает, что напряженность на рабочем слое круга при их трении по нему наибольшая у твердых сплавов, несколько меньше она на стальном инструменте, а наименьшая электризация наблюдается при трении керамик. Интересно то, что наличие в составе твердых сплавов карбида титана снижает напря-

женность, а в составе керамик – наоборот, повышает. Такая противоположная тенденция вызвана, вероятно, матрицей инструментального материала. Так, частичная замена карбида вольфрама карбидом титана снижает уровень электризации. Об этом говорит и то, что безвольфрамовый твердый сплав ТН20 имеет наименьший уровень напряженности (рис. 7.7). А вот когда мы имеем чисто оксидную основу в виде оксида алюминия (керамика В013), то добавка к ней карбида титана (керамика В0К71) снижает уровень напряженности (рис. 7.7).

То, что добавление к матрице материала каких-либо наполнителей или добавок влияет на уровень напряженности, мы можем наблюдать и для полимерных материалов. Так, добавление для чисто полимерного материала неполимерных добавок (связка Т02) значительно снижает уровень напряженности на шлифовальном диске с 0,18 до 0,11 кВ/м (рис. 7.7).

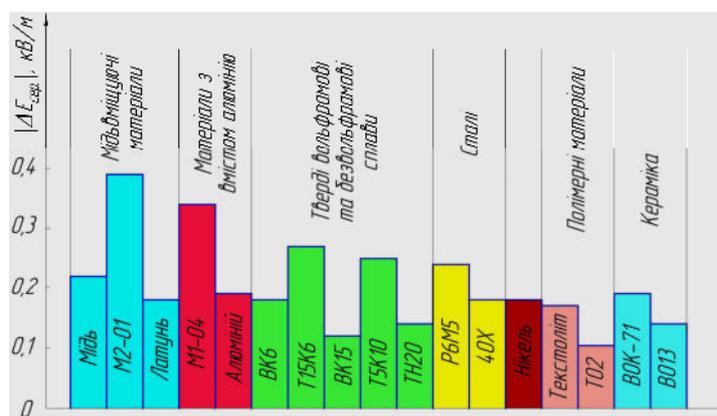


Рис. 7.8. Среднее значение изменения напряженности электростатического поля на образцах из разных групп материалов при их трении по шлифовальному диску

Укажем, что анализ данных по напряженности, которая фиксировалась на образцах после трения их по шлифовальному диску (табл. 7.3 и рис. 7.8), показывает, что тут какой-то четкой тенденции не наблюдается. Образцы фактически почти одинаково заряжаются при обработке, хотя композитные материалы в сравнении с чистыми, например связка М2-01 в сравнении с медью или связка М1-04 в сравнении с алюминием, приобретают большую электризацию. Это можно подтвердить и для твердых сплавов, где титановольфрамокобальтовые твердые сплавы заряжаются больше, чем вольфрамокобальтовые (рис. 7.8).

Кроме того, как установлено исследованиями [465], после трения происходит переход негативных зарядов с поверхности круга на образцы и, наоборот, положительные заряды после трения образцов накапливаются на поверхности круга. Из-за отсутствия четкого соответствия значений напряженности электростатического поля на образцах значениям, которые наблюдались на шлифовальном диске, было выдвинуто предположение, что заряд наблюдается именно на шлеме, который накапливается на поверхности шлифовального диска после трения образцов.

Для подтверждения такого предположения были проведены [465] эксперименты по определению периода времени, за который происходит возобновление начальных значений напряженности электростатического поля, при разных условиях трения образца из связки М2-01 по поверхности шлифовального диска, когда рабочая поверхность диска: 1 – не вскрыта, 2 – вскрыта предварительной приработкой, 3 – принудительно вскрыта абразивным бруском. Образец со связкой М2-01 был выбран потому, что именно при его использовании фиксируются наибольшие значения напряженности электростатического поля (рис. 7.8). Установлено, что при трении образцов по поверхности шлифовального диска, на ней накапливается позитивный заряд, который постепенно снижается и значения возвращаются к начальным. Кроме того, значения напряженности электростатического поля на диске после трения по нему образца связки М2-01 возвращаются к начальным быстрее, также как и на самом образце, что связано с меньшей площадью контакта образца с диском, поскольку контактная площадь медного образца – больше. Проведенными экспериментами выявлено (табл. 7.4), что по указанным выше условиям возобновления начальных значений напряженности электростатического поля на шлифовальном диске происходит плавно за определенный промежуток времени. При этом на вскрытом участке шлифовального диска, а особенно принудительно вскрытом, возобновление начальных значений напряженности электростатического поля происходит дольше, чем на участке, где до этого непосредственно не проводилось шлифование. Это как раз и можно пояснить повышенной шероховатостью вскрытого участка диска, что сказывается на повышении производительности обработки, увеличения на поверхности диска шлама и, как следствие, более интенсивного накопления на данной поверхности зарядов.

Укажем, что производительность обработки естественно влияет на температуру в зоне шлифования, поэтому вполне логично было бы исследовать, как нагрев составляющих пары фрикционного контакта инструмент-деталь влияет на электризацию в зоне их контакта. Для этого было исследовано [467] изменение напряженности электростатического поля для трех случаев: не нагретый шлифовальный диск – не нагретый образец, нагретый шлифовальный диск – нагретый образец, нагретый шлифовальный диск – не нагретый образец, не нагретый шлифовальный диск – нагретый образец. Был использован образец из меди. Температура исследования была обусловлена следующим. Известно [71], что даже при наиболее сложных условиях электрошлифования, когда в зоне обработки имеются электроразряды, прирост температуры электродов не превышает 65° и температура находится в границах $65\text{--}85^\circ$, поэтому для исследований была выбрана средняя температура в 75°C и продолжительность нагрева –

20 мин. Исходной была температура – 20 °С. Величины напряженности электростатического поля на шлифовальном диске и медном образце для указанных случаев приведены в табл. 7.5.

Таблица 7.4. Изменение напряженности электростатического поля от времени исследования при разных условиях вскрытия поверхности шлифовального диска

Время t , с	Не вскрытый участок		Участок вскрыт в процессе трения		Принудительно вскрытый участок	
	$ \Delta E $, кВ/м		$ \Delta E $, кВ/м		$ \Delta E $, кВ/м	
0	0,2±0,01		0,3±0,02		0,4±0,02	
5	0,2±0,01		0,3±0,02		0,3±0,02	
10	0,1±0,01		0,2±0,01		0,2±0,01	
15	0,1±0,01		0,2±0,01		0,3±0,02	
20	0,1±0,01		0,2±0,01		0,2±0,01	
25	0,1±0,01		0,2±0,01		0,2±0,01	
30	0		0,1±0,01		0,2±0,01	
35	0,1±0,01		0,1±0,01		0,1±0,01	
40	0,1±0,01		0,1±0,01		0,1±0,01	
45	0		0		0,1±0,01	
50	0		0,1±0,01		0,1±0,01	
55	–		0		0,1±0,01	
60	–		0		0,1±0,01	
65	–		–		0	
70	–		–		0	

Таблица 7.5. Изменение напряженности электростатического поля шлифовального диска и образца при их фрикционном контакте в условиях дополнительного теплового воздействия

Объект исследования	До фрикционного контакта	После фрикционного контакта	$ \Delta E $, кВ/м
	E_0 , кВ/м	E , кВ/м	
Нагретый шлифовальный диск – нагретый образец			
Шлифовальный диск	–0,4±0,02	–0,1±0,01	0,3
Медь	–0,5±0,03	–0,7±0,04	0,2
Нагретый шлифовальный диск – не нагретый образец			
Шлифовальный диск	–0,9±0,05	–0,1±0,01	0,8
Медь	–0,2±0,01	–0,4±0,02	0,2
Не нагретый шлифовальный диск – нагретый образец			
Шлифовальный диск	–0,3±0,02	–0,1±0,01	0,2
Медь	–0,5±0,03	–0,6±0,03	0,1

Нагрев приводит к большей поляризации. Более того, после нагрева, как на шлифовальном диске так и на образце повышается величина отрицательных зарядов. Соответственно, напряженность электростатического поля для них имеет отрицательный знак. После фрикционного контакта независимо от того, какой из исследуемых объектов нагревался или нагревались они вместе, на меди наблюдается преимущественное накопление отрицательных зарядов в отличие от шлифовального диска, где накапливаются положительные заряды. Наибольшая разница, между напряженностями электростатического поля после фрикционного контакта на исследуемых объектах наблюдается при одновременном нагреве шлифовального диска и меди. Наименьшая разница – когда нагревается только шлифовальный диск.

Учитывая то, что введение в состав твердых сплавов карбида титана изменяет напряженность электростатического поля, были поставлены [467] дополнительно эксперименты по исследованию особенностей электризации после фрикционного контакта указанного выше шлифовального диска с никелевыми образцами, имевшими ионно-плазменные покрытия из карбида титана и нитрида титана. Толщина покрытия – 15 мкм. При исследовании происходил фрикционный контакт никелевого образца на шлифовальном диске до полного снятия соответствующего покрытия с фиксированием изменения напряженности на исследуемых объектах (табл. 7.6 и табл. 7.7).

Таблица 7.6. Изменение напряженности электростатического поля на шлифовальном диске и никелевом образце с покрытием карбида титана

Объект исследования	До трения	После трения	$ \Delta E $, кВ/м
	E_0 , кВ/м	E , кВ/м	
С покрытием карбида титана			
Образец	$-0,3 \pm 0,02$	$-0,4 \pm 0,02$	0,1
Шлифовальный диск	$-0,8 \pm 0,04$	$-0,1 \pm 0,01$	0,7
После изношенного покрытия карбида титана			
Образец	$-0,1 \pm 0,01$	$-0,3 \pm 0,02$	0,2
Шлифовальный диск	$-0,3 \pm 0,02$	$-0,1 \pm 0,01$	0,2

Таблица 7.7. Изменение напряженности электростатического поля на шлифовальном диске и никелевом образце с покрытием нитрида титана

Объект исследования	До трения	После трения	$ \Delta E $, кВ/м
	E_0 , кВ/м	E , кВ/м	
С покрытием нитрида титана			
Образец	$-1,1 \pm 0,06$	$-1,2 \pm 0,06$	0,1
Шлифовальный диск	$-0,9 \pm 0,045$	$-0,3 \pm 0,015$	0,6
После изношенного покрытия нитрида титана			
Образец	$-0,4 \pm 0,020$	$-0,5 \pm 0,025$	0,1
Шлифовальный диск	$-0,7 \pm 0,035$	$-0,5 \pm 0,025$	0,2

Из результатов, приведенных выше, можно сделать вывод о том, что после фрикционного контакта никелевых образцов с покрытием карбида и нитрида титана напряженность электростатического поля на шлифовальном диске резко изменяется, причем диск накапливает положительный заряд. Это можно пояснить тем, что при снятии покрытия с никелевого образца на шлифовальном диске появляется большое количество шлама, за счет чего и накапливается положительный заряд. После фрикционного контакта образцов с уже снятым покрытием интенсивность изменения напряженности электростатического поля на шлифовальном диске уже не такая ощутимая.

Для исследования связи электризации с производительностью шлифования проведено [468] шлифование образцов из быстрорежущей стали Р6М5 и твердого сплава ВК6 кубонитовыми и алмазными кругами типа 12А2-45° 125×5×3×32 и измерена напряженность электростатического поля шлама после шлифования. Результаты сведены в табл. 7.8.

Таблица 7.8. Зависимость напряженности электростатического поля шлама от производительности обработки

Характеристика СТМ	Продольная подача $S_{пр}$, м/мин	Производительность обработки, Q , мм ³ /мин	Обрабатываемый материал	Напряженность электростатического поля шлама, ΔE , кВ/м
КР 125/100–100 %	0,3	120	Р6М5	0,6±0,03
	0,5	200		0,3±0,02
	0,75	300		0,9±0,05
	1,0	400		0,9±0,05
	1,5	600		1,7±0,09
АС6 125/100–75 %+ (КМ3/1) _{метал.} –25 %	0,3	106,5	ВК6	0,8±0,04
	0,5	177,5		0,2±0,01
	0,75	266,25		0,5±0,03
	1,0	355		1,0±0,05
	1,5	532,5		1,0±0,05
КР 125/100–75 %+ (КМ3/1) _{метал.} –25 %	0,3	120	Р6М5	0,5±0,03
	0,5	200		0,3±0,02
	0,75	300		0,4±0,02
	1,0	400		1,0±0,05
	1,5	600		1,3±0,07
АС6 125/100–100 %	0,3	106,5	ВК6	0,7±0,04
	0,5	177,5		0,6±0,03
	0,75	266,25		0,4±0,02
	1,0	355		0,9±0,05
	1,5	532,5		0,8±0,04
	2,0	710		1,2±0,06

Как и следовало ожидать, с повышением производительности обработки – напряженность электростатического поля шлама растет. Причем это характерно как для алмазных кругов при обработке твердого сплава, так и для кубонитовых кругов при обработке быстрорежущей стали [468].

Поскольку режущая способность круга в значительной степени определяется характеристиками шлифпорошков зерен СТМ в них, то важно было бы определить как концентрация и зернистость зерен СТМ, а также покрытие зерен влияет на величину напряженности электростатического поля. Выявлено (табл. 7.9), что повышение относительной концентрации зерен СТМ в режущем слое круга содействует повышению электризации в процессах обработки твердого сплава Т15К6 алмазными кругами типа 12А2-45° 125×5×3×32 на полимерной связке при производительности шлифования $Q = 500 \text{ мм}^3/\text{мин}$.

Таблица 7.9. Влияние концентрации зерен СТМ на величину напряженности электростатического поля при шлифовании алмазными кругами

№, п/п	Характеристика рабочего слоя круга	Напряженность шлама E , кВ/м
1	АС6 125/100–В2-08–75	$-1,4 \pm 0,07$
2	АС6 125/100–В2-08–100	$-1,6 \pm 0,08$
3	АС6 125/100–В2-08–125	$-2,2 \pm 0,11$

Укажем, что с повышением зернистости зерен СТМ также наблюдается тенденция к возрастанию величины напряженности электростатического поля шлама, однако в отличие от концентрации, такая тенденция является нечеткой. Вместе с тем, поскольку в процессе обработки происходит не только процесс резания зернами, а и трибопроцессы в зоне обработки, то тут имеет определенное значение и покрытие зерен СТМ, поскольку влияние составляющих такого покрытия на процесс электризации может быть достаточно существенным, что было изучено авторами [469–471] и представлено ниже. Исследования влияния стеклопокрытия зерен из СТМ на величину напряженности электростатического поля при абразивной обработке проведено при шлифовании образцов из быстрорежущей стали Р6М5 кубонитовыми кругами 12А2-45° 125×5×3×32 на станке 3В642. Использовались стеклопокрытия силикатной системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ и свинцовой системы $\text{PbO}-\text{ZnO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ с разными модификационными добавками в стекло и их разным содержанием. Круги изготовлены на полимерном связующем ВР. В отличие от стекла свинцовой системы стекло силикатной системы имеет более высокие физико-механические свойства. Вместе с тем они более тугоплавки и температура их трансформации (T_a) на 200–300 градусов выше, чем температура трансформации стекла свин-

цовой системы. При термообработке стекла двух систем первое, наиболее тугоплавкое, растворяется в другом, легкоплавком. С повышением температуры количество растворенного стекла увеличивается и образуются псевдокомпозиты с более высокими физико-механическими свойствами, чем у исходного стекла обеих систем. Это обусловлено разницей характера релаксирующих и диффузионных процессов в индивидуальных стеклах и их смесях. В таких системах возникают интенсивные ионообменные процессы, движущей силой которых является стремление выровнять концентрацию ионов по обе стороны межфазной границы.

С целью регулирования свойств композитов в их состав, как правило, вводятся наполнители. В качестве наполнителей стекол использованы дисперсные модификационные добавки тугоплавких оксидов ZrO_2 , TiO_2 и Al_2O_3 , которые не образуют стекло, но при растворении стекла не ослабляют, а укрепляют стеклоподобную сетку и, соответственно, образуются композиты с повышенными физико-механическими свойствами и улучшенными эксплуатационными характеристиками. Модификационные добавки вводились в стекло в пределах от 10 до 30 масс. %. При шлифовании кругами с модификационными добавками в стеклопокрытии зерен определены относительный расход кубонита в круге при шлифовании, q_p , мг/г, шероховатость обработанной поверхности, Ra , мкм и напряженность электростатического поля (табл. 7.10). На рис. 7.9 представлены обобщенные корреляционные зависимости расхода кубонита в кругах при шлифовании от напряженности электростатического поля шламу для разных модификационных добавок в покрытия зерен кубонита в условиях разной производительности обработки.

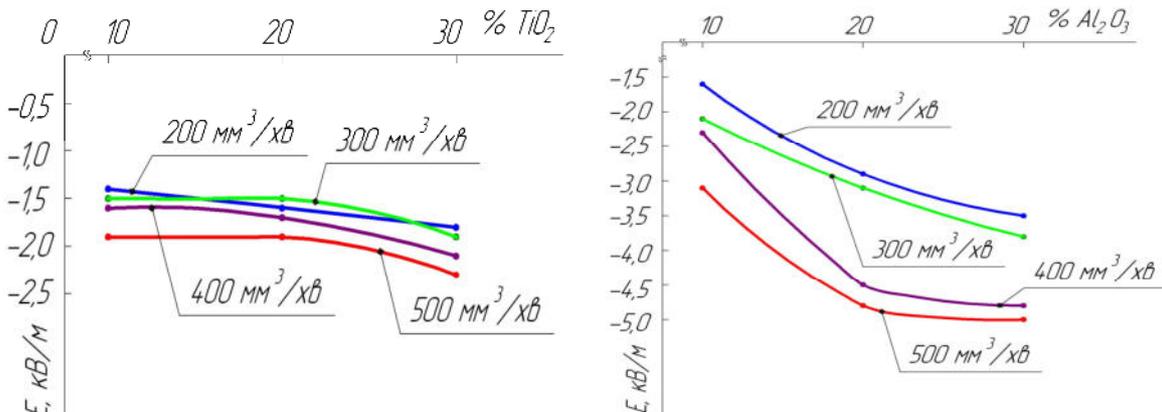


Рис. 7.9. Зависимость напряженности электростатического поля шламу от содержания модификационных добавок в рабочем слое кругов: а – после шлифования кругами с модификационными добавками TiO_2 в стеклопокрытии кубонитовых зерен; б – после шлифования кругами с модификационными добавками Al_2O_3 в стеклопокрытии кубонитовых зерен

Таблица 7.10. Относительный расход зерен кубонита и шероховатость обработанной поверхности после шлифования кубонитовыми кругами со стеклопокрытием зерен и модификационными добавками в покрытие

Характеристика рабочего слоя кругов	Покрытие	Модификационная добавка	Q , мм ³ /мин	E , кВ/м	q_p , мг/г	Ra , мкм
КР125/100–100–ВР	–	–	200	$-0,5 \pm 0,03$	16,3	0,66
			300	$-1,0 \pm 0,05$	11,5	1,12
КР125/100С–100–ВР	Свинцовое стеклопокрытие	–	200	$-0,9 \pm 0,05$	8,0	0,47
			300	$-1,6 \pm 0,08$	5,4	1,10
			400	$-1,8 \pm 0,09$	6,1	1,08
			500	$-1,9 \pm 0,10$	23,2	1,11
КР125/100С3–100–ВР	Стекло двух систем	10 % ZrO ₂	200	$-1,9 \pm 0,10$	10,4	0,74
			300	$-1,9 \pm 0,10$	8,7	1,04
			400	$-2,2 \pm 0,11$	8,6	1,15
КР125/100С6–100–ВР	Стекло двух систем	20 % ZrO ₂	200	$-2,1 \pm 0,11$	11,3	0,66
			300	$-2,4 \pm 0,12$	6,7	1,07
			400	$-2,3 \pm 0,12$	7,5	1,15
КР125/100С7–100–ВР	Стекло двух систем	30 % ZrO ₂	200	$-1,9 \pm 0,10$	8,5	0,51
			300	$-2,6 \pm 0,13$	6,4	1,16
			400	$-2,6 \pm 0,13$	6,4	1,16
КР125/100С10–100–ВР	Стекло двух систем	10 % TiO ₂	200	$-1,4 \pm 0,07$	7,4	0,82
			300	$-1,5 \pm 0,08$	7,2	1,20
			400	$-1,6 \pm 0,08$	6,9	1,24
			500	$-1,9 \pm 0,10$	21,5	1,10
КР125/100С8–100–ВР	Стекло двух систем	20 % TiO ₂	200	$-1,6 \pm 0,08$	8,1	0,87
			300	$-1,5 \pm 0,08$	5,8	0,95
			400	$-1,7 \pm 0,09$	6,4	1,40
			500	$-1,9 \pm 0,10$	17,8	1,08
КР125/100С9–100–ВР	Стекло двух систем	30 % TiO ₂	200	$-1,8 \pm 0,09$	9,6	0,96
			300	$-1,9 \pm 0,10$	7,4	0,84
			400	$-2,1 \pm 0,11$	17,3	1,10
КР125/100С11–100–ВР	Стекло двух систем	10 % Al ₂ O ₃	200	$-1,6 \pm 0,08$	8,7	0,65
			300	$-2,1 \pm 0,11$	6,1	0,97
			400	$-2,3 \pm 0,12$	6,3	0,77
КР125/100С12–100–ВР	Стекло двух систем	20 % Al ₂ O ₃	200	$-2,9 \pm 0,15$	8,7	0,64
			300	$-3,1 \pm 0,16$	6,6	0,97
			400	$-4,5 \pm 0,23$	11,5	0,71
КР125/100С13–100–ВР	Стекло двух систем	30 % Al ₂ O ₃	200	$-3,5 \pm 0,18$	12,8	0,60
			300	$-3,8 \pm 0,19$	18,3	1,03
			400	$-4,8 \pm 0,24$	26,5	0,76

Выявлено, что стеклопокрытие повышает напряженность электростатического поля, причем наибольшая напряженность наблюдалась после шлифования кругами с модификационной добавкой в покрытия – Al_2O_3 , наименьшая – с TiO_2 .

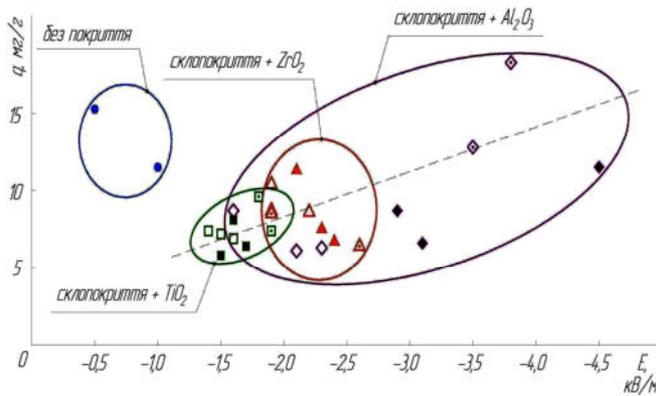


Рис. 7.10. Кластерные корреляционные связи между относительным расходом кубонита в кругах и напряженностью электростатического поля шлама для разных модификационных добавок в стеклопокрытие зерен кубонита

электростатического поля износостойкость кругов снижается, а это означает, что изменением содержания модификационных добавок в стеклопокрытии зерен можно существенно воздействовать на напряженность, а, следовательно, и на износостойкость кругов. Такие добавки влияют на

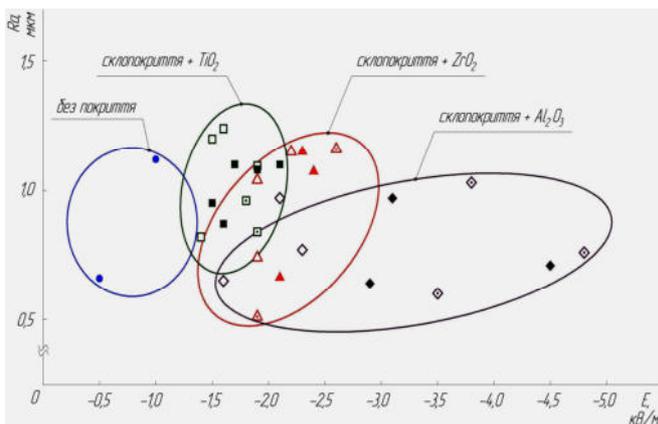


Рис. 7.11. Кластерные корреляционные связи между шероховатостью обработанной поверхности и напряженностью электростатического поля шлама после шлифования кругами из кубонита с модификационными добавками в стеклопокрытие зерен кубонита

Также, определены значения напряженности электростатического поля шлама от процентного содержания модификационных добавок в стеклопокрытии зерен кубонитовых кругов при соответствующей производительности обработки. Установлено, что чем большим является содержание модификационных добавок, тем напряженность электростатического поля шлама после обработки – более высокая (рис. 7.10).

Из рис. 7.10 наблюдается то, что с ростом напряженности электростатического поля износостойкость кругов снижается, а это означает, что изменением содержания модификационных добавок в стеклопокрытии зерен можно существенно воздействовать на напряженность, а, следовательно, и на износостойкость кругов. Такие добавки влияют на вскрытие режущей поверхности кругов, а, таким образом, на шероховатость поверхности и электризацию в зоне обработки.

На рис. 7.11 представлены корреляционные зависимости шероховатости обработанной поверхности стали Р6М5 от напряженности электростатического поля шламу после шлифования кубонитовыми кругами с разным стеклопокрытием. Видно, что четкой зависимости между напряженностью и шероховатостью не наблюдается, тем не менее, некоторые выводы можно сделать по модификаци-

онным добавкам. Например, это то, что если нам необходимо достичь меньших значений показателя шероховатости Ra , то лучше в качестве модификационных добавок в стеклопокрытие зерен кубонита использовать добавку Al_2O_3 .

Приведенное выше показывает, что изменением содержания модификационных добавок введенных в стеклопокрытие кубонитовых зерен можно существенно влиять на напряженность электростатического поля, а соответственно и на износостойкость кругов. Косвенно это может свидетельствовать о том, что возможно и введение добавок непосредственно в рабочий слой круга позволит воздействовать на напряженность электростатического поля, что мы и покажем ниже.

Важной характеристикой абразивного слоя кругов из СТМ является связка, поэтому проведены исследования по влиянию материала связки рабочего слоя кругов из СТМ на величину напряженности электростатического поля шлама при шлифовании алмазными и кубонитовыми кругами с производительностью обработки – $500 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Видно (табл. 7.11), что использование кругов на металлической связке в обоих случаях усиливает электризацию в зоне обработки.

Таблица 7.11. Значения напряженности электростатического поля шлама в зависимости от материала связки рабочего слоя круга

Характеристика рабочего слоя	$ E $, кВ/м
АС6 125/100–100–В2-08	$2,1 \pm 0,11$
КР 125/100–100–В2-08	$1,7 \pm 0,09$
АС6 125/100–100–М2-01	$2,7 \pm 0,14$
КР 125/100–100–М2-01	$1,9 \pm 0,10$

Приведенное показывает, что такое изменение связки, особенно для алмазных кругов при шлифовании твердого сплава, достаточно существенно отражается на напряженности электростатического поля. Вместе с тем, современными исследованиями [472] показано, что для повышения износостойкости полимерных связок в их состав вводятся зернистые наполнители, что соответственно изменяет и условия фрикционного контакта рабочего слоя круга с обрабатываемым материалом.

В ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины разработана технология и методы компактирования микропорошков кубонита физико-химическим синтезом и изготовления из этих композиционных компактов шлифпорошков зернистостей от 630/500 до 50/40 мкм [473]. Применительно к исследованиям, излагаемым в данной главе, рассматривались чистые компакты из КНБ и металлизированные никелем (рис. 7.12) зернистостями 160/125 та 315/250. Введение таких компактов, имеющих слоистое стро-

ение (рис. 7.13), в связку изменяет условия фрикционного контакта связки, шлама и обрабатываемого материала, что, как следствие и должно отразиться на показателе напряженности электростатического поля.

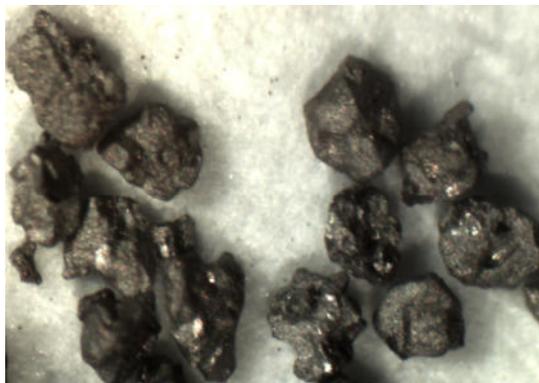


Рис. 7.12. Общий вид металлизированных шлифпорошков компактов зернистостью K315/250 из микропорошков кубонита

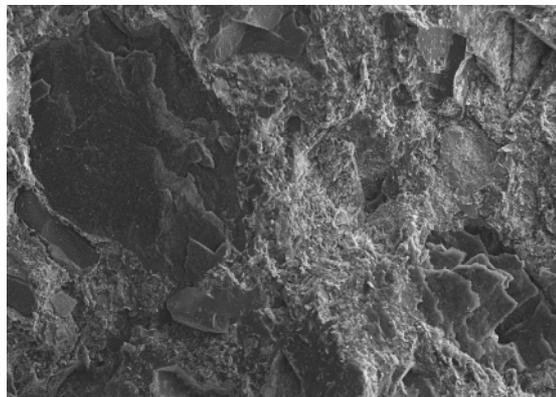


Рис. 7.13. Скол рабочего слоя круга с компактами K315/250

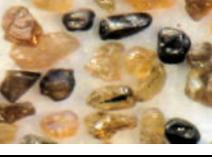
Для определения влияния указанных компактов на величину напряженности электростатического поля шлама проведено шлифование образцов твердого сплава Т15К6 кругом типоразмера 12А2-45° 125×5×3×32 АС6 125/100-В2-08-100, а также кругами того же типа и габаритных размеров с комбинированным содержанием в абразивном слое алмазного порошка зернистости 125/100 и компактов зернистости 160/125 и 315/250, причем последние рассматривались двух вариантов: чистые и металлизированные никелем, на станке 3В642 при производительности обработки 500 мм³/мин. Из табл. 7.13 видно, что введение чистых компактов и повышение их концентрации в связке приводит к определенному снижению величины напряженности электростатического поля, причем такое снижение увеличивается с повышением концентрации компактов в связке. Введение в рабочий слой круга металлизированных компактов (п.п. 6 и 7 табл. 7.12) наоборот – увеличивает значение напряженности электростатического поля шлама, как относительно алмазного круга без введения компактов (п. 1 табл. 7.12), так и в сравнении с кругами с чистыми компактами (п.п. 5 та 7 табл. 7.12).

Другим случаем изменения структуры рабочего слоя шлифовальных кругов добавками, как указано нами выше, является введение зернистых минеральных концентратов [474]. В качестве добавок рассматривались зернистые минеральные концентраты Украинского производства (табл. 7.13): рутил (TiO_2), ильменит ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$), дистен ($\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{O}$), циркон ($\text{Zr}[\text{SiO}_4]$), ставролит ($\text{Fe}_2\text{Al}_9[\text{SiO}_4]\text{O}_7(\text{OH})$) и кварц (SiO_2).

Таблица 7.12. Значения напряженности электростатического поля шлама при шлифовании кругами с разной концентрацией алмазных зерен та наличием компактов в рабочем слое

№, п/п	Характеристики рабочего слоя кругов	E, кВ/м
1	АС6 125/100–В2-08–100 %	–2,1±0,11
2	АС6 125/100–75%+К160/125–25%–В2-08	–2,0±0,10
3	АС6 125/100–50%+К160/125–50%–В2-08	–1,8±0,09
4	АС6 125/100–25%+К160/125–75%–В2-08	–1,6±0,08
5	АС6 125/100–50%+К315/250–50%–В2-08	–1,7±0,09
6	АС6 125/100–75%+К315/250метал–25%–В2-08	–2,5±0,13
7	АС6 125/100–50%+К315/250метал–50%–В2-08	–2,5±0,13

Таблица 7.13. Физико-механические характеристики зернистых минеральных концентратов [474]

Концентрат	Общий вид	Характеристики		
		Твердость по Моосу	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, Н
Рутиловый (TiO ₂)		6,0	4,15–4,30	2,0
Льменитовый (Fe ₂ O ₃ · TiO ₂)		5,5–6,5	4,12–4,17	2,1
Дистенсиллиманитовый Al ₂ [SiO ₄]O		5,5–7,0	3,20–3,50	2,2
Цирконовый Zr[SiO ₄]		7,5	4,50...4,65	2,8
Ставролитовый (Fe ₂ Al ₉ [SiO ₄]O ₇ (OH))		7,5	3,60–3,75	3,0
Кварцовый (SiO ₂)		7,25	2,65	3,7

Определение зависимости электрических явлений от характеристики кругов с указанными включениями в рабочий слой круга изучалось после шлифования твердого сплава Т15К6 кругами формы 12А2-45 125×5×3×32 на станке ЗВ642 при производительности обработки 500 мм³/мин. Результаты исследований приведены в табл. 7.14 и на рис. 7.14 и 7.15.

Таблица 7.14. Значения напряженности электростатического поля при шлифовании алмазными кругами от вида добавок в рабочем слое

№ П/П	Характеристики рабочего слоя кругов на связке В2-08	Е, кВ/м
1	АС6 125/100-75 + Кварц 315/250-25-В2-08	-2,3±0,12
2	АС6 125/100-75 + Дистен 160/125-25-В2-08	-2,7±0,14
3	АС6 125/100-75 + Ильменит 160/125-25-В2-08	-2,4±0,12
4	АС6 125/100-75 + Ставролит 160/125-25-В2-08	-2,3±0,11
5	АС6 125/100-75 + Циркон 160/125-25-В2-08	-2,1±0,10
6	АС6 125/100-75 + Рутил 125/100-25-В2-08	-1,6±0,08
7	АС6 125/100-75 + Рутил 160/125-25-В2-08	-1,8±0,09

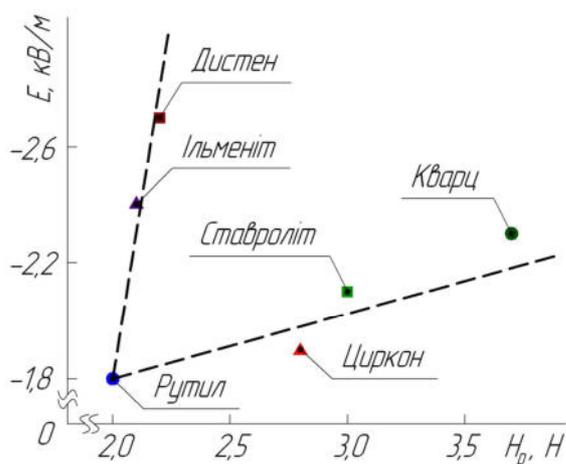


Рис. 7.14. Напряженность электростатического поля продуктов обработки твердого сплава Т15К6 при использовании алмазных шлифовальных кругов с введением зернистых концентратов

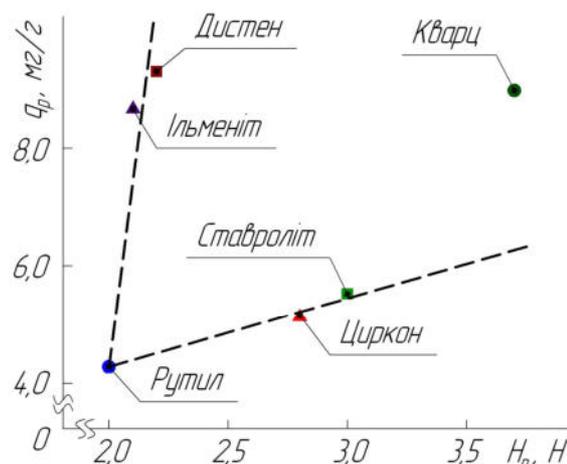


Рис. 7.15. Относительный расход алмазов в шлифовальных кругах с добавками зернистых концентратов в рабочий слой круга при шлифовании твердого сплава Т15К6

Анализ табл. 7.14 и рис. 7.14 показывает, что наибольшее значение напряженности электростатического поля шлама зафиксировано после обработки кругами с добавками дистена в рабочем слое, наименьшее — с добавками рутила (TiO₂). Оценив по полученным значениям, износостойкость алмазных кругов, можно утверждать, что наибольшую износостой-

кость имеют круги с содержанием рутила в качестве функциональной добавки в рабочем слое, наименьшую – с добавками дистена (рис. 7.15).

Приведенное соответствует тем исследованиям, которые приведены выше для модификационных добавок в стеклопокрытия зерен КНБ (рис. 7.10), где также проявили себя добавки TiO_2 . Это вероятно следует связать с их высокими диэлектрическими характеристиками.

Анализ физических характеристик абразивных зернистых концентратов (табл. 7.14), данных по напряженности (рис. 7.14) и по износостойкости кругов (рис. 7.15) в зависимости от прочности зерен показывает, что эти данные расходятся по двум направлениям и выпадает из них кварц. То есть, по прочностным характеристикам минеральные концентраты не образуют какого-то однозначного обобщения. Вместе с тем, когда мы построим зависимость величины напряженности электростатического поля, возникающего при шлифовании твердого сплава Т15К6 с использованием кругов с разными концентратами, от относительного расхода алмазов при этом, то тут мы уже видим определенное обобщение (рис. 7.16), причем с ростом напряженности износ кругов снижается. В целом, анализ физических характеристик минеральных зернистых концентратов (табл. 7.13), данных по износостойкости кругов (рис. 7.16) и напряженности электростатического поля шлама (рис. 7.14), показывает то, что для повышения износостойкости шлифовальных кругов, замену части алмазов в их рабочем слое на опорные элементы из минеральных концентратов необходимо

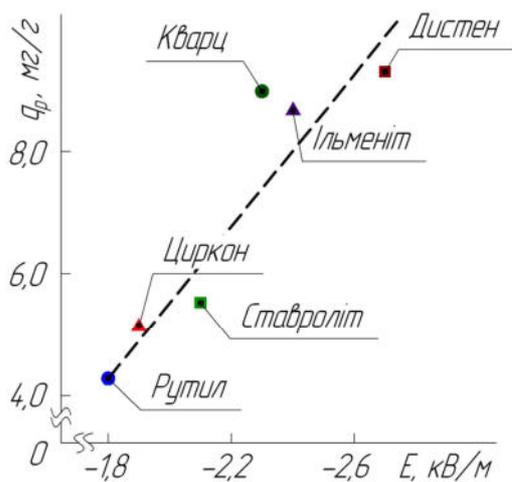


Рис. 7.16. Связь между напряженностью электростатического поля продуктов обработки твердого сплава Т15К6 с относительным расходом алмазов при использовании алмазных шлифовальных кругов с введением в рабочий слой зернистых концентратов

проводить за счет такого концентрата, как рутил.

Для дополнительной проверки данного вывода нами были проведены оценочные исследования напряженности электростатического поля шлама в процессе шлифования твердого сплава Т15К6 с разной производительностью для двух кругов с такими рабочими слоями: АС6 125/100–В2-08–100 и АС6 125/100–75 + Рутил–25–В2-08 (табл. 7.15). Анализ данных табл. 7.15 показывает, что с повышением производительности обработки напряженность электростатического поля шлама ожидается возрастает, но при этом, во всех случаях, наличие рутила в рабочем слое приводит к ее снижению, а значит износ кругов с наличием рутила будет ниже,

чем для обычных алмазных кругов. Для проверки данного предположения была исследована износостойкость указанных выше шлифовальных кругов при шлифовании твердого сплава Т15К6 с производительностью 500 мм³/мин (поперечная подача 0,1 мм/дв.х) без охлаждения. Исследования показали, что относительный расход алмазов в случае шлифования стандартными алмазными кругами составил для таких условий – 8,4 мг/г, а для слоя с содержанием рутила относительный расход алмазов составляет меньшую величину – 6,9 мг/г, как это и следовало бы ожидать из данных табл. 7.15.

Таблица 7.15. Напряженность электростатического поля шлама при шлифовании твердого сплава Т15К6

Производительность шлифования Q , мм ³ /мин	Остаточная напряженность электростатического поля шлама, E , кВ/м	
	АС6 125/100–100–В2-08	АС6 125/100–75 + Рутил–25–В2-08
100	–0,6±0,03	–0,2±0,01
200	–1,1±0,06	–0,9±0,05
300	–1,4±0,07	–1,3±0,07
400	–1,9±0,10	–1,6±0,08
500	–2,1±0,11	–1,8±0,09

Кроме того, как следует из рис. 7.16, большему значению напряженности электростатического поля шлама соответствует больший относительный расход алмазов, а значит для снижения интенсивности электризации в зоне шлифования и, как следствие, повышения износостойкости шлифовальных кругов из СТМ, необходимо использовать в составе рабочего слоя такой зернистый минеральный концентрат как рутил.

Подводя итог сведениям, изложенным в данной подглаве, обратим внимание также на сравнение данных по связи между напряженностью электростатического поля и относительным расходом алмазов в кругах при шлифовании твердого сплава Т15К6 для трех вариантов рабочего слоя круга: без введения добавок в рабочий слой алмазного круга, с введением рутила и введением металлизированного (никелем) компакта из КНБ, которые показывают (рис. 7.17), что во всех случаях, как и можно было бы ожидать, повышение напряженности электростатического поля шлама коррелирует с увеличением относительного расхода алмазов в кругах, а, следовательно, мероприятия, которые повышают напряженность ухудшают износостойкость шлифовальных кругов.

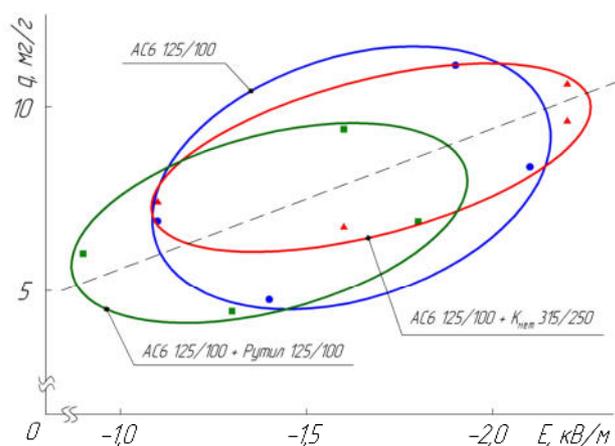


Рис. 7.17. Связь между напряженностью электростатического поля и износостойкостью алмазных кругов с разными добавками в рабочий слой при шлифовании твердого сплава Т15К6

Таким образом, применяя круги на металлическом связующем с металлизированным покрытием зерен и дополнительным вводом в рабочий слой функциональных добавок, таких как дистен или ильменит можно воздействовать на интенсификацию электризации в зоне контакта круга с деталью. Этот эффект возможно позитивно использовать для повышения работоспособности кругов из СТМ в том числе за счет формирования на их рабочей поверхности катодных пленок, о чем было указано в предыдущей

главе. Такое решение вопроса позволяет избавиться от введения в рабочую зону при шлифовании дополнительной энергии, что позволит снизить относительный расход алмазно-абразивных зерен, в отличие от процессов принудительного введения электрической энергии в зону обработки. Вместе с тем, при использовании кругов на металлической связке может возникать еще одно электрическое явление, на которое нами обращено внимание далее.

7.3. Функционирование термоЭДС при шлифовании кругами из СТМ

В отличие от явления электризации, которое, как мы уже указывали выше, почти не исследовано для условий шлифования, явление возникновения и функционирования термоЭДС при шлифовании в определенной степени исследовано. Вместе с тем, таких исследований для процессов шлифования кругами из СТМ в литературе нами не обнаружено, поэтому в данной подглаве мы и уделили особое внимание именно функционированию термоЭДС при шлифовании кругами из СТМ.

Укажем, что для кругов на металлическом связующем самым эффективным способом учета интенсивности действия электризации на процесс шлифования является сигнал термоЭДС, поскольку в этом случае образуется общая токопроводная система (электропроводный инструмент – электропроводная деталь). При абразивной обработке важную роль в формировании сигнала термоЭДС играют режущие зерна, поэтому реальным сред-

ством влияния на зону резания является покрытие зерен, поскольку это позволяет вводить разные материалы непосредственно в зону контакта и, тем самым, смещать величины значений термоЭДС в необходимом направлении. Укажем также на то, что как показано в [117] для металлических связок целесообразно использовать не металлическое, а стеклопокрытие (рис. 7.18), что нами и было исследовано.

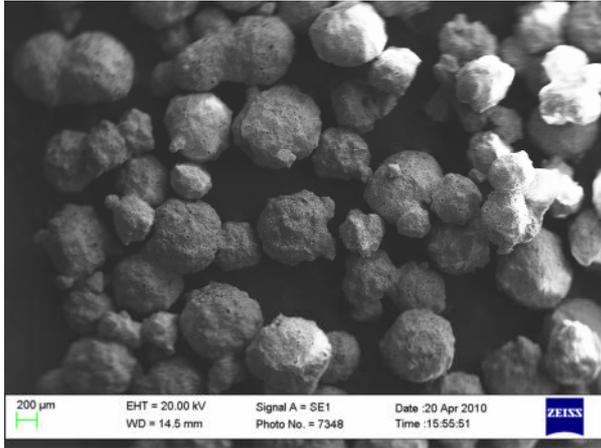


Рис. 7.18. Порошки кубонита со стеклопокрытием

титаном и медью (~20 масс. %). С такими зернами изготовили шлифовальные круги формы 12А2-45° 125×5×3×32 на металлической связке М1-10 и шлифовали быстрорежущую сталь Р6М5 при производительностях обработки от 100 до 500 мм³/мин [475, 476]. Определяли термоЭДС рабочего и холостого хода методом естественной термопары. Результаты исследований представлены в табл. 7.16. Аппроксимированные графики зависимости термоЭДС от производительности обработки приведены на рис. 7.19.

Результаты исследования показывают, что с повышением производительности шлифования значения термоЭДС ожидаемо возрастают. Это объясняется тем, что с увеличением производительности обработки, тем-

Для зерен из кубического нитрида бора КР 125/100 использовали свинцовоборосиликатное стекло системы PbO–ZnO–B₂O₃–SiO₂, а для введения различных металлов в зону обработки дополнительно металлизировали зерна с указанным стеклопокрытием такими металлами: титаном (~9 масс. %, диффузионное технологическое покрытие), титаном и никелем (~20 масс. %),

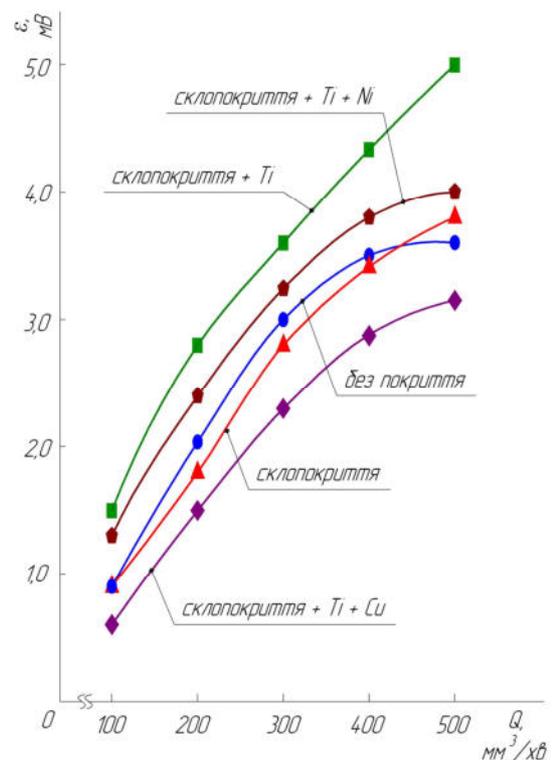


Рис. 7.19. Зависимость термоЭДС от производительности шлифования стали Р6М5 кубонитовыми кругами с разным покрытием зерен

пература в зоне шлифования растет, а термоЭДС является следствием изменения температуры и определяется как: $\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$, где α – коэффициент термоЭДС. Значения величин термоЭДС при шлифовании кругами без покрытия и со стеклопокрытием почти совпадают, то есть именно стеклопокрытие принципиально не вносит существенного вклада в термоЭДС.

Таблица 7.16. Величины термоЭДС рабочего и холостого хода при шлифовании кубонитовыми кругами с разным покрытием рабочих зерен

Характеристика круга	Q , мм ³ /мин	$\varepsilon_{\text{раб.х}}$, мВ	$\varepsilon_{\text{х.х}}$, мВ
12A2-45 125x5x3x32–КР 125/100–100– M1-10 (без покрытия)	100	1,3±0,03	0,6±0,01
	200	2,4±0,05	1,4±0,03
	300	3,0±0,06	2,8±0,06
	400	3,8±0,08	3,6±0,07
	500	4,0±0,08	3,8±0,08
12A2-45 125x5x3x32–КР 125/100C07– 100–M1-10 (стеклопокрытие C07)	100	0,9±0,02	0,4±0,01
	200	1,8±0,04	1,4±0,03
	300	2,8±0,06	1,9±0,04
	400	3,3±0,07	2,6±0,05
	500	3,8±0,08	3,4±0,07
12A2-45 125x5x3x32–КР 125/100C02– 100–M1-10 (стеклопокрытие C02 + Ti)	100	1,5±0,03	0,6±0,01
	200	2,8±0,06	1,6±0,03
	300	3,6±0,07	2,7±0,05
	400	4,1±0,08	3,3±0,07
	500	5,0±0,10	4,0±0,08
12A2-45 125x5x3x32–КР 125/100C05– 100–M1-10 (склопокрытие C05 + Ti + Cu)	100	0,6±0,01	0,4±0,01
	200	1,5±0,03	1,2±0,02
	300	2,3±0,05	1,7±0,03
	400	3,9±0,08	3,1±0,06
	500	4,4±0,09	3,9±0,08
12A2-45 125x5x3x32–КР 125/100C03– 100–M1-10 (склопокрытие + Ti +Ni)	100	0,9±0,02	0,5±0,01
	200	1,9±0,04	1,2±0,02
	300	3,0±0,06	2,0±0,04
	400	3,5±0,07	2,9±0,06
	500	3,6±0,07	3,2±0,06

Наличие металлизации на поверхности зерна со стеклопокрытием влияет существенно. Так, дополнительная металлизация зерен медью снижает величину термоЭДС, а металлизация никелем и титаном наоборот ее повышают. Для уточнения влияния металлов, применяемых при металлизации, на протекание электрических процессов в зоне обработки и соответствующего изменения эксплуатационных характеристик кругов, исследована износостойкость кругов при шлифовании с производительностью

200 мм³/мин и в табл. 7.17 и на рис. 7.20 представлены данные по связи между величиной термоЭДС и относительным расходом зерен КНБ в кругах при шлифовании стали Р6М5.

Таблица 7.17. Относительный расход зерен КНБ при шлифовании стали Р6М5 кругами с разным стеклопокрытием зерен

Характеристики круга	$\epsilon_{\text{раб.х}}$, мВ	q , мг/г	Ra , мкм
12А2-45 125×5×3×32–КР 125/100 100%-М1-10 (без покрытия)	2,4±0,05	19,13	0,71
12А2-45 125×5×3×32–КР 125/100С07 100%-М1-10 (стеклопокрытие С07)	1,8±0,04	8,88	0,67
12А2-45 125×5×3×32–КР 125/100С02 100%-М1-10 (стеклопокрытие С02 + Ti)	2,8±0,06	39,98	0,93
12А2-45 125×5×3×32–КР 125/100С05 100%-М1-10 (стеклопокрытие С05 + Ti + Cu)	1,5±0,03	12,7	0,9
12А2-45 125×5×3×32–КР 125/100С03 100%-М1-10 (стеклопокрытие + Ti +Ni)	1,9±0,04	3,88	0,91

Технологическое покрытие титаном значительно ухудшает износостойкость, а другие покрытия улучшают износостойкость в сравнении с кругами без покрытия зерен. Причем металлизация медью позволяет снизить значение термоЭДС, а никелем увеличивает его по сравнению с кругом без покрытия. Кстати это совпадает с представленными выше исследова-

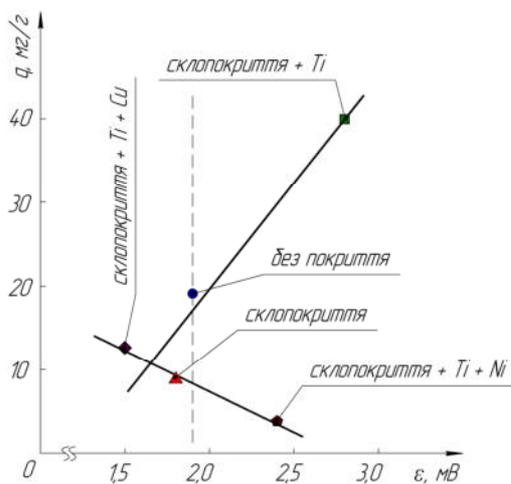


Рис. 7.20. Связь между величиной термоЭДС и относительным расходом зерен КНБ с разным их покрытием в кругах при шлифовании стали Р6М5

ованиями по электризации, что подтверждает определенную связь между этими явлениями. Вместе с тем, износостойкость кругов из КНБ более высока при использовании стеклопокрытия с металлизацией никелем.

Таким образом, для существенного снижения величины термоЭДС при шлифовании кругами из КНБ необходимо применять металлизацию стеклопокрытия медью, а для увеличения – металлизацию титаном или никелем, причем последний является более приемлемым с точки зрения увеличения износостойкости.

Подобные исследования проведены и для процессов шлифования кругами со стеклопокрытием алмазных зерен.

В качестве стеклопокрытия использовалось стекло системы другой, чем для кругов из КНБ, а именно – $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$. В процессе исследования определены величины термоЭДС рабочего и холостого хода станка (табл. 7.18).

Таблица 7.18. Значения величин термоЭДС рабочего и холостого хода при шлифовании алмазными кругами без и со стеклопокрытием рабочих зерен

Характеристики круга	Q , мм ³ /мин	$\varepsilon_{\text{раб.х}}$, мВ	$\varepsilon_{\text{х.х}}$, мВ
12A2-45 125×5×3×32– АС6 125/100–100–М1-10 (без стеклопокрытия)	100	-1,7±0,03	-0,7±0,01
	200	-3,7±0,07	-2,7±0,05
	300	-4,3±0,09	-3,8±0,08
	400	-6,4±0,13	-5,1±0,10
	500	-6,5±0,13	-5,7±0,11
12A2-45 125×5×3×32– АС6 125/100С12–100–М1-10 (стеклопокрытие С12)	100	-2,4±0,05	-1,3±0,03
	200	-6,0±0,12	-4,6±0,09
	300	-5,5±0,11	-4,9±0,10
	400	-4,9±0,10	-4,3±0,09
	500	-5,9±0,12	-5,4±0,10

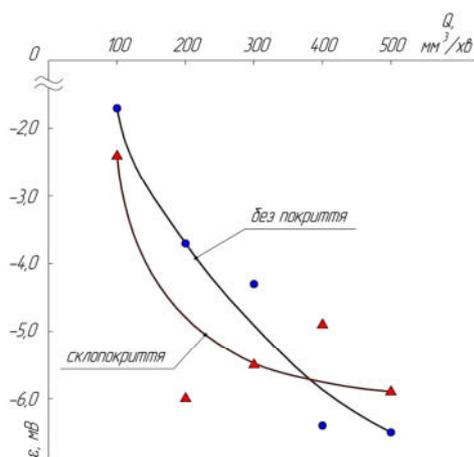


Рис. 7.21. Графики зависимости термоЭДС рабочего и холостого хода от производительности алмазного шлифования твердого сплава ВК8

Исследования закономерности изменения величины термоЭДС от производительности шлифования показывают, что тут имеются возможности для изменения величины термоЭДС в необходимом для определенных условий направлении (рис. 7.21), чего не наблюдается для кругов из КНБ. Из рис. 7.21 видно, что для алмазных зерен без покрытия зависимость величины термоЭДС от производительности является ожидаемой – возрастание с повышением производительности. А вот при обработке кругами со стеклопокрытием указанная зависимость другая. Тут мы наблюдаем сначала рост величины термоЭДС, а потом стабилизацию, а вследствие этого после 400 мм³/мин для кругов со стеклопокрытием величина термоЭДС является меньшей, чем для кругов без покрытия алмазных зерен.

В значительной степени это связано с тем, что для покрытия алмазных зерен используются стекла другой системы, чем для зерен КНБ, а именно – $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$, имеющие соответственно и другую температуру трансформации стекла и, как следствие, это дает возможность влиять на

изменение величины термоЭДС при использовании алмазных кругов. Исследована износостойкость алмазных кругов при шлифовании с производительностью $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$ твердого сплава ВК8 алмазными кругами типоразмера 12А2-45° 125×5×3×32 на металлической связке М1-10 с зернами АС6 125/100 без стеклопокрытия и со стеклопокрытием алмазных зерен. Результаты исследований приведены в табл. 7.19.

Таблица 7.19. Значения величин термоЭДС и относительного расхода алмазов в кругах при шлифовании твердого сплава ВК8

Характеристики круга	$\varepsilon_{\text{раб.х}}$, мВ	q , мг/г	Ra , мкм
12А2-45 125×5×3×32 АС6 125/100 100%-М1-10 (без стеклопокрытия)	$-3,7 \pm 0,07$	7,14	0,62
12А2-45 125×5×3×32 АС6 125/100С12 100%-М1-10 (стеклопокрытие С12)	$-6,0 \pm 0,12$	9,39	0,62

В отличие от кругов из КНБ использование стеклопокрытия для алмазных зерен является нецелесообразным поскольку относительный расход алмазов в кругах несколько возрастает. Установлено, что в первом случае расход составил – 7,1 мг/г, а во втором – 9,4 мг/г.

Из приведенного выше следует обратить внимание на то, что для алмазных и кубонитовых кругов знак термоЭДС является разным, причем для алмазных кругов при обработке твердых сплавов характерным является негативное значение термоЭДС, то для кубонитовых кругов при обработке быстрорежущих сталей – положительное значение.

7.4. Учет электрических явлений при шлифовании кругами из СТМ

Выше, в предыдущих подглавах, рассмотрены особенности возникновения и функционирования электрических и термоэлектрических явлений в процессах обработки кругами из СТМ. В то же время, в главе 6 обращено внимание на то, что в процессах шлифования с введением тока в зону контакта шлифовального инструмента и детали, на рабочем слое круга формируются катодные пленки, положительный эффект от которых состоит в повышении износостойкости связки и снижении расхода зерен СТМ. Формирование этих пленок возможно в условиях неявной поляризации, которые возможно достичь за счет использования электрических явлений, сопровождающих процесс шлифования. Как было показано, вели-

чина электрических явлений напрямую зависит от характеристик рабочего слоя кругов из СТМ и обрабатываемого материала. В свою очередь, при использовании кругов на металлических связках вследствие неравномерности рельефа круга (прерывистости обработки), в зону контакта инструмента с деталью попадает кислород, что является причиной окислительных процессов на контактирующих поверхностях и формирование оксидных пленок, вследствие повышенных температур и интенсивности трибоэлектрических процессов в зоне шлифования. Формирования же катодных пленок на рабочей поверхности круга можно достичь, благодаря окислительным процессам, только в тех условиях, когда в зоне шлифования будут формироваться негативные заряды, и, кроме того, необходимо следить, чтобы величина этих зарядов была бы как можно большей, поскольку это приведет к более интенсивному протеканию окислительных процессов. В этом случае при использовании металлических связок с повышенным содержанием меди возможен более интенсивный ее выход на поверхность, где формируются пленки, подобные пленкам, полученным при шлифовании с введением дополнительной энергии в зону обработки.

Исходя из изложенного выше, для достижения этого эффекта необходимо применять шлифовальные круги с повышенной концентрацией зерен СТМ, кроме того целесообразно использовать покрытия зерен, причем более эффективным является стеклопокрытие с введением в его состав модификационных добавок или металлизация стеклопокрытия. Укажем, что наиболее эффективной добавкой, которая приводит к большей интенсивности возникновения негативных зарядов в зоне шлифования – Al_2O_3 . Такого же эффекта можно достичь и введением в рабочий слой зернистого концентрата дистена – $Al_2[SiO_4]O$. В качестве металлизированного покрытия рабочих зерен целесообразно использовать покрытие титаном или же покрытия титаном и никелем.

В свою очередь чрезмерное накопление зарядов во время обработки характеризует и значительный относительный расход зерен СТМ и для избежания этого необходимо использовать круги на полимерных связках. При этом, желательно использовать стеклопокрытие зерен без модификационных добавок в покрытие или металлизации такого покрытия. Этого же возможно достичь введением в рабочий слой кругов зернистых минеральных концентратов в виде рутила (TiO_2).

Вместе с тем, укажем, что в процессе осуществления алмазно-абразивной обработки резание осуществляется только небольшой частью абразивных зерен, находящихся на рабочей поверхности, и возможен непосредственный контакт связки круга с обрабатываемой поверхностью. Характеристики трения рабочего слоя имеют существенное значение, поскольку существует определенная опасность схватывания связующего с

обрабатываемым материалом. Такое схватывание может привести до вырыву частичек связующего, повышению коэффициента трения, ростом температуры в зоне контакта и разрушению. На преодоление трения тратится значительная часть энергии в процессе обработки, поэтому необходимо создавать такие условия работы алмазного зерна, какие бы оптимально позволяли осуществлять резание при минимальных контактных нагрузках и потерях зерен СТМ.

На практике изменение фрикционных характеристик связующего алмазно-абразивного инструмента достигается за счет пропитки его специальными веществами (импрегнации) или нанесения твердых смазочных покрытий на рабочую поверхность инструмента. Более детально их использование приведено в [477].

При торцовой алмазной обработке инструмента из твердых сплавов твердые смазки дают определенный положительный эффект. Для установления эффективности применения тех или других способов снижения трения в зоне контакта возможно использовать сигналы, сопровождающие процесс шлифования, например, электрические. В работах [478, 479] для этого использован такой показатель, как величина напряженности электростатического поля шлама при шлифовании кругами из СТМ. Для выявления влияния компонентного состава твердых смазок на величину напряженности шлама проведено шлифование быстрорежущей стали Р6М5 кубонитовым кругом 12А2-45° 125×5×3×32–КР 125/100–В2-08–100 с использованием твердых смазок различного состава. Обработка проводилась на станке мод. 3В642 при производительности 500 мм³/мин и поперечной подаче $S_{\text{поп.}} = 0,05$ мм/дв.х., а значения напряженности электростатического поля шлама фиксировались с помощью прибора мод. ИПЭП-1. Результаты исследований приведены в табл. 7.20 и на рис. 7.22.

Таблица 7.20. Значения напряженности электростатического поля шлама после абразивной обработки с использованием твердых смазок в виде карандашей

Компонентный состав твердой смазки	Напряженность шлама, Е, кВ/м
Обработка без твердой смазки	–3,9
Графит – 100 %	–4,8
Воск – 25 %, графит – 75 %	–4,3
Воск – 50 %, графит – 50 %	–3,8
Воск – 75 %, графит – 25 %	–3,1
Стеарин – 50 %, графит – 50 %	–5,7
Воск – 50 %, графитол – 50 %	–2,1

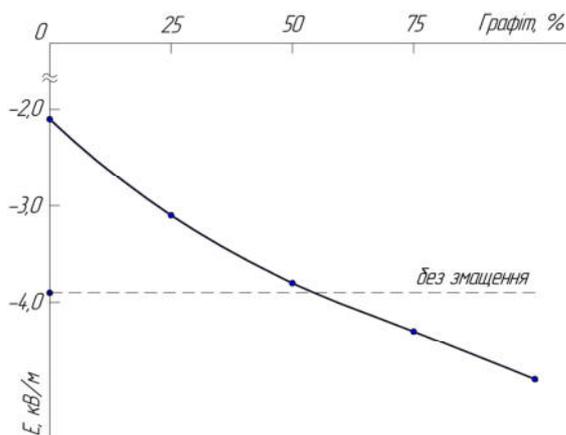


Рис. 7.22. Зависимость напряженности электростатического поля шлама при шлифовании стали Р6М5 с использованием твердой смазки группы воск/графит

Согласно результатам исследований наибольшее значение, взятое по модулю, напряженности электростатического поля шлама наблюдается после шлифования с использованием в качестве твердой смазки карандашей со стеарином и графитом в своем составе, а наименьшее – с содержанием воска и графитола. При использовании твердой смазки группы воск/графит минимальное значение напряженности шлама зафиксировано после использования карандашей с 25 % содержанием графита. Это значение ниже, чем значения напряженности, наблюдаемые после шлифования без использования смаз-

ки. При использовании карандашей с концентрацией воск/графит – 50/50 фактически наблюдаются значения напряженности, фиксируемые при шлифовании без смазки, причем с увеличением содержания графита в составе карандаша – значения напряженности возрастают (рис. 7.22). Вероятно, это объясняется тем, что графит имеет достаточно высокую электропроводность, а воск, как связующее, усиливает смазывающий эффект и изменяет ход фрикционных процессов (снижение температуры резания и коэффициента трения) в зоне контакта инструмента с обрабатываемой деталью, тем самым снижая относительный расход СТМ. То есть, применение твердых смазок приводит к изменению трибоэлектрических процессов в зоне обработки и повышению износостойкости абразивного инструмента [478, 479].

Г Л А В А 8

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Технологические среды (ТС) при абразивной обработке должны обладать рядом функций: охлаждающей, смазывающей, моющей и др. В условиях шлифования кругами из синтетических алмазов и кубонита наибольшее влияние на процесс шлифования оказывают смазывающая и моющая способность ТС. При шлифовании алмазными кругами большее внимание уделяется смазывающей способности, а кубонитовыми – моющей способности. В других равных условиях охлаждающие способности ТС должны быть более высокими при шлифовании алмазными кругами [480]. Обратим внимание на то, что подача смазывающе-охлаждающей жидкости в зону шлифования не оказывает влияния на контактную температуру при шлифовании. Вследствие высоких давлений, возникающих в зоне контакта алмаза с металлом, жидкость не попадает в эту зону и ее охлаждающее действие происходит после прохождения режущего зерна, что в целом снижает только среднюю температуру шлифования [272].

8.1. Охлаждающая функция технологических сред

На прямые охлаждающие характеристики ТС оказывает влияние не только ее теплоемкость и теплопроводность, а и способность ТС к смачиванию и парообразованию, поскольку при высоких скоростях резания и температурах жидкость может не входить в непосредственный контакт с поверхностью инструмента из-за низкой смачиваемости или образования паровой подушки. Снижение температуры при резании достигается преимущественно за счет активного теплоотвода с незанятых стружкой поверхностей инструмента, примыкающих к зоне резания. Увеличение интенсивности отвода тепла от стружки оказывает меньшее влияние на температуру в зоне резания из-за кратковременного контакта стружки с инструментом. Для лучшего отбора тепла от инструмента в нем образуют внутренние полости, содержащие воду, фреон или металлы, имеющие низкую температуру плавления и высокую теплоемкость [481].

Охлаждающий эффект внешней среды состоит в отборе, через конвективный теплообмен, тепла, образующегося при пластическом деформировании и трении. Скорость нагревания в очаге деформации и контакте «абразивное зерно–обрабатываемый материал» является достаточно боль-

шой (около $2 \cdot 10^7$ град/с) в связи с чем, отбор тепла из этой зоны путем выноса его частичками внешней среды является практически невозможным. Поэтому охлаждающий эффект имеет место только за пределами мгновенной зоны контакта [482].

Охлаждающая функция МОТС связана с количеством теплоты, которое может быть отведено от режущего инструмента, и определяется коэффициентом теплообмена, который в значительной степени зависит от теплофизических и скоростных характеристик среды [483]. Пути интенсификации охлаждения [258]:

- использование в качестве ТС жидкостей, имеющих наиболее высокую теплопроводность, теплоемкость и плотность;
- использование ТС, имеющих наименьшую кинематическую вязкость;
- увеличение скорости относительного перемещения потока ТС и охлаждаемого объекта.

Среди методов интенсификации теплоотдачи через ТС по мнению авторов [484] наиболее эффективными являются те, которые могут воздействовать на пристенную турбулентность. Напомним, что ламинарный режим движения жидкости происходит в том случае, когда при прохождении жидкости в промежутке отсутствует ее завихрение и число Рейнольдса Re в этом случае является меньшим 1000, а турбулентный режим движения жидкости происходит в том случае, когда поток жидкости имеет определенную неупорядоченность и при этом число Рейнольдса Re является большим за 2000 [485]. К способам воздействия на пристенную турбулентность относится наложение на двигающийся поток ультразвуковых колебаний. Связано это с тем, что кинетическая энергия турбулентного движения является малой в сравнении с кинетической энергией усредненного течения, поэтому воздействие на пристенную турбулентность обычно требует небольших (в сравнении с воздействием на течение в целом) энергетических затрат. Интенсификация теплоотдачи за счет наложения на поток жидкости периодических колебаний (ультразвуковых) позволяет до 1,25 раза повысить такую теплоотдачу. Так, при плоском шлифовании стали 40X снижение контактной температуры за счет теплоотвода без наложения ультразвука составило 7 %, а с наложением ультразвука – 12 %. Для стали 95X18 это снижение составило 3 и 7 % соответственно [484].

Обратим внимание, что интенсификация теплоотдачи в зоне шлифования на 20% является эквивалентной повышению затрат на подачу ТС в 7 раз, а повышение теплоотдачи на 40 % является эквивалентным более чем 30-кратному увеличению расхода ТС. Учитывая это, компенсация интенсивного теплообразования за счет экстенсивного повышения расхода ТС является малоэффективной [484].

Охлаждающая функция при кратковременном и прерывистом контакте не успевает проявиться и не оказывает влияние на контактную температуру. При удлинении контакта роль охлаждения увеличивается [486].

Наиболее эффективную охлаждающее действие обеспечивают растворы разных солей в воде, удельная теплоемкость которой составляет 4,187 кДж/(кг·К), а теплопроводность 0,5815 Вт/(м·К). Для масел – удельная теплоемкость составляет 1,884 кДж/(кг·К), а теплопроводность 0,14 Вт/(м·К) [486].

Сравнение влияния разных сред на охлаждающую функцию приведено в табл. 8.1 [483].

Таблица 8.1. Влияния разных технологических сред на относительную интенсивность охлаждения

Технологическая среда и условия ее воздействия	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, кДж/(кг·К)	Вязкость $\nu \cdot 10^3$, м ² /год	Плотность, кг/м ³	Относительная интенсивность охлаждения, %
1	2	3	4	5	6
Вода (полив сверху со скор. 0,2 м/с, темп. 20°C)	0,598	4,182	3,6	998,2	100,0
Эмульсия 10%-ная (условия, как и у воды)	0,345	3,701	5,16	990,8	60,6
Керосин (условия, как и у воды)	0,146	1,875	7,92	800	21,7
Четыреххлористый углерод CCl ₄ (условия, как и у воды)	0,101	0,531	2,19	1594,9	19,6
Масло индустриальное 20 (условия, как и у воды)	0,126	1,833	162,0	875,6	7,8
Сульфофрезол (условия, как и у воды)	0,119	1,842	337,0	900,1	5,7
Воздух (обдув со скор. 100 м/с, температура 20 °C)	0,025	1,004	54,3	1,205	17,7
Воздух (обдув со скор. 100 м/с, температура -40 °C)	0,021	1,013	36,0	1,515	19,0
Воздух (обдув со скор 300 м/с, температура 20 °C)	0,025	1,004	54,3	1,205	35,8

Продолжение табл. 8.1.

1	2	3	4	5	6
Воздух (обдув со скор. 300 м/с, температура $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0,021	1,013	36,0	1,515	38,6
Воздух (обдув со скор. 500 м/с, температура $20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0,025	1,004	54,3	1,205	50,1
Воздух (обдув со скор. 500 м/с, температура $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0,021	1,013	36,0	1,515	54,0

Далее укажем свойства охлаждающих сред.

Воздух – как охлаждающая технологическая среда. Свойства [483]: при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$: плотность, кг/м^3 – 1,205; теплопроводность, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – 0,025; теплоемкость, $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ – 1,004; вязкость $\nu\cdot 10^3$, $\text{м}^2/\text{час}$ – 54,3; при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$: плотность, кг/м^3 – 1,515; теплопроводность, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – 0,021; теплоемкость, $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ – 1,013; вязкость $\nu\cdot 10^3$, $\text{м}^2/\text{час}$ – 36,0.

Вода (H_2O) – как охлаждающая технологическая среда и основа водных ТС. Свойства – плотность, кг/м^3 – 998,2; теплопроводность, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – 0,598; теплоемкость, $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ – 4,182; вязкость $\nu\cdot 10^3$, $\text{м}^2/\text{час}$ – 3,6 [483]; электропроводность, $\text{Ом}\cdot\text{м}$ – 10^{-4} [487].

Водородный показатель (рН) для всех применяемых на практике концентрациях водных ТС должен составлять 9,0–9,5, что связано с требованиями безвредности для кожи человека [488].

Свойства солей, входящих в водные растворы охлаждающих сред:

Аммоний бром (NH_4Br) – плотность, $\cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ – 2,40; стандартная молярная теплоемкость, $\text{Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ – 88,7; растворимость в воде при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, г/100г – 74,2; температура возгонки, $^{\circ}\text{C}$ – 394 [489].

Аммоний фосфат ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) – молекулярная масса – 132,13; плотность, $\cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ – 1,77; стандартная молярная теплоемкость, $\text{Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ – 187; растворимость в воде при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, г/100г – 75,4; температура разложения, $^{\circ}\text{C}$ – 218. Соли являются бесцветными, ромбическими [489].

Аммоний хлор (NH_4Cl) – плотность, $\cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ – 1,53; стандартная молярная теплоемкость, $\text{Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ – 84,1; растворимость в воде при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, г/100г – 37,2; температура возгонки, $^{\circ}\text{C}$ – 338 [489]. Установлено, что при полировании стекла инструментом со связанным абразивом (CeO_2) введением в состав связки инструмента солей NH_4Cl производительность полирования повышается, а хемосорбция усиливается в 1,5 раза [490].

Бура (натрий тетраборнокислый, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) – плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 1,73; растворимость в воде при 20 °С, г/100г – 5,0 [489]. При превышении ПДК в ТС работники страдают хронической экземой, может наблюдаться облысение [491].

Нитрат калия (KNO_3) – плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 2,11; стандартная молярная теплоемкость, Дж/(моль·К) – 96,27; растворимость в воде при 20 °С, г/100г – 31,6; температура плавления, °С – 334 [489].

Нитрат натрия (NaNO_3) – плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 2,26; стандартная молярная теплоемкость, Дж/(моль·К) – 93,05; растворимость в воде при 20 °С, г/100г – 87,6; температура плавления, °С – 307 [489]. Обращено внимание на то, что в организме соли нитрата могут переходить в нитриты [491].

Нитрат никеля ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$) – плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 2,04; стандартная молярная теплоемкость, Дж/(моль·К) – 454,4; температура плавления, °С – 56,7 [489].

Нитрат хрома ($\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$) – стандартная молярная теплоемкость, Дж/(моль·К) – 96,27; растворимость в воде при 20 °С, г/100г – 31,6; температура плавления, °С – 37 [489].

Нитрит натрия (NaNO_2) – плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 2,17; растворимость в воде при 20 °С, г/100г – 84,5; температура плавления, °С – 271 [489]. Имеет ПДК – 0,05 мг/м³. Вызывает расширение сосудов вследствие пареза сосудисто-двигательного центра, а также образования в крови метгемоглобина. Работники, имевшие контакт с технологическими жидкостями, содержащими 3 % NaNO_2 , жаловались на слабость, быструю утомляемость, головные боли, плохой аппетит и сон, тянущие боли в конечностях и суставах [491]. Рекомендовано содержание в технологических жидкостях – не более 0,2 масс. %.

Сода (Na_2CO_3) – плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 2,53; стандартная молярная теплоемкость, Дж/(моль·К) – 109,2; растворимость в воде, г/100г – 21,8 [489].

Сульфозфрезол – плотность, кг/м^3 – 900,1; теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,119; теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,842; вязкость $\nu \cdot 10^3$, м²/час – 337,0 [483].

Четыреххлористый углерод (CCl_4) – плотность, кг/м^3 – 1594,9; теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,101; теплоемкость, кДж/(кг·К) – 0,531; вязкость $\nu \cdot 10^3$, м²/час – 2,19 [483].

8.2. Смазывающее действие технологических сред

Смазывающее действие состоит в том, что контактная зона СТМ, связки круга и обрабатываемого материала вступает во взаимодействие с кислородом воздуха и компонентами ТС. Причем пары воды и поверхностно-активные вещества, входящие в состав ТС, активируют процессы

окисления, а образующиеся оксидные пленки, усиливают химическое взаимодействие контактных поверхностей с компонентами ТС. Наряду с образованием хемосорбционных и химических пленок могут образовываться и пленки физически адсорбированных компонентов ТС. Последние преимущественно размещаются на хемосорбционных и химических пленках. Смазывающее действие многослойных пленок является наиболее влиятельным [480].

Обратим внимание на то, что граничная смазка – вид смазывания, обусловленный действием адсорбционно или химически связанной с поверхностью трения пленки, толщина которой колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен ангстрем и сопротивление сдвига которой выше, чем для жидких пленок гидродинамической смазки. В механизме действия граничной смазки можно выделить [481]:

- хемосорбцию активных соединений с образованием на ювенильных поверхностях граничной пленки; хемосорбция приводит к пассивации этих поверхностей вследствие чего последние не имеют возможности войти в адгезионный контакт друг с другом и образовывать металлические связи (мостики сваривания); пассивация снижает усталостно-адгезионное и диффузионное изнашивание;

- появление между двумя металлическими поверхностями слоя с более низким, чем у металла сопротивлением сдвигу, что переводит процесс трения в область пластического контакта при значительно более низком нормальном нагружении и снижает коэффициент трения во столько раз, на сколько напряжение сдвига пленки меньше напряжения сдвига более мягкого металла пары;

- релаксацию напряжений сдвига на границе между пленками или в самой пленке, которая снижает непосредственное влияние на поверхностные слои металлической пары и уменьшает вероятность усталостного разрушения и изнашивания поверхности.

Пассивация ювенильной поверхности может рассматриваться как частный случай граничной смазки с толщиной пленки, не превышающей нескольких десятков ангстрем. Основной эффект пассивации – избежать образования металлических связей между контактирующими поверхностями. Пассивация происходит вследствие реакции активных компонентов физико-химической плазмы с непрерывно образующимися в процессе резания ювенильными поверхностями. Пассивация задерживает, хотя и не предупреждает, усталостно-адгезионное изнашивание и полностью приостанавливает диффузионное изнашивание [481].

Укажем, что галогенсодержащие соединения обладают способностью снижать износ трущихся пар, что объясняется образованием на ювенильных поверхностях металлов изолирующей пленки галогенида металла.

В работе [492] выявлено, что такие соединения можно вводить в абразивный круг и шлифовать без использования ТС, а именно – NaCl, MgCl₂, MnCl₂, ZnCl₂, CdCl₂, CoCl₂, NaF, MnF₂, CdF₂, CuF.

Обратим внимание, что такой подход используется для импрегнирования абразивных кругов. При этом, в качестве импрегнаторов используют графит, дисульфид молибдена, стеарин, парафин, формальдегидные смолы, теллур, спермацет, ланолин, воск, серу и др. Использование этих импрегнаторов снижает усилие резания, увеличивает удельную производительность и стойкость круга, а также повышает скорость охлаждения абразивных зерен. При использовании соединений серы на поверхностях абразивных зерен образуются защитные пленки сульфидов FeS или сульфатов FeSO₄ железа. Следует указать, что защитные пленки сохраняются только до температур 300–400 °С. При более высоких температурах сульфат железа термически неустоек и разлагается на Fe₂O₃, SO₂ и SO₃ и, тем самым, не выполняет защитные и антифрикционные функции. Антифрикционные функции сульфида железа значительно хуже, чем у FeSO₄, поскольку их коэффициенты трения составляют соответственно – 0,4 и 0,02 [493].

Укажем, что дисульфид молибдена может использоваться как добавка к углеродно-водородным ТС. Такие ТС (масла, например, Индустриальное 20, с присадками, сульфозфрезол и др.), легированные дисульфидом молибденовыми препаратами позволяют активно влиять на шлифуемость сталей. Повышение концентрации этих препаратов более 5 % нецелесообразно, поскольку ухудшаются санитарно-гигиенические условия труда и только незначительно улучшаются показатели шлифования. Эффект от применения мелкозернистого дисульфида молибдена в масле более высок, чем в эмульсиях. Масла, имеющие более высокую проникающую и смазывающую способность, обеспечивают более активное транспортирование частичек Mo₂S в зону резания. Вследствие этого антифрикционные свойства среды значительно повышаются [494].

Кислород в процессах резания является важным фактором изменения триботехнических характеристик контактных поверхностей. Оксидные слои, возникающие под действием кислорода или его соединений на контактных поверхностях, в значительной мере снижают трение. Чем более высокой является химическая активность металла к кислороду тем наблюдается больший эффект снижения. Так, коэффициент трения стружки по передней поверхности инструмента при резании имеет значение для ювенильных поверхностей – 0,8–6,0, а для окисленных поверхностей – 0,4–0,8. Принудительный обдув зоны резания кислородом снижает составляющие усилия резания. Одним из вариантов является использование 0,5 % раствора перекиси водорода в воде или ионизированного воздуха [495].

При шлифовании часто используются водные растворы ТС, приготовленные на основе солей щелочных металлов (растворы электролитов). Высокие температуры шлифования не исключают возможности одновременного присутствия в зоне обработки, как насыщенных соляных растворов, так и оксидов щелочных металлов. Достаток кислорода воздуха, водной среды и продуктов термического разложения элементов ТС оказывает содействие быстрому окислению поверхности металла. При прочих равных условиях, отдельные элементы, находящиеся в составе обрабатываемого материала, по возрастающему сродству к кислороду, расположены в определенном ряду, в котором наиболее активными легирующими элементами по отношению к железу являются алюминий, титан, кремний, ванадий, марганец, углерод и др. Поэтому, на обрабатываемой поверхности железоуглеродистых сплавов кроме оксидов железа могут одновременно находиться и другие оксиды, количество которых может оказаться значительно больше, чем оксидов железа. Особенно интенсивно окисляются железоуглеродистые сплавы, в химическом составе которых присутствуют ванадий и вольфрам. Росту продуктов окисления содействуют не только высокие температуры в зоне резания шлифовальным кругом, но и накопление на обрабатываемой поверхности электрических разрядов с положительным потенциалом относительно массы станка, возникающих от действия абразивных зерен на металл (термоэлектрический эффект). В этом случае возникают условия для прохождения электрохимических реакций анодного растворения на всей обрабатываемой поверхности [496].

В работе [482] показана роль смазывающего действия, состоящая в том, что вследствие взаимодействия компонентов среды с трущимися металлическими поверхностями, на последних образуются более или менее сложные вещества, имеющие такие свойства, при появлении которых интенсивность непосредственного взаимодействия поверхностей приглушается или полностью устраняется. На разных участках поверхностей возникают и могут наслаиваться одна на другую разные по природе пленки. Наиболее значительным в смазывающем эффекте является участие кислорода, как компонента внешней среды. Смазывающее действие влажного воздуха возрастает при его распылении. Усиливает действие кислорода минеральные масла, поскольку они поставляют кислород в зону обработки, поскольку некоторые углеводородные соединения способны растворять кислород в количестве до 50%. При распылении масел активизируются процессы образования продуктов их окисления, которые легко отдают атомарный кислород металлической поверхности. Роль кислородсодержащих соединений возрастает по мере повышения скорости резания. В случае применения масел в качестве смазок важное значение имеют три факторы: окислительная активность газовой среды и его влажность, окислен-

ность углеводородных соединений, условия переноса молекулярного кислорода в зону трения. Для повышения смазывающего действия в масла вводят добавки, чаще органические, содержащие химически активные элементы: серу, хлор, фосфор, йод и др., выделяющиеся преимущественно в зонах контакта при термическом разложении добавок. Механизм смазывающего действия добавок основан на их способности образовывать в зонах контакта твердые смазывающие слои из соответствующих неорганических солей металлов, и, тем самым, химически модифицируется поверхность. Для расширения возможностей ТС используют комбинированные добавки, содержащие серу, хлор и фосфор одновременно [482].

Основное действие смазывающего эффекта ТС – уменьшение схватывания, задира, фрикционного нагрева и сил трения при перемещении стружки и обрабатываемого металла по передним и задним поверхностям инструмента. Смазывающее действие ТС осуществляется за счет [481]:

- снижения реакционной способности ювенильных поверхностей, образующихся в процессе резания;
- образования граничной пленки, защищающей поверхность материалов инструмента и детали от механической и физико-химической деструкции;
- снижения поверхностной энергии обрабатываемого металла;
- снижения предела текучести на сдвиг поверхностного слоя (эффект Ребиндера);
- снижения длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента и снижения силы трения;
- создания расклинивающего давления в микротрещинах и избежания сваривания их краев.

Смазывающие свойства углеводородов, входящих в состав минеральных масел, повышаются с увеличением их молекулярного веса, и, тем самым, вязкости. Смазывающее действие ТС состоит в снижении трения между инструментом и деталью за счет образования на обрабатываемой поверхности защитных пленок. Пленки представляют собой продукты химических реакций между компонентами ТС и обрабатываемым металлом. Известно, что химические реакции проходят преимущественно между атомами, имеющими малую, и атомами, имеющими большую, энергию ионизации валентных электронов, например, между элементами I и VII групп периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Поскольку металлы имеют малую энергию ионизации, то они будут преимущественно вступать в реакцию с теми ТС, энергия ионизации которых является большой [497].

Укажем свойства некоторых углеводородных ТС:

Керосин – плотность, кг/м^3 – 800; теплопроводность, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – 0,146; теплоемкость, $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ – 1,875; вязкость $\nu \cdot 10^3$, $\text{м}^2/\text{час}$ – 7,92 [483];

кинематическая вязкость, сст – 2,2; поверхностное натяжение, дин/см – 22,4 [498];

Масло Индустриальное 20 – плотность, кг/м³ – 875,6; теплопроводность, Вт/(м·К) – 0,126; теплоемкость, кДж/(кг·К) – 1,833; вязкость $\nu \cdot 10^3$, м²/час – 162,0 [483].

Обратим внимание, что в целом, применительно к процессам обработки, смазывающее действие ТС проявляется в снижении силы резания и, соответственно, мощности теплообразования в зоне обработки [484].

8.3. Смачивающая, проникающая и моющая способность технологических сред

Степень смачивания жидкостью поверхности твердого тела оценивают по поверхностному натяжению жидкости на границе раздела фаз твердое тело–жидкость и по краевому углу смачивания. Хорошее смачивание обеспечивается при низких значениях поверхностного натяжения и небольших углах. Разные случаи смачивания можно поделить на две группы: смачивание под действием молекулярных сил (физическое или обратное смачивание) и смачивание с преимуществом сил химического взаимодействия (химическое смачивание). При химическом смачивании угол смачивания с возрастанием температуры резко снижается [221]. Смачивающая способность определяет проникающую способность ТС. Проникающая способность ТС играет значительную роль в условиях продолжительного контакта, например при упругом контакте, и зависит от степени растекания жидкости по поверхности контактирующего с ТС твердого тела и смачивания этой поверхности [486].

На проникающие свойства ТС оказывают влияние размеры молекул, атомов, ионов и их подвижность. Высокую проникающую способность имеют анионы галогенов (йода, фтора, хлора). С уменьшением угла смачивания и с повышением скорости растекания жидкости по поверхности твердого тела снижается как работа диспергирования, так и сила резания. Чем большей является зернистость абразива, тем меньше развита поверхность, тем меньшей является его площадь и меньше количество жидкости, адсорбируемой на ней [481].

Смачивающая и проникающая способность ТС определяют наличие у них реологического эффекта. Большинство жидкостей, используемых в качестве ТС, относятся к классу неньютоновских упруго-вязких сред, а потому их эффективные (неньютоновские) вязкости являются функциями напряжений и скоростей деформации сдвига. При резании эффективная вязкость по мере ее перемещения к режущей кромке растет из-за повыше-

ния скорости деформации сдвига и увеличения гидростатического давления. Разделение трущихся поверхностей за счет реологических эффектов в местах, куда ТС попадает, снижает силы трения и, как следствие, снижает разогрев и изнашивание инструмента. Жидкости, существующие при посредственных нагрузках как ньютоновские, в экстремальных условиях могут преобразоваться в неньютоновские и функционировать по реологическому механизму [481].

Важным фактором описанных выше эффектов, является растворимость солей, входящих в состав ТС. Обратим внимание, что все соли азотной кислоты растворимы в воде. Все нитриты растворимы в воде. Большинство карбонатов являются нерастворимыми в воде, за исключением карбонатов щелочных металлов и аммония. Большинство фосфатов нерастворимы в воде, за исключением солей щелочных металлов [499].

Для регулируемого блокирования межэлектродного промежутка возможно использовать эффект гидратообразования, когда изменяется растворимость солей в промежутке за счет образования гидроксидов солей в растворах в зависимости от их кислотности. Значения рН гидратообразования тем ниже, чем менее является растворимым данный гидроксид металла (чем менее величина произведения растворимости (ПР) гидроксидов металлов) и чем выше активность (концентрация) ионов металла Me^{n+} , поступающих в раствор электролита [500].

Таблица 8.2. Произведения растворимости гидроксидов некоторых металлов и ориентировочные значения рН-гидратообразования при концентрации ионов металла 1 моль/л в водном растворе [499, 500]

Гидроксид $Me(OH)_n$	ПР $Me(OH)_n$ ($T = 18-25\text{ }^\circ\text{C}$)	рН-гидратообразования		Цвет осадка
		[499]	[500]	
$Fe(OH)_3$	$3,2 \cdot 10^{-38}$	1,5	3	Буро-красный
$Al(OH)_3$	$1,0 \cdot 10^{-32}$	3,3	4–5	Белый
$Cr(OH)_3$	$6,3 \cdot 10^{-31}$	4,0	6	Зеленый
$Zn(OH)_2$	$7,1 \cdot 10^{-18}$	5,4	6–7	Белый
$Fe(OH)_2$	$1,0 \cdot 10^{-15}$	6,5	6–7	Зеленый
$Co(OH)_2$	$2,0 \cdot 10^{-15}$	6,6	8	Розовый
$Ni(OH)_2$	$2,0 \cdot 10^{-15}$	6,7	8	Зеленый
$Cd(OH)_2$	$2,3 \cdot 10^{-14}$	7,2	–	–
$Mn(OH)_2$	–	–	9	Белый

Моющее действие представляет собой способность ТС предотвращать налипание и обволакивание зерен СТМ и связки круга частичками сошлифованного инструментального материала и очищать связку круга от отходов шлифования [480, 482]. Моющее действие ТС определяется степенью очистки обрабатываемой детали и инструмента от шлама. Требования

к моющей способности ТС возрастают со снижением зернистости абразивного инструмента, поскольку уменьшается расстояние между зернами. Чем меньше частицы шлама, тем плотнее они удерживаются (особенно на поверхности связки) и ухудшают тем самым процесс обработки. Эффективное моющее действие имеют поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые хорошо смачивают, адсорбируются на границе раздела твердое тело–жидкость, и снижают поверхностное натяжение жидкости на границе раздела фаз. Образующиеся пленки уменьшают адгезию шлама к поверхности инструмента и детали. Все моющие компоненты, входящие в ТС, можно разделить на три группы: анионные, катионные и неионогенные. К первой группе относятся сульфаты, сульфанола, соли жирных кислот (обычные мыла), диссоциирующие в воде с образованием ионов. Катионноактивные вещества используют мало. Неионогенные ПАВ образуют длинноцепочные молекулярные растворы, и хотя они не являются электролитами, в их молекулах имеются полярные и неполярные группы [481].

Своеобразным решением по увеличению моющего действия ТС является ультразвуковое очищение алмазных кругов, когда для повышения эффективности ультразвука и снижения электрической мощности жидкость подводится в промежуток между концентратором и рабочей поверхностью круга под избыточным давлением $1,5 \cdot 10^{-3}$ кГ/см². Амплитуда колебаний торца концентратора при шлифовании с ультразвуковой очисткой круга поддерживается в пределах 7–8 мкм. Рабочий промежуток между концентратором и алмазным кругом нужно поддерживать в пределах 0,09–0,11 мм. В качестве ТС используется 5%-ная эмульсия. Ультразвуковые колебания, возбуждаемые в жидкости, обеспечивают очистку рабочей поверхности алмазного круга от частичек металла и отходов шлифования, повышая режущую способность круга. Стойкость круга при шлифовании с ультразвуковой очисткой выявилась в 2–2,5 раза более высокой, чем при обычном шлифовании [272].

Укажем, что ультразвуковая активация ТС, т.е. возрастание физико-химической активности ТС, обработанной в ультразвуковом поле, происходит вследствие образования в кавитационной зоне под действием электрических разрядов реакционно-способных частичек с большей энергией (ионизированные и возбужденные молекулы, ионы, свободные радикалы и др.). Эффект обработки ТС ультразвуком усиливается путем механического воздействия частичек среды, колеблющихся с ультразвуковой частотой, что оказывает моющее воздействие на рабочую поверхность круга [501]. Другим вариантом активации ТС, является магнитная активация, которую проводят в магнитном поле, создающимся в специальной проточной камере, установленной в разрыве трубопровода подачи ТС в зону резания поливом. Это позволяет снизить удельный расход алмазов в кругах при шли-

фовании в 1,8 раза, а производительность шлифования в 1,5 раза. Это вызывается повышенной агрессивностью омагниченной жидкости к материалу связки круга и детали, что содействует образованию прочных смазочных пленок на поверхностях круга и обрабатываемого материала, усиливается также и моющее действие ТС [272]. Еще одним способом активации ТС является струйно-напорный внезонный метод подачи жидких ТС, когда происходит определенная гидроочистка режущей поверхности круга и практически исключается заполнение пор круга шламом, снижается интенсивность адгезионных процессов в зоне стружкообразования [494]. Главным параметром данного способа является сила удара струи о рабочую поверхность круга. Этот параметр зависит от вязкости ТС (ν) и диаметра выходного отверстия сопла. С увеличением ν в 100 раз сила удара струи снижается в 1,5 раза. При любом значении ν с увеличением диаметра выходного отверстия сопла в 3,3 раза сила удара струи возрастает в 9 раз. Энергию струи можно повысить на 20–25 % через соблюдение рационального соотношения длины выходных отверстий к их диаметру, которое должно составлять – 4. При этом, величина давления жидкости должна быть не менее как 98 Па [494].

8.4. Использование поверхностно-активных веществ в технологических средах

Наиболее известным эффектом, характеризующим положительное действие поверхностно-активных веществ в технологических средах, является эффект Ребиндера, а именно эффект адсорбционного понижения прочности поверхностного слоя за счет действия поверхностно-активных веществ (ПАВ) в технологических жидкостях. Адсорбция поверхностно-активных веществ снижает поверхностную энергию обрабатываемого материала и касательные напряжения на поверхностях трения, обусловленные межатомным и межмолекулярным взаимодействием, что облегчает пластическое деформирование обрабатываемого материала, снижает силу резания, особенно при малых толщинах среза. Пластифицирующее действие среды в процессе резания металла является позитивным фактором: во-первых, облегчается развитие пластической деформации в зоне перехода материала в стружку, во-вторых, условия пластического контакта достигаются при меньших напряжениях, вследствие снижения предела текучести в местах контакта, в-третьих, снижается сопротивление сдвигу при пластической деформации неровностей на поверхностях контактирующих тел, а следовательно и сила трения. Адсорбцию разделяют на физическую и химическую (хемосорбцию). Адсорбция или хемосорбция молекул из га-

зовой или жидкой фазы на снова образующихся поверхностях, в момент их зарождения, снижает свободную поверхностную энергию, уменьшая тем самым сопротивление сдвигу [481]. При физической адсорбции полярные группы молекул удерживаются на поверхности слабыми ван-дер-ваальсовыми силами, обусловленными взаимодействием электромагнитных полей между атомами и молекулами ТС и твердого тела. Индустриальные, касторовые, льняные масла, керосин, натуральные жиры экранируют контактирующие поверхности плотно упакованными адсорбционными слоями, складывающимися из длинных углеводородных цепочек, ориентированных перпендикулярно поверхности твердого тела. При химической адсорбции, ее энергия адсорбции сравнима с молярной поверхностной энергией твердого тела. При хемосорбции происходит изменение структуры поверхностного слоя. Хемосорбционные пленки удерживаются на поверхности твердого тела химическими связями, которые намного прочнее физических. Чем большей является теплота адсорбции ПАВ тем более прочной является связь между молекулами ТС и твердым телом. Теплота адсорбции ПАВ на металлических поверхностях растет с следующим рядом: сложные эфиры – спирты – карбоновые кислоты – первичные амины. Теплота адсорбции на железе углеводородных жидкостей, применяемых в ТС, увеличивается так: керосин – масло индустриальное – масло касторовое – керосин с олеиновой кислотой [481].

В целом, указанный выше эффект изменяет пластифицирующие свойства ТС, т.е. способность технологической среды облегчать пластическое деформирование металлов. Эти свойства приводят к локализации пластической деформации в тонком поверхностном слое обрабатываемого материала. Образовавшийся размягченный слой выполняет роль смазки и предотвращает налипание обрабатываемого материала на инструмент. Термодинамическое условие проявления эффекта состоит в том, что интенсивность поверхностных взаимодействий должна быть сравнимой с энергией связи между атомами или молекулами, составляющими твердое тело. Таким образом, снижения прочности следует ожидать тогда, когда свободная энергия поверхностного взаимодействия будет соответствовать поверхностной энергии твердого тела. Для большинства материалов для ощутимого снижения прочности достаточно чтобы свободная энергия поверхностного взаимодействия составляла 50–100 кДж/моль [481]. Как следствие это дает возможность говорить о режущих свойствах ТС – под ними понимают способность технологической среды облегчать разрыв связей в обрабатываемом материале при внедрении в него инструмента [481].

В связи с указанным выше еще раз обратим внимание на то, что эффект Ребиндера это явление адсорбционного понижения прочности и

облегчения деформации [502]. В основе этого явления является снижение свободной поверхностной энергии, а именно работы образования новых поверхностей – плоскостей спайности кристалла, возникающих при раскалывании его в данной среде. Общеизвестным является представление о прочности твердых тел, как о величине, являющейся пропорциональной их поверхностной энергии. Это представление является очевидным для простого раскалывания. Однако, при разрушении твердого тела при диспергировании (тонком дроблении или шлифовании) поверхностная энергия составляет мизерную часть полного баланса энергии, или величины работы, которая тратится на разрушение. Эта часть не превышает одной тысячной или десятитысячной, что и проявляется через малую величину коэффициента полезного действия процессов дробления – механического диспергирования. Преимущественную долю работы, которая была при этом затрачена, составляет работа упругой деформации объема определенного участка тела при доведении его до предельного состояния и работа пластической деформации, что приобретает особое значение при разрушении таких пластичных тел, как металлы, например, в процессах резания металлов. Тем не менее, значительный экспериментальный материал позволяет утверждать, что эта работа, как и прочность, оказывается приблизительно пропорциональной удельной поверхностной энергии тела в определенной среде. Тем самым, мизерная часть всей энергии, которая тратится на разрушение, является определяющей для этого процесса. Обычно эффект Ребиндера связывают с действием поверхностно-активных веществ, например органических соединений, молекулы которых имеют дефильное строение, то есть состоят из полярной и неполярной части. Адсорбция ПАВ носят ориентированный характер – их полярная часть направлена к полярной фазе адсорбента. ПАР при адсорбции на металлической поверхности снижают свободную поверхностную энергию. При этом допускают наличие физической адсорбции ПАР на металлах [502].

В качестве противозадирных и противоизносных присадок в ТС добавляют присадки с химически активными элементами – S, Cl, P, N, J [481]. Укажем свойства некоторых ПАВ:

Гексан – кинематическая вязкость, сст – 0,47; поверхностный натяг, дин/см – 18,4 [489].

Нитрозамины – вещества, которые в определенной степени являются опасными для человека и которые могут образовываться вследствие реакции в синтетических технологических жидкостях с ПАВ, содержащие в качестве растворимой органической основы триэтаноламин, а в качестве антикоррозионной добавки – нитрат натрия [503].

Карбид хрома (Cr_3C_2) – атомная масса – 180,01 [342]; плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 6,68 [342, 504]; модуль упругости, ГПа – 373 [504]; теплопро-

водность, Вт/(м·К) – 19,26; теплоемкость, Дж/(моль·К) – 97,89 [342]; удельное электросопротивление, мкОм·м – 0,75 [342, 504]; КЛТР, 10^{-6} град⁻¹ – 10,3 [504], 11,7 [342]; температура плавления, К – 2123 [504], 2163 [342]; температура кипения, °С – 3800 [342, 504].

Сера – присадки, содержащие серу, имеют хорошие противозадирные и противоизносные свойства. Пленки, которые образуются при наличии серосодержащих присадок, не разрушаются при высоких температурах. Противозадирное действие дисульфидов уменьшается с повышением прочности связи S–S и C–S. Наиболее слабое противозадирное действие – у моносульфидов. Неорганические соединения серы с алифатичной связью (сульфиды натрия и лития) имеют более высокие противозадирные свойства, чем органические соединения серы [481].

Хлориды – в водных эмульсиях и масляных ТС широко используют в качестве противоизносных и противозадирных присадок. Они являются особенно эффективными при обработке высоколегированных сталей, содержащих хром и никель, труднообрабатываемых материалов на основе молибдена и титана. Температура плавления хлоридов этих металлов в 2–3 раза ниже чем температура плавления этих металлов [481].

Обратим внимание на некоторые особенности экологического использования ТС с солями и ПАВ [491].

Алюминий – выявлено, что всасывание солей алюминия желудочно-кишечным трактом является незначительным.

Барий – ядовитость солей бария зависит от степени их растворимости. Сильно токсичны хлорид, нитрат, хлорат, ацетат, карбонат, сульфат.

Бериллий – соединения высокотоксичны.

Бромиды – общее действие является слабым и в производственных условиях острого отравления вызвать не может.

Бура – может способствовать появлению хронической экземы, облысению.

Висмут – профессиональных заболеваний не обнаружено.

Железо – соединения Fe(II) обладают некоторым общим токсическим действием, а соединения Fe(III) менее токсичны. Хлориды железа токсичнее сульфитов.

Кадмий – соединения очень ядовиты.

Кобальт – выявлено, что даже растворимые соли плохо всасываются желудочно-кишечным трактом.

Магний – токсического эффекта не наблюдается вследствие медленного всасывания соединений магния и быстрого выделения.

Марганец – соли марганца сильные яды.

Медь – соединения токсичны, а порошки чистой меди имеют раздражающее действие.

Молибден – неорганические соединения токсичны, а наличие в них меди и цинка усиливает эту токсичность. Молибдаты ядовиты.

Никель – соли никеля вызывают поражение кожи человека с развитием повышенной чувствительности к металлу. Может задерживаться в легких.

Титан – вредны нерастворимые соединения.

Свинец – растворимые соединения ядовиты.

Селен – соединения ядовиты.

Сурьма – соединения токсичны.

Фосфаты – соли фосфорной кислоты малотоксичны.

Хром – ядовиты соединения Cr(VI), токсичны соединения Cr(III).

В окончании тематики данной подглавы обратим внимание на эффект перманентной карбонизации [481], характерный для тех условий, когда резание металлов сопровождается диффузией углерода из слоев материала инструмента в заготовку и стружку при наличии между ними адгезионного контакта. Обнаружено одновременное уменьшение как цемента, так и карбидов легирующих примесей (металлов), входящих в быстрорежущую сталь. Добавки в ТС некоторых органических соединений задерживает процесс диффузионного выноса углерода из поверхностных слоев режущей кромки. А поэтому, вследствие сложных пиролитических преобразований таких присадок, на границе зоны пластического контакта непрерывно образуется углерод в активной форме, который внедряется в поверхностные слои и не только предотвращает их диффузионное изнашивание, но и приводит к их упрочнению из-за возрастания концентрации в них карбидов железа и легирующих примесей.

8.5. Использование твердых смазок в технологических средах

Твердые смазки в смазочных технологических средах используются в виде карандашей или паст. Известно [505], что при прерывистом течении твердым сплавом P20 стали 45 возможны являются два пути воздействия твердых смазок на процессы, происходящие на передней поверхности инструмента: во-первых, влияние на силу трения на передней поверхности, во-вторых, влияние на взаимную диффузию материалов инструмента и стружки. На снижение силы резания – наиболее эффективными являются свинец, его оксиды и сульфиды. Неэффективными являются – медь, алюминий и цинк. MnS эффективен при высоких скоростях резания, а MoS₂ – при низких. На снижение износа являются эффективными PbO₂, MnS, MoS₂, хотя PbO₂ все же влияет на образование термических трещин. SiO₂ также снижает износ, но при очень высоких скоростях обработки [505].

Сера, содержащаяся в твердой смазке также тратится в процессе шлифования на образование SO_2 , причем окисление серы требует наличия кислорода, которого в зоне шлифования маловато. Образование $FeSO_4$ из-за недостатка кислорода усложнено. Поэтому в состав твердой смазки вводят вещества, термическое разложение которых сопровождается выделением кислорода, однако необходимо учитывать, что концентрация введенной кислородсодержащей жидкости должна быть сурово регламентированной, поскольку при избытке кислорода образуется термически нестабильный сульфат железа. В склад импрегнатора рекомендовано вводить $KMnO_4$, MnO_2 , PbO и др., которые при повышенных температурах разлагаются с выделением атомарного кислорода [498].

Рассмотрим теперь особенности твердых смазок как фактор изменения фрикционных свойств алмазно-абразивного инструмента. Это вызвано тем, что в процессе алмазно-абразивной обработки, как нами было показано выше, резание осуществляет ограниченная часть абразивных зерен, находящихся на рабочей поверхности, и при небольшом выступании зерен, становится возможным непосредственный контакт связки круга с обрабатываемой поверхностью. Характеристики трения матрицы имеют существенное значение, поскольку существует определенная опасность схватывания связки с обрабатываемым материалом. Такое схватывание может привести к вырыву частичек связки, повышению коэффициента трения, росту температуры в зоне контакта и дальнейшему разрушению. На преодоление трения тратится значительная часть энергии в процессе обработки. Например, при обработке пластмасс резанием на трение приходится до 60 % от всего тепловыделения [260]. Наиболее распространенным методом снижения трения является использование технологических жидкостей с разными маслами. Между тем известно [272], что из-за высокого давления в зоне контакта жидкость не поступает в эту зону и ее охлаждающее действие происходит уже после прохождения абразивного зерна. Это может быть причиной повышенного адгезионного износа зерен. Уменьшить изнашивание алмазных зерен возможно путем изменения природы пленок, разделяющих контактирующие тела. Существует возможность снижения трения за счет модификации состава связок, когда и в них вводят наполнители, которые содействуют снижению трения (чугун, графит, дисульфид молибдена, фтористый кальций, сульфиты железа). Установлено, что не все компоненты связки оказывают влияние на снижение трения. Так показано [373], что увеличение содержания олова в медно-оловянных сплавах с 10 до 20 % приводит к резкому повышению коэффициента трения. Кроме того, для таких связок необходимо учитывать и то, что у меди имеются определенные особенности в изменении величины коэффициента трения в зависимости от температуры (рис. 8.1). При этом, важную роль играют

фазовые переходы. Для меди такими являются последняя точка температуры существования закиси меди и переход к смеси ее с оксидом (минимум коэффициента трения). Максимум коэффициента трения, см. рис. 8.1, объясняется ростом влияния молекулярной и деформационной составляющих в зоне фазового перехода Cu_2O в CuO [219]. Вместе с тем, модификация связок требует изменения технологического процесса изготовления алмазного и кубонитового инструмента, является специфичной к определенным условиям обработки и не всегда срабатывает позитивно. Поэтому, авторами работы [477] предложен другой путь регулирования процесса трения между связкой и обрабатываемым материалом путем использования твердых смазок.

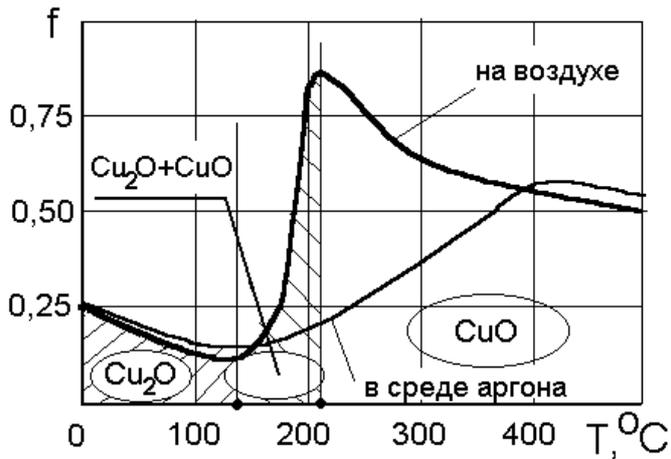


Рис. 8.1. Зависимость коэффициента трения меди в разных средах от температуры, отражающая наличие фазовых переходов [219]

ными составами (импрегнация), или нанесения твердосмазочных покрытий на рабочую поверхность инструмента. Импрегнация косвенно позволяет увеличить количество фактически работающих зерен за счет изменения упругих свойств связки. А непосредственное влияние импрегнатора отражается в его смазочном действии, изменяющем контактные физико-химические процессы. Вероятный механизм контактного действия импрегнатора состоит в его разложении (распаде), физической адсорбции на обрабатываемый материал и химического взаимодействия с ним. Суммарный эффект состоит в уменьшении трения. Показано [506], что вследствие импрегнации возрастает прочность абразивных кругов при испытаниях на растяжение, на 30–50 % возрастает модуль упругости, до 10 раз увеличивается демпфирующая способность, в 1,5–2,0 раза повышается теплопроводность, а также в 1,2–1,5 раза снижается коэффициент трения. Для пропитки импрегнатор должен иметь малые величины поверхностного натяжения и температуры плавления. Таким требованиям в определенной степени удовлетворяют углерод и кремнийорганические соединения. Использование импрегнаторов более эффективно для жестких режимов обработки. Практика показала, что твердые технологические смазки (ТТС) целесообразно применять там, где имеет место высокая теплонапряжен-

ного и кубонитового инструмента, является специфичной к определенным условиям обработки и не всегда срабатывает позитивно. Поэтому, авторами работы [477] предложен другой путь регулирования процесса трения между связкой и обрабатываемым материалом путем использования твердых смазок.

На практике изменение фрикционных свойств связок алмазно-абразивного инструмента является возможной за счет их пропитки специаль-

ность процесса и невозможным является использование жидких ТТС, а также там, где они не обеспечивают необходимого технологического эффекта. Наиболее проблемными, с этой точки зрения являются операции: шлифование торцом круга и разрезания. При осуществлении этих операций контакт происходит на большей площади и имеет большую протяженность. Значительный эффект от использования ТТС получают при алмазно-абразивной обработке сплавов, склонных к трещинообразованию, в первую очередь, твердых и магнитных сплавов. В качестве ТТС обычно используют вещества, имеющие lamellarную структуру – графит, иодиды, сульфиды и селениды металлов, нитрид бора, слюду, тальк та др. Наибольшее распространение получили графит и дисульфид молибдена. Компоненты ТТС должны иметь более лучшие смазывающие и диспергирующие свойства в сравнении с аналогичными компонентами жидких ТТС. Недостатком ТТС является ограниченная моющая и охлаждающая способность. Основные трудности в использовании ТТС состоят в нахождении наиболее эффективных способов ввода в зону обработки. ТТС преимущественно используются в виде брикетов та карандашей пластичных смазочных материалов. В отдельных случаях целесообразным является введение порошкообразных ТТС в состав жидких ТТС. ТТС могут наноситься на поверхности как круга, так и обрабатываемой детали. Основой ТТС являются воск или стеарин с разными компонентами. Некоторые ТТС можно использовать для осуществления импрегнации абразивного инструмента. На поверхность режущего инструмента ТТС наносят и напылением. В этом случае используют смазку на основе дисульфида молибдена, которое далее «отверждают» в печи путем ступенчатого нагревания от 60 до 200 °С в течение 6 часов. При нанесении смазочного материала на режущую поверхность круга значительно снижаются силы трения между связкой и поверхностью обрабатываемого материала. Составы для изготовления ТТС и импрегнации абразивного инструмента приведены в табл. 8.3.

Известно [507], что применение твердосмазочного покрытия с частичками нитрида бора приводит к снижению удельной работы шлифования, сглаживается профиль микронеровностей и, соответственно, возрастает относительная опорная высота профиля. При нанесении ТТС на рабочую поверхность круга увеличивается фактическое количество зерен, принимающих участие в резании, а размеры самих зерен уменьшаются [507]. Введение в состав связки антифрикционных веществ снижает удельную работу шлифования в начальный период работы (в 2 раза и более). Установлено, что при этом снижается и коэффициент абразивного резания. Снижается и степень засаливания режущей поверхности абразивных кругов. Импрегнирование также позволяет улучшить эффективность их самозатачивания и оптимизировать процессы, происходящие в зоне резания.

Использование импрегнации позволяет увеличить количество фактически работающих зерен, повысить стойкость круга, улучшить структуру рабочего цикла шлифования и эксплуатационные свойства обрабатываемого материала. С целью определения эффективности импрегнации для повышения стойкости отрезных кругов при разрезании заготовок из магнитотвердого сплава ЮН15ДК25БА проводили следующее [477]: отрезные круги из электрокорунда пропитывали в 10%-ном растворе олеиновой кислоты в ацетоне, далее сушку кругов проводили при температуре 20 °С, а разрезание магнитных заготовок осуществляли на станке Шарм-1. В результате исследований установлено, что стойкость отрезных кругов увеличилась на 30 %, а количество прижогов, сколов и микротрещин снизилось на 10–15 %.

Таблица 8.3. Составы для изготовления ТТС и импрегнации абразивного инструмента

Составы для ТТС и импрегнации (масс. %)	Область применения	Источник
Дисульфид молибдена 10 Аквол 0,1 Сода кальцинированная 0,1 Вода остальное	Для операций внутреннего шлифования	Информ. листок Калужского ЦНТИ №7-85, 1985 г.
Дисульфид молибдена 1–25 Концентрат сульфонатной ТС 0,5–10 Смазка ЦИАТИМ-201 0,5–7 Растворитель 0,5–5	При шлифовании со смазочно-охлаждающей ТС	А.с. СССР № 1000255 М24D Опубл. 28.02 83 Бюл. № 8
Воск 45–50 Хлористый аммоний 50–55	Шлифование твердых сплавов	А.с. СССР № 217577, 1967 г., С10М 7/02
Бихромат аммония 34–40 Глицерин 6–10 Воск остальное	Шлифование твердых сплавов	А.с. СССР № 899641 С10М 7/02, Опубл 23.01.82, Бюл. № 3
Воск 45–50 Олеиновая кислота 1–2 Хлористый аммоний остальное	Шлифование твердых сплавов	А.с. СССР № 56092, С 10М 7/02, Опубл. 05.06.77, Бюл. № 21
Гипосульфит натрия 5–40 Вода остальное	Для абразивного инструмента	А.с. СССР №1000450, С 09К 3/14, Опубл. 28.02 83, Бюл. № 8
Олеиновая кислота 100	Для абразивного инструмента	А.с. СССР № 921833, В 24D 3/34, Опубл. 23.04.82, Бюл. № 15

Испытания эффективности применения карандашей из твердых смазок проводили на станках: ОПШ, 395М и 3Г71. Обработывали детали из сталей Х12М, 5ХНМ, 40Х13, Ст45 и твердых сплавов ВК15, ВК20. Режимы обработки: скорость вращения круга 35 м/с. Скорость перемещения стола (подача) – 7 м/мин. Поперечная подача – 0,02 мм/дв.х. Абразивный круг имел характеристику – 25А16ПСМ18К5. Дефектов в виде прижогов, сколов и микротрещин на поверхности образцов не выявлено. Производственные испытания показали, что использование карандашей из твердой смазки позволяет повысить производительность шлифования на 15 % при одновременном снижении шероховатости поверхности. Стойкость кругов между правками удалось повысить в 2,5 раза, а затраты на абразивный инструмент снизить в 1,5 раза [477]. Результаты исследований также показали, что использование ТТС дает ощутимый позитивный эффект и в дальнейшем необходимо совершенствовать как составы ТТС, так и составы для пропитки абразивного инструмента. Перспективным, на взгляд [477], является использование в качестве основы ТТС мелкодисперсного графита и создания ТТС на основе графитолов. Для определения эффективности применения тех или других способов снижения трения в зоне контакта может быть рациональным использовать разные сигналы – акустические или электрические (см. главу 7), сопровождающие процесс шлифования, в виде информационного показателя, характеризующего как состояние режущей поверхности, так и условия прохождения процесса шлифования.

В ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины были проведены исследования по определению работоспособности шлифовальных кругов с шлифовальным порошком на основе компактов КНБ зернистостью 250/200 и алмазов АС32 250/200 в соотношении 50 % на 50 % и при использовании в процессе обработки карандашей с твердыми смазками. Для проведения исследований были изготовлены образцы твердых смазок разработки Кировоградского национального технического университета на основе воска и стеарина с добавлением как обычного, так и мелкодисперсного графита, а также обезводненной пасты – графитола В-2. Известно [507], что наибольший эффект от применения ТТС получают при шлифовании торцом круга, когда при производительном шлифовании существует достаточно большой контакт связки круга с обрабатываемым изделием. Это достаточно четко можно наблюдать при исследовании режущей поверхности круга под микроскопом. Так, например, при шлифовании быстрорежущей стали Р6М5 кругом 12А2-45° 125×5×3×32–(КМ250/200+АС32 250/200)–В2-08–100 без охлаждения этот контакт наблюдается по следам трения на связке (рис. 8.2). При этом, даже при производительности обработки в 200 мм³/мин наблюдаются прижоги на обработанной поверхности. Использование указанных выше карандашей

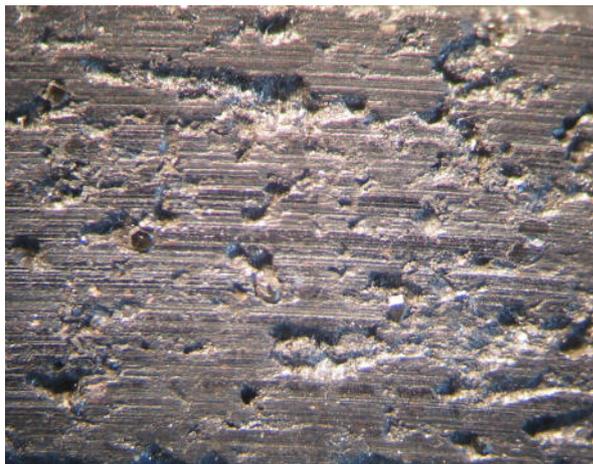


Рис. 8.2. Пример состояния режущей поверхности круга при торцовом шлифовании кругом на полимерной связке со следами трения [477]

с твердыми смазками на основе графитола позволяет снизить износ круга в 1,23 раза и в 2 раза снизить эффективную мощность шлифования с 0,30–0,35 кВт до 0,15–0,17 кВт. При этом прижогов на обработанной поверхности не наблюдается. Таким образом, разработки по применению твердых смазок позволяют снизить негативное воздействие контактных фрикционных процессов в зоне обработки за счет снижения процессов трения, что, как следствие, повышает износостойкость кругов и снижает энергоемкость процесса обработки.

8.6. Технологические жидкости как средство неявной поляризации

Такой несколько необычный подход приведен в работе [117] применительно к процессам шлифования кругами из СТМ, где рассмотрен вопрос разработки нового подхода к выбору состава технологических жидкостей (ТЖ), как нетрадиционного средства получения неявной поляризации при шлифовании. Показаны пути достижения этого для условий алмазного шлифования через использование активированной воды и эффекта электрохимической гетерогенности поверхности связки (описанного в главе 6) с применением фактора предварительного водопоглощения рабочим слоем кругов (описанного в главе 3).

Технологические жидкости являются важным фактором повышения эффективности процессов шлифования. В современных условиях, когда особое внимание уделяется вопросам экологии и охраны персонала, требования к действию ТЖ возрастают и их действие должно быть направленным, точечным и соответствующим условиям производства, но без большого расхода ТЖ и негативного воздействия на экологию. Чтобы решить данный вопрос применительно к абразивному инструменту из СТМ необходимо учесть следующее. Во-первых – действие жидкости не влияет на контактную температуру при шлифовании. Из-за высоких давлений, возникающих в зоне контакта алмаза с металлом, жидкость не поступает в эту зону и ее охлаждающее действие происходит после прохождения режущего зерна, что в итоге снижает только среднюю температуру шлифования. Охлаждающая функция в этом случае в условиях кратковременного и пре-

рывистого контакта не успевает проявиться и не оказывает влияния на контактную температуру [272, 480]. Скорость нагревания в очаге деформации в контакте «абразивное зерно – обрабатываемый материал» является достаточно большой (около $2 \cdot 10^7$ град/с), в связи с чем, отбор тепла из этой зоны путем выноса его частичками внешней среды является практически невозможным. Поэтому охлаждающий эффект и имеет место только за пределами мгновенной зоны контакта [482]. Во-вторых, снижение температуры при резании достигается преимущественно за счет активного теплоотвода с незанятых стружкой и примыкающих к зоне резания поверхностей инструмента. Охлаждающая функция при этом связана с количеством теплоты, которое может быть отведено от режущего инструмента, и определяется коэффициентом теплообмена, который в значительной мере зависит от теплофизических и скоростных характеристик среды [483]. Укажем также, что в условиях шлифования кругами из алмазов и кубонита кроме описанного внезонного охлаждающего эффекта на показатели процесса шлифования влияют еще смазывающая и моющая способность ТЖ [480]. Смазывающее действие ТЖ состоит в том, что контактная зона СТМ, связки круга та обрабатываемого материала вступает в действие с кислородом воздуха и компонентами ТЖ. Чем более высока химическая активность металла к кислороду, тем наблюдается и больший эффект. Так, коэффициент трения стружки по передней поверхности инструмента при резании имеет значения: для ювенильных поверхностей – 0,8–6,0, а для окисленных – 0,4–0,8 [495]. Моющее действие ТЖ определяется степенью очищения обрабатываемой детали и инструмента от шлама. Известно [480], что при шлифовании алмазными кругами большее внимание уделяют смазочной способности, а кубонитовыми – моющей. При прочих равных условиях охлаждающие свойства ТЖ должны быть более высокими при шлифовании алмазными кругами. Тем самым, для условий алмазного шлифования важным является обеспечение и охлаждающей и смазочной функции.

В связи с отсутствием научно-обоснованных рекомендаций по выбору эффективных составов ТЖ для алмазного шлифования инструментальных материалов, содержащих в структуре карбиды металлов IVb–Vb подгрупп, и большой трудоемкости исследований многочисленных составов жидкостей на станках, была разработана методика [117] отбора составов жидкостей в лабораторных условиях и далее проверка их на шлифовальном оборудовании. В основу методики лабораторных исследований был положен принцип изучения активации стирающего воздействия в зоне контакта «материал–алмазсодержащий слой». Для этого в химический стакан диаметром 50 мм с технологической жидкостью объемом 100 мл помещали таблетку диаметром 40 мм и толщиной 3 мм, выполненную из

материала связок с алмазами. Сверху помещали таблетку диаметром 20 мм из инструментального материала и магнит. С помощью магнитной мешалки таблетки приводили в движение относительно одна одной. Далее измеряли износ таблеток по массе (m) и рассчитывали относительный расход алмазов (q_p). Особенностью методики является то, что она позволяет определять составы ТЖ, которые бы даже в условиях невысоких скоростей и давлений содействовали снижению расхода алмазов. В процессе проведения исследований использовали алмазосодержащие АС4 100/80МА–В1-13–100 таблетки и таблетки инструментальных материалов из БВТС сплава ТН50 и режущих керамик оксидного (ВО13) та оксидно-карбидного (ВОК60) типа. Результаты исследований изнашивания пары «алмазосодержащий слой–инструментальный материал» в разных составах ТЖ приведены в табл. 8.2, из которой видно, что для обеспечения больших показателей съема (m) и меньших износа (q_p) при обработке сплава ТН50 следует отдавать предпочтение использованию нейтральных сред (рН 7–8). Выявлено также, что наличие в ТЖ солей Na_2HPO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NaNO_2 повышает интенсивность съема при невысоких относительных расходах алмазов. Соль NaNO_2 является ингибитором коррозии, важным при таких значениях рН. Соль Na_2HPO_4 диссоциирует в растворе на катион натрия и анион фосфорной кислоты, которые за счет электростатического притягивания покрывают поверхность зерен алмазов и связки круга, и формируют тем самым определенные пленки в зоне обработки. Аммоний серноокислый ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) играет свою роль (охлаждающую) так как имеет высокую стандартную мольную теплоемкость 187 Дж/(моль·К) (для сравнения: у бромида аммония – 88,7, хлорида аммония – 84,1, соды – 109,2, нитрита натрия – 93,05), что оказывает влияние на снижение теплонапряженности процесса шлифования. Защелачивание ТЖ в данном случае не приводит к повышению съема, а только увеличивает износ режущего слоя. Оксидно-карбидная керамика преимущественно должна подвергаться обработке или в кислотных, или в щелочных растворах, причем щелочные являются более приемлемыми (табл. 8.1). Нейтральные (рН8) составы не обеспечивают надлежащего съема. Для обработки оксидной керамики характерна своеобразная картина. Тут более приемлемы щелочные и нейтральные составы, однако исключительно водные, без добавки солей. Причины такого поведения вызваны, вероятно, однородным составом керамики, состоящей на 99 % из оксида алюминия. Обращено внимание [117], что водородный показатель, по требованиям невредности для кожи человека [488], во всех используемых на практике концентрациях водных ТЖ не должен превышать 9, поэтому лучшими всегда должны быть нейтральные или легко щелочные составы ТЖ.

Таблица 8.4. Влияние состава водных ТЖ на изнашиваемость пары «алмазсодержащий слой – инструментальный материал»

Технологическая жидкость			Инструментальный материал					
			ТН50		ВО13		ВОК60	
Склад	Концентрация, %	pH	m , мг	q_p , мг/г	m , мг	q_p , мг/г	m , мг	q_p , мг/г
Вода	100	5	0,7	0,236	0,7	0,0787	2,7	0,0262
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,5*	6	0,1	0,236	–	–	1,0	0,1010
(NH ₄) ₂ SO ₄	1,0*	6	–	–	–	–	4,5	0,0039
(NH ₄) ₂ SO ₄	3,0*	6	–	–	–	–	6,5	0,0285
NaNO ₂	0,5*	7	12,6	0,127	0,5	0,3776	1,4	0,1020
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,5*							
Вода	100	8	0,8	0,236	0,5	0,0393	1,0	1,010
Na ₂ HPO ₄	3,0*	8	2,0	0,0205	–	–	1,0	1,3200
Na ₂ CO ₃	3,0*	10	0,2	2,36	–	–	1,0	4,72
Na ₂ B ₄ O ₇	0,3*	11	0,3	4,913	1,2	0,3740	5,0	0,0236
Na ₃ PO ₄	0,1*							
Вода	100	11	0,1	0,236	1,5	0,0262	11,0	0,0429

Примечание: * остальное вода.

На подтверждения указанных выше тенденций, установленных при проведении лабораторных исследований в ячейке, изучена работоспособность алмазного круга 12A2-45° 150×10×3×32–АС4 100/80–В1-13–100 в процессе непосредственного шлифования инструментальных материалов. Режимы обработки: $v_k=15$ м/с; $S_{пр}=0,3$ м/мин; $S_n=0,25$ мм/дв.х., а производительность шлифования при этом 525 мм³/мин (табл. 8.2). Видно, что при шлифовании сплава ТН50 снижение водородного показателя ТЖ с щелочного на нейтральный уменьшает износ кругов и наиболее приемлемым для применения являются ТЖ на основе Na₂HPO₄ с добавкой соли (NH₄)₂SO₄. Укажем, что это подтверждает вывод работы [482], где показано, что для расширения возможностей ТЖ используют комбинированные добавки, содержащие серу, хлор и фосфор одновременно. Соли хлора в работе [117] не использовали, поскольку ее применение требует значительных затрат на снижение коррозии оборудования, а компенсация положительных эффектов от ее наличия является небольшой. А вот сульфаты улучшают моющую способность [481]. При шлифовании керамики ВО13 с повышением pH ТЖ износ кругов снижается, причем лучшим является использование воды без добавок солей. Хотя водные растворы соды и имеют большой pH, однако использование их при шлифовании кругами на полимерных связках нецелесообразно, о чем свидетельствуют данные как табл. 8.4, так и табл. 8.5. Жидкости Укринол-14 та Аквол-2 (табл. 8.5) хотя и имеют

нейтральный pH, однако их использование ухудшает моющее действие и растет износ алмазных кругов.

Таблица 8.5. Влияние состава водных ТЖ на показатели шлифования инструментальных материалов

Состав технологических жидкостей		pH	Эффективная мощность шлифования, кВт	Относительный расход алмазов, мг/г
Состав	Концентрация, %			
Сплав ТН50				
Укринол-14	3,0*	8	1,70	10,1
Аквол-2	3,0*	8	1,70	11,1
Сода кальцинированная	3,0*	10	1,70	7,5
Бура	3,0*	10	1,70	6,4
Na ₂ HPO ₄	2,0*	8	1,35	3,5
NaNO ₂	0,2*			
Na ₂ HPO ₄	2,0*	7	1,40	2,6
NaNO ₂	0,2*			
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,1*			
Оксидная керамика BO13				
(NH ₄) ₂ SO ₄	1,0*	7	0,25	1,7
Na ₂ HPO ₄	2,5*	8	0,20	1,3
NaNO ₂	0,5*			
Вода	100	9	0,30	1,1
Сода кальцинированная	3,0*	10	0,25	3,7

Примечание: *остальное вода.

Использование соли Na₂HPO₄, которая, как было указано выше, диссоциирует в растворе на катион натрия и анион фосфорной кислоты, является достаточно привлекательным, поскольку это, за счет электростатического притяжения позволяет своеобразно покрывать поверхность зерен алмазов и связки круга. Активность этой поверхности, увеличенная за счет теплового движения в растворе в процессе шлифования, нормализуется более сильным электролитом и прилипание продуктов шлифования снижается. Следует указать, что такая поляризация жидкости, или ее активация, являются важным фактором воздействия на поверхности в зоне контакта. Тут могут срабатывать разные эффекты. Например [481], электрокапиллярный эффект, а именно снижение поверхностной энергии твердого тела, может быть вызвано например, электрическим зарядом поверхности. В соответствии с этим эффектом наибольшая поверхностная энергия соответствует незаряженной поверхности. Образование двойного поверхностного слоя (заряд поверхности), приводит к снижению поверхностной энергии и, соответственно, к снижению прочности твердого

тела. Основные закономерности воздействия заряжения на механические свойства металлов сохраняются и в условиях интенсивного образования новой поверхности, например, при абразивном диспергировании [481]. А может срабатывать и описанный выше эффект Ребиндера.

Возможными вариантами активации ТЖ являются описанные выше: магнитная – позволяет увеличить своеобразную агрессивность жидкости к материалу связки круга и детали, что оказывает содействие образованию прочных смазочных пленок на поверхностях круга и объекта резания, а также, как следствие, усиливается и моющее действие жидкости [272], и ультразвуковая – когда возрастание физико-химической активности ТЖ, подвергнутой обработке в ультразвуковом поле, происходит вследствие образования в кавитационной зоне под действием электрических разрядов реакционно-способных частичек с большой энергией (ионизированные и возбужденные молекулы, ионы, свободные радикалы и др.) [501]. У случае [117] для реализации таких преимуществ предложено использовать метод поляризации жидкости на анодную (насыщенную OH^- -ионами) и катодную (насыщенную H^+ -ионами) воду и разделение их в разные ячейки. На взгляд [117], это уникальная возможность получать при шлифовании поляризацию не за счет дополнительного источника тока, а именно за счет ТЖ. Причем тут для нас в большей степени интересной является, как было показано выше, как раз вода с гидрат-ионами.

Таблица 8.6. Влияние активированной воды на показатели шлифования оксидно-карбидной керамики ВОК60

Состав технологической жидкости		рН	Эффективная мощность шлифования, кВт	Относительный расход алмазов, мг/г
Состав	Концентрация, %			
Круг АС6 100/80–СК6–100				
(NH_4) ₂ SO ₄	0,1	7	0,30	0,45
NaNO ₂	0,2			
Вода	99,7			
(NH_4) ₂ SO ₄	0,1	8	0,35	0,18
NaNO ₂	0,2			
Активированная вода	99,7			
Круг АС4 100/80–В1-13–100				
(NH_4) ₂ SO ₄	0,1	7	0,29	1,30
NaNO ₂	0,2			
Вода	99,7			
(NH_4) ₂ SO ₄	0,1	8	0,34	0,68
NaNO ₂	0,2			
Активированная вода	99,7			

Эксперименты при шлифовании керамики ВСК60 на режимах: $v_k=15$ м/с; $S_{пр}=0,3$ м/мин; $S_n=0,25$ мм/дв.х., проводились как с использованием неэлектропроводной керамической связки СК6, так и электропроводной металлополимерной В1-13. Данные экспериментов приведены в табл. 8.6, из которой видно, что использование воды активированной гидрат-ионами позволяет снизить износ кругов почти в 2 раза в сравнении с обычной неактивированной водой. Использование кислотной активированной воды, учитывая ее высокую коррозионную активность, в работе [117] не рассматривалось. Тем более, практика показывает, что все ТЖ, имеющие водородный показатель менее 7, являются коррозионноактивными и при их использовании необходимо придерживаться экологических норм безопасности и защиты оборудования.

Приведенное выше показывает, что поляризация жидкости дает эффект, однако во многих случаях возникает вопрос о том, возможно ли получить положительные эффекты поляризации в условиях ограниченного доступа жидкости в зону обработки. Как было показано в работе [71], для достижения эффекта изменения состояния контактных поверхностей за счет нетрадиционных средств, например, неявной поляризации, необходимо обеспечить наличие воды в зоне обработки. В ряде случаев, например, при шлифовании без охлаждения этого сделать невозможно. Между тем, известно [71], что в рабочем слое круга существует определенное пористое пространство, которое практически никак не используется для повышения эффективности шлифования. Круги из СТМ используются преимущественно для шлифования с применением разных технологических жидкостей на водной основе. При этом, абразивсодержащий рабочий слой, имеющий определенную пористость, может поглотить некоторое количество жидкости. Преимущественно импрегнаторы, а в нашем случае это вода, влияют на процесс шлифования непосредственно (через изменение контактных процессов) и касательно (через изменение физико-механических свойств, в т.ч. образование пленок). Одним из реальных показателей изменения поверхностного слоя (появления пленок) под воздействием водопоглощения является изменение коэффициента трения. Установлено, что водопоглощение позволяет снизить коэффициент трения. Так, при трении твердого сплава ВК6ОМ по металлополимерной связке В1-13 коэффициент трения ощутимо снижается, начиная с выдержки в 4 часа, а в наибольшей мере – при выдержке в воде 8 часов. Постепенное повышение коэффициента трения после 8 часов выдержки связано, на взгляд [117], с действием эффекта электрохимической гетерогенности поверхности связки, описанном выше в главе 3.

Таким образом, комплекс проведенных исследований [117] позволил выявить следующие пути достижения позитивных эффектов использова-

ния ненасыщенных технологических жидкостей при алмазном шлифовании с точки зрения нового подхода к выбору составов технологических жидкостей, как нетрадиционного средства получения неявной поляризации при шлифовании и, при этом:

- охлаждающее действие достигается:
 - введением в состав ТЖ добавок солей аммония сернокислого;
 - использованием фактора предварительного водопоглощения рабочим слоем кругов;
- смазывающее действие достигается за счет:
 - введения в ТЖ солей, содержащих фосфор (Na_2HPO_4) та серу ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$);
 - использования активированной воды;
 - эффекта электрохимической гетерогенности поверхности связки с использованием фактора предварительного водопоглощения рабочим слоем кругов.
- моющее действие достигается введением в состав ТЖ сульфата – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

Г Л А В А 9

КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

9.1. Шероховатость обработанной поверхности и взаимосвязь ее параметров

При оценке шероховатости обработанной поверхности наиболее распространенным и наиболее применяемым в научной и технической литературе показателем является показатель среднего арифметического отклонения профиля – Ra . Укажем, что в свое время ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения» отметил, что параметры шероховатости (один или несколько) выбираются из приведенной номенклатуры:

Ra – среднее арифметическое отклонение профиля;

Rz – высота неровностей профиля по 10 точкам;

R_{\max} – наибольшая высота профиля;

Sm – средний шаг неровностей;

S – средний шаг местных выступов профиля;

tp – относительная опорная длина профиля, где p – значение уровня сечения профиля.

При этом, там же указано, что параметр Ra является предпочтительным. Так, с использованием этого параметра в работе [508] дана классификация методов абразивной обработки (по шероховатости) – шлифование-*grinding* (когда Ra составляет от 100 000 Å до 1 000 Å или от 10 мкм до 0,1 мкм), доводка-*lapping* (когда Ra составляет от 1 000 Å до 100 Å или от 0,1 мкм до 0,01 мкм), полирование-*polishing* (когда Ra составляет от 100 Å до 1 Å или от 0,01 мкм до 0,0001 мкм).

Вместе с тем, опыт промышленной эксплуатации изделий показывает, что для разных условий их применения необходимо контролировать не один, например указанный выше Ra , а несколько параметров шероховатости контактирующих поверхностей [509]:

- для поверхностей, работающих в условиях трения-скольжения и качения и изнашиваемых немного – Ra , tp и направление неровностей;
- для поверхностей, склонных к контактным напряжениям – Ra и tp ;
- для прессовых соединений – Ra ;
- для поверхностей изделий, подвергающихся переменным нагрузкам – R_{\max} , Sm и направление неровностей;
- для поверхностей, образующих герметические соединения – Ra и tp .

Исследователи отдельно изучают влияние режимов и условий обработки на конкретные параметры шероховатости, чем вносится системная ошибка, поскольку на самом деле для одинаковых условий обработки все параметры шероховатости связаны между собой и воздействовать только на один параметр невозможно. Изменяются и другие. Покажем это на примере ряда существующих связей между параметрами. Обратим внимание на то, что шероховатость, это статистический процесс, поэтому такая связь является корреляционной.

В работе [510] показано, что величина связи или соотношение между параметрами Rz и Ra может колебаться. Величина этого соотношения зависит от профиля гребешков шероховатости. Так, для треугольного профиля $Rz/Ra=4$. Для выпуклого та вогнутого профилей это соотношение является большим и может достигать в зависимости от степени выпуклости и вогнутости до 8. Таким образом, чем больше отличается профиль гребешков от треугольного, тем большим является соотношение Rz/Ra . Поэтому указанное соотношение можно назвать как *коэффициент формы профиля* или *коэффициент полноты профиля*. Как известно, параметр Rz не может нести информацию о форме гребешка. Параметр Ra содержит такую информацию у неявном виде и только соотношение Rz/Ra дает численную характеристику [510]. Для конкретных условий обработки рядом работ показаны значения указанного соотношения. Так, для расчета высотных характеристик шероховатости обрабатываемой детали можно пользоваться следующими соотношениями: $R_{\max} = kRz$, где $k=1,25$ для нерегулярной и $k=1,15$ для регулярной шероховатости. При этом, $Rz \approx 4Ra$ для грубой поверхности и $Rz \approx 5Ra$ для поверхности в диапазоне $Ra = 1,25-0,02$ мкм [511]. Для условий обработки алмазным и абразивным инструментом: $Rz = 5Ra$ [512]. Для условий точения резцами: $Rz = 5Ra$ [513]. Для условий электроэрозионной обработки: $Rz = 3,125Ra$ [514].

Теперь рассмотрим корреляционную связь между Ra и R_{\max} . Так, для условий обработки алмазным и абразивным инструментом – $R_{\max} = (8-10)Ra$ [512]. Для условий шлифования крупнозернистым КНБ (160/125) сталей 40Х (HRC 53) и ШХ15 (HRC 60) – $R_{\max}=(6,472\pm 0,225)Ra$ [515]. Для условий электроэрозионной обработки: $R_{\max} = 5,40625Ra$ [514].

По данным работы [62] указанная связь в целом сводится к простым соотношениям. Например, для спеченной и необработанной поверхности твердых сплавов такая зависимость является близкой к виду $R_{\max} \approx 4Ra$. При лезвийной обработке сталей (40Х, ШХ15, Х12М) резцами из Гексани-та-Р зависимость $R_{\max}=f(Ra)$ больше отвечает виду $R_{\max} \approx 6Ra$.

Для абразивной обработки наиболее характерной в этом случае будет зависимость близкая до виду $R_{\max} \approx 8Ra$. Это характерно как для обработки инструментальных материалов: быстрорежущих сталей, инструмен-

тальных керамик, твердых сплавов (вольфрамовых и безвольфрамовых), так и для обработки нержавеющей стали, титановых сплавов и совместной обработки закаленной и незакаленной стали (ст.10+9ХФ). А вот могут ли быть другие варианты данной зависимости для абразивной обработки? Выявлено [62], что могут. Зависимость $R_{\max} \approx 6Ra$ является характерной для абразивной обработки быстрорежущих сталей кругами из электрокорунда и алмазной обработки магнитотвердых сплавов, когда формируется более грубо обработанная поверхность или свой вклад в высотные параметры вносит пористость. В целом, вероятно более верным было бы считать, что для абразивной обработки (достаточно широкой области обработки) зависимость $R_{\max} = f(Ra)$ более близка к виду $R_{\max} \approx (6-8)Ra$, причем большие значения будут характерными и для чистовых методов абразивной обработки. А вот при доводке керамики и покрытий зависимость $R_{\max} = f(Ra)$ близка к виду $R_{\max} \approx 10Ra$. В последнем случае свой вклад в относительное повышение значения R_{\max} вносит пористость данных материалов, поскольку при доводке она уже имеет значение. Приведенное выше позволило [62] сформулировать такое положение: чем более грубой является поверхность, тем она имеет меньше соотношение между R_{\max} и Ra , а чем более совершенной является поверхность, полученная доводкой, полированием или другими финишными методами, тем это соотношение больше. Например, спеченная поверхность и поверхность после абразивной обработки обычными абразивами имеет соотношение в диапазоне $R_{\max} \approx (4-6)Ra$. Обработка шлифовальными кругами из СТМ, когда поверхность имеет меньшую шероховатость, чем после приведенных выше методов, и при тонком шлифовании преимущественно характеризуется соотношением $R_{\max} \approx 8Ra$. В случае доводочных операций на пористых материалах, когда значения Ra являются небольшими, это соотношения являются уже близким к $R_{\max} \approx 10Ra$. Как раз в этом случае вероятно дефекты самой обрабатываемой поверхности в виде пор или трещин и является причиной повышения величины данного соотношения [62].

Выше уже было показано, что имеется определенная связь между показателями R_{\max} и Rz . Так, для условий точения резцами: $R_{\max} = 1,2Rz$ [513]. Для обработки алмазным инструментом: $R_{\max} = 1,25Rz$ для нерегулярной и $R_{\max} = 1,15Rz$ для регулярной шероховатости поверхности [253].

Теперь рассмотрим корреляционную связь между параметрами: высотным Ra и шаговым Sm . В работе [516] показано, что для большинства методов механической обработки при средней высоте микронеровностей шаг шероховатости Sm не превышает $40R_{\max}$ (шлифование, строгание, фрезерование, растачивание стальных и чугуновых деталей), а для неровностей с меньшей высотой значения их шага могут достигать $300R_{\max}$.

Для условий электроэрозионной обработки: $Sm = 14,0625Ra$ [514].

Анализ полученных в работе [62] зависимостей подтверждает то, что преимущественно шаг микронеровностей S_m повышается с возрастанием параметра R_a . При этом, характер такого роста зависит от способа обработки и в определенной степени – от обрабатываемого материала. Так, из рис. 9.1 видно, что способы шлифования по степени повышения величины шага микронеровностей S_m располагаются в следующей последовательности.

упругий → глубинный → врезной

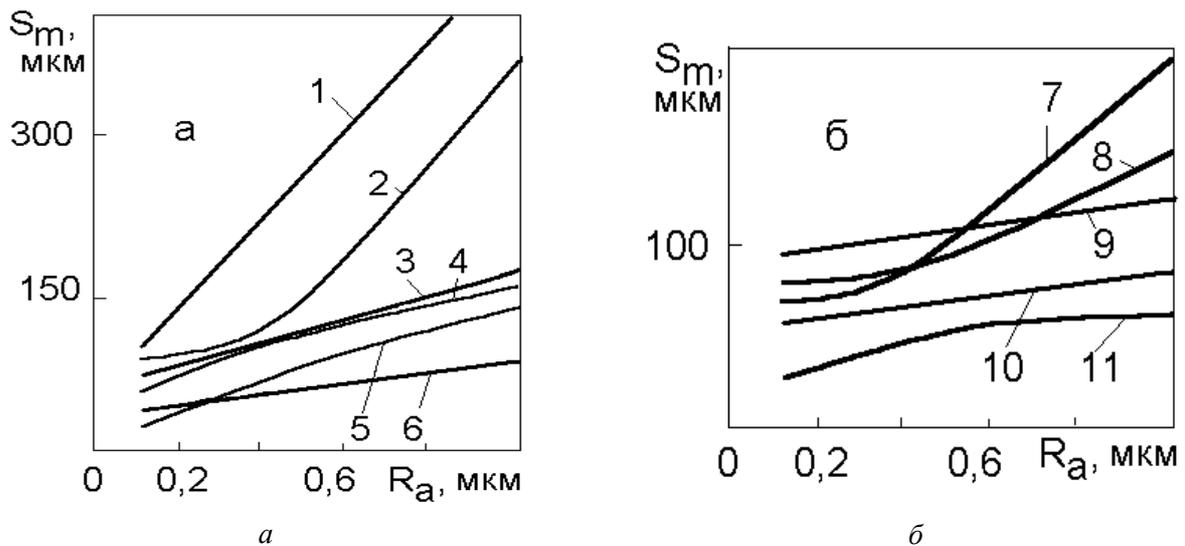


Рис. 9.1. Зависимость шага микронеровностей S_m от параметра R_a при разных способах шлифования керамики (а) и стали (б): 1 – врезном (оксидно-карбидная); 2 – глубинном (оксидно-карбидная); 3 – глубинном (оксидная); 4 – упругом (оксидно-карбидная); 5 – плоском; 6 – круглом внешнем; 7 – многопроходном стали Р6М5 кругами из КНБ; 8 – то же самое для стали 10+9ХФ; 9 – точение резцами из Гексанита-Р стали Х12М; 10 – многопроходном стали Р6М5 кругом из электрокорунда; 11 – глубинном ЭХШ стали Р6М5 [62]

Сравнение способов многопроходного и глубинного шлифования (рис. 9.1) показывает, что в первом случае (к нему относится и точение) шаг неровностей больший, чем во втором. Все приведенные примеры (табл. 9.1 и рис. 9.1) свидетельствуют о том, что с возрастанием параметра R_a параметр S_m увеличивается. Эту тенденцию следует признать преимущественной. А вот может ли быть другим характер изменения величины S_m от R_a ? Выявлено [62], что может. Это зафиксировано для методов полирования наплавов лепестковыми кругами и процесса доводки пастами (продольный микропрофиль). То есть, при процессах доводки могут быть определенные отклонения от общих тенденций.

Таблица 9.1. Функции аппроксимации, описывающие связь параметра шероховатости Sm с параметром Ra для разных условий обработки (диапазон значений Ra 0,1–1,0 мкм)

Условия обработки	Функции аппроксимации	Относительная ошибка аппроксимации, %
Глубинное электрошлифование кругами из КНБ быстрорежущих сталей	$Sm = 42,56 + 26,08Ra$	17,5
Многопроходное шлифование стали Р6М5 кругами из электрокорунда без охлаждения	$Sm = 55,45 + 29,19Ra$	9,9
Многопроходное шлифование стали Р6М5 кругами из КНБ без охлаждения	$Sm = 23,21 + 153,6Ra$	20,0
Многопроходное шлифование стали 10+9ХФ кругами из КНБ с охлаждением	$Sm = 51,37 + 92,77Ra$	8,9
Глубинное алмазное шлифование БВТС марки КНТ	$Sm = 27,09 + 405Ra - 238,9Ra^2$	24,0
Глубинное алмазное шлифование твердых сплавов	$Sm = 34,61 + 320,1Ra - 155Ra^2$	40,9
Глубинное алмазное шлифование оксидно-карбидной керамики	$Sm = 84,1 - 77,82Ra + 397,1Ra^2$	24,3
Глубинное алмазное шлифование оксидной режущей керамики	$Sm = 47,14 + 135,4Ra$	15,8
Упругое алмазное шлифование оксидно-карбидной керамики	$Sm = 176,5Ra^{0,6533}$	16,7
Врезное алмазное шлифование оксидно-карбидной керамики	$Sm = 48,41 + 477,6Ra$	20,6
Двустороннее алмазное шлифование оксидно-карбидной керамики	$Sm = 16,69 + 206,48Ra^3$	17,9
Многопроходное алмазное шлифование магнитотвердых сплавов	$Sm = 30 + 70,59Ra$	25,0
Точение стали Х12М резцами из Гексанита-Р	$Sm = 101,1 + 27,16Ra$	36,5
Точение стали 40Х резцами из Гексанита-Р	$Sm = 100,1 + 90,59Ra$	27,7

Рассмотрим теперь, как связана опорная длина профиля с высотными параметрами шероховатости. Корреляционная связь между Ra и t_p в работе [62] исследована для относительной опорной длины профиля tr в разных

сечениях высоты шероховатости обработанной поверхности. В табл. 9.2 приведены данные по изменению значений параметров t_{20} и t_{50} на уровне 20 и 50 % R_{\max} в зависимости от Ra и способов обработки.

Таблица 9.2. Функции аппроксимации, описывающие связь параметра профиля tp с параметром Ra для разных условий обработки (диапазон значений Ra 0,1–1,0 мкм)

Условия обработки	Функции аппроксимации	Относительная ошибка аппроксимации, %
Глубинное электрошлифование кругами из КНБ быстрорежущих сталей	$t_{50} = 80,64 - 23,19 Ra$	15,5
Многопроходное шлифование стали Р6М5 кругами из электрокорунда без охлаждения	$t_{50} = 66,43 + 5,502 Ra$	8,3
Многопроходное шлифование стали Р6М5 кругами из КНБ без охлаждения	$t_{50} = 37,41 + 23,89 Ra$	22,1
Многопроходное шлифование стали 10+9ХФ кругами из КНБ с охлаждением	$t_{50} = 72,8 - 7,873 Ra$	9,1
Глубинное алмазное шлифование БВТС марки КНТ	$t_{50} = 76,42 - 81,93 Ra + 66,93 Ra^2$	30,5
Глубинное алмазное шлифование БВТС марки ТН	$t_{50} = 62,2 - 36,35 Ra + 50,64 Ra^2$	24,3
Глубинное алмазное шлифование твердых сплавов	$t_{50} = 84,08 - 144,2 Ra + 137,3 Ra^2$	14,9
Глубинное алмазное шлифование оксидно-карбидной керамики	$t_{50} = 66,6 - 4,621 Ra$	22,4
Упругое алмазное шлифование оксидно-карбидной керамики	$t_{50} = 70,47 - 16,04 Ra$	16,4
Врезное алмазное шлифование оксидно-карбидной керамики	$t_{50} = 56,51 Ra^{-0,09175}$	16,3
Двустороннее алмазное шлифование оксидно-карбидной керамики	$t_{50} = 58,4 - 123,2 Ra + 227,9 Ra^2$	17,0
Многопроходное алмазное шлифование магнитотвердых сплавов	$t_{30} = 19 + 9 Ra^2$	40,4
Точение стали Х12М резцами из Гексанита-Р	$t_{50} = 61,42 - 1,28 Ra$	18,7
Точение стали 40Х резцами из Гексанита-Р	$t_{50} = 54,97 + 4,621 Ra$	19,8

В работе [62] проанализирован характер поведения всего комплекса параметров от t_{10} до t_{90} при изменении параметра Ra . Один из примеров в виде аппроксимирующих функций представлен в табл. 9.3. В целом же, возможно утверждать, что для диапазона параметров от t_{10} до t_{40} характерным является повышение их величины с возрастанием значения Ra . В то же время, для диапазона параметров от t_{60} до t_{90} характерным является снижение их величины с увеличением значения Ra . Поведение параметра t_{50} , а во многих случаях и ближайших параметров t_{40} и t_{60} , является несколько неопределенным. В большинстве случаев (~ в 60 процентов) он снижается с ростом Ra , а в других 40 процентах – повышается.

Таблица 9.3. Функции аппроксимации, описывающие связь показателя опорной длины профиля для разных уровней R_{\max} при многопроходном шлифовании стали Р6М5 кругом из электрокорунда белого

Функции аппроксимации	Относительная ошибка аппроксимации, %
$t_{10} = Ra / (1,878Ra^2 - 3,97Ra - 2,23)$	27,6
$t_{20} = -32,627Ra^2 + 77,767Ra - 29,517$	25,3
$t_{30} = -47,42Ra^2 + 116,5Ra - 34,74$	19,5
$t_{40} = -32Ra^2 + 83,65Ra + 3,018$	12,1
$t_{50} = 66,43 + 5,502Ra$	8,3
$t_{60} = 88,45 - 3,348/Ra$	4,1
$t_{70} = 93,723 - 1,145/Ra$	1,9
$t_{80} = 96,59 - 0,488/Ra$	0,9
$t_{90} = 0,489Ra^2 + 0,975Ra - 97,35$	0,4

Преимущественного воздействия какого-либо метода или способа обработки, обрабатываемого материала на формирование параметра t_{50} не выявлено [62]. Так, глубинное шлифование в одном случае, например твердых сплавов, характеризуется ростом t_{50} с повышением Ra , а оксидно-карбидной керамики – к снижению. Аналогично, снижение параметра t_{50} наблюдается и при глубинном шлифовании быстрорежущей стали. Вообще следует учитывать такой характер изменения параметра t_{50} от величины Ra , так как например, при глубинном и многопроходном шлифовании быстрорежущей стали заполненность профиля на уровне 50 % R_{\max} (t_{50}) при $Ra = 1,0$ мкм примерно одинакова и составляет около 60 %, тогда как при $Ra = 0,1$ мкм глубинное шлифование обеспечивает заполненность профиля на этом уровне 78 %, а многопроходное – только 40 %. В определенной степени это подчеркивает преимущества глубинного шлифования при условии обеспечения невысокой шероховатости обработанной поверхности.

В окончании данной подглавы обратим внимание на то, что имеется также и связь между средним радиусом кривизны вершин профиля и Ra . Так, в работе [517] для условий алмазного круглого шлифования с охлаждением наплавленных и напыленных материалов авторами получена зависимость $\rho_B = 37,07 Ra^{-0,53}$.

9.2. Влияние характеристики шлифовальных кругов из СТМ на шероховатость обработанной поверхности

Шероховатость обработанной поверхности формируется абразивными зёрнами и естественно, что ее величина определяется во многом характеристикой шлифовальных кругов. Перед тем, как рассмотреть детально этот вопрос, обратим внимание на связь между толщиной среза и параметром Rz . В работе [518] показано, что средняя высота неровностей Rz без учета упругих и пластических деформаций численно равняется средней толщине среза, снимаемой отдельным зёрном шлифовального круга $Rz = 1,06 a_z$.

Влияние характеристики шлифовального круга из СТМ на шероховатость обработанной ими поверхности рассмотрено в работе [62] для условий торцового шлифования инструментальных материалов.

Установлено, что с повышением показателя прочности алмазов (от АС2 до АС32) в кругах шероховатость поверхности изменяется мало, хотя наблюдается тенденция к ее возрастанию [62].

Покрытие зёрен СТМ оказывает значительно большее влияние на шероховатость, чем прочность зёрен. Изучались [62] такие варианты нанесения покрытий: стеклопокрытие (С), металлопокрытие (М), стеклометаллическое (СМ), металлоагрегированное (МА). Исследования позволили сделать однозначный вывод: *любое покрытие зёрен СТМ приводит к повышению высотных параметров*. Это в одинаковой степени относится как к кругам на металлических связках, так и на полимерных. В целом, можно представить влияние покрытия зёрен на шероховатость в следующем ряду (по степени повышения значений сравнительных коэффициентов высотного параметра Ra): без покрытия (1,0) \rightarrow МА (1,6) \rightarrow С (1,8) \rightarrow СМ (2,0) \rightarrow М (2,2).

Зернистость СТМ при формировании шероховатости играет важную роль, однако ее влияние не является однозначным и в значительной степени зависит от способа шлифования и состояния формы профиля режущей поверхности круга. Для способов шлифования с продольной подачей это связано с образованием треугольной формы профиля режущей поверхности круга в радиальном направлении, при которой обрабатываемая по-

верхность формируется зернами, находящимися на вершине профиля и их зернистость при этом в диапазоне от 63/50 до 160/125 не имеет принципиального значения [62]. Так, при глубинном электрошлифовании быстрорежущих сталей кругами из КНБ повышение зернистости в этом диапазоне не изменяет высотных параметров шероховатости. В случае наличия на поверхности круга переходного кругового пояска, параллельного обрабатываемой поверхности, и при упругих способах торцового шлифования (когда площадь режущей поверхности круга остается параллельной обрабатываемой) зернистость СТМ имеет уже большее значение и с ее повышением растет высота микронеровностей обработанной поверхности (табл. 9.4).

Таблица 9.4. Эксплуатационные показатели алмазных планшайб при упругом шлифовании пластин на станке ТШ8805

Характеристика круга 6А2 400×100×3×76	Производительность шлифования, мм ³ /мин	Относительный расход алмазов, мг/г	Шероховатость поверхности пластин, Ra, мкм
Оксидно-карбидная керамика ВОК60			
АСМ 28/20–СК6–100	194	24,65	0,04–0,08
АСМ 40/28–СК6–100	484	27,92	0,05–0,08
АС6 50/40–СК6–100	793	7,90	0,13–0,14
1	2	3	4
АС6 63/50–СК6–100	1060	9,21	0,10–0,18
АС6 80/63–СК6–100	1103	–	0,07–0,16
АС6 160/125–СК6–100	2585	–	0,18–0,21
Безвольфрамовый твердый сплав ТН20			
АС6 63/50–СК6–100	958	15,34	0,10–0,16
АС6 80/63–СК6–100	1075	12,07	0,08–0,16
АС6 160/125–СК6–100	1559	–	0,15–0,26

Обратим внимание на то, что для условий упругого шлифования имеются и определенные особенности. Анализ табл. 9.4 показывает, что разная зернистость алмазов обеспечивает и разную производительность обработки, что, в свою очередь, влияет и на шероховатость обработанной поверхности, нивелируя ее в определенном отношении для близких зернистостей.

С повышением относительной концентрации зерен шлифпорошка СТМ в режущем слое круга от 25 до 100 % высотные параметры шероховатости поверхности снижаются и после 100 % несколько стабилизируются [62], а, в случае использования металлополимерных связей, с повышением концентрации за 100 % высотные параметры даже повышаются (табл. 9.5).

Таблица 9.5. Влияние концентрации алмазов АС4 с покрытием МА в кругах на полимерной связке ВС-Э на показатели шероховатости при электрохимическом шлифовании сплава ТН20 с производительностью 525 мм³/мин

Характеристика круга	Показатели шероховатости			
	<i>Ra</i> , мкм	<i>Rmax</i> , мкм	<i>Sm</i> , мкм	t50, %
100/80–100	0,36	2,75	136	46,3
(100/80–100)+(50/40–25)	0,63	2,99	323	38,6
100/80–150	0,40	3,29	115	84,9

Из анализа табл. 9.5 угадывается тенденция к снижению шага неровностей профиля и возрастанию его заполненности при повышении концентрации (см. строки 1 та 3 табл. 9.5). Это объясняется тем, что при концентрациях меньших 100 % шероховатость повышается из-за снижения количества зерен, формирующих поверхность, и снижения их фактической глубины резания. А вот с повышением концентрации за 100 % связка становится более твердой, вероятность вжатия зерен в связку снижается и следы от единичных зерен становятся более глубокими. Данная алогичность поведения шероховатости с повышением относительной концентрации СТМ за 100% подтверждает предположение [62] про то, что для той части зерен, которые наклонены не навстречу направлению действия усилия резания, участие в съеме припуска является несущественным и увеличение количества зерен с повышением концентрации не вносит позитивного влияния на шероховатость. Установлено также (см. табл. 9.5, строка 2), что введение в связку, наряду с зернами средней величины, зерен малых фракций не только не приводит к снижению шероховатости, а наоборот, ухудшает ее.

Основа связки кругов ощутимо влияет на шероховатость, поскольку свойства матрицы, в которой находится зерно, определяют условия его контактирования с обрабатываемым материалом. Более твердая и жесткая матрица обеспечивает и более высокую шероховатость поверхности, на что уже было указано выше при анализе влияния концентрации зерен СТМ. Установлено, что в большинстве случаев при использовании более эластичных полимерных связок, в сравнении с металлическими и керамическими, шероховатость снижается в 2,0–2,4 раза [62]. Однако есть и исключения. Указанная выше тенденция не подтверждается при шлифовании незакаленной стали кругами из КНБ. Выявлено, что в этом случае наименьшая шероховатость наблюдается при шлифовании кругом на металлической связке (в данном случае – М020-2). Использование полимерной связки не снижает, как бы это следовало ожидать, значения параметра *Ra*, а, наоборот, повышает. Это связано с более интенсивным

износом кругов на полимерных связках при шлифовании незакаленной стали. Вследствие этого, выступание зерен является большим, однако относительные опорные длины профиля микронеровностей для двух указанных связок при этом отличаются мало. В связи с этим, обращено внимание на то, что при электроэрозионном шлифовании с повышением напряжения от 30 до 55 В шероховатость по параметру Ra возрастает от 0,34 до 0,75 мкм, а относительная опорная кривая профиля практически не изменяется. Это позволило [62] выдвинуть гипотезу про то, что большее вскрытие зерен СТМ не влияет на распределение зерен в режущем слое (опорную кривую), а влияет только на их выступание над связкой.

Обращено внимание на то, что шероховатость по параметру Ra уменьшается со снижением твердости связки алмазного круга [166, 519], с повышением твердости керамики [166], с снижением твердости технической керамики [519] и повышается – при вибрационном шлифовании на 6,8–37,5 % [166].

Укажем также, что авторами [520] показано, что при снижении шероховатости инструмента из быстрорежущих сталей от Ra 0,2–0,3 мкм до 0,02–0,04 мкм стойкость инструмента увеличивается незначительно (на 20–30 %) с 232 мин до 304 мин.

Теперь рассмотрим особенности формирования шероховатости при сочетании в рабочем слое круга из СТМ разных абразивов. В работе [521], это исследовано для условий торцового шлифования кругами из СТМ, когда в рабочем слое круга сочетаются два или три шлифпорошка разных абразивов (алмазов и КНБ), а именно компакты шлифпорошков на основе микропорошков кубонита, смеси компактов со стандартными шлифпорошками кубонита, смеси компактов с алмазными шлифпорошками. При проведении исследований общее количество исследованных абразивных смесей шлифпорошков в основе которых были микропорошки композиционных порошков кубонита составило 21 вариант. Были изготовлены круги формы 12A2-45° 125×5×3×32 – на связующем марки В2-08. Шлифовали образцы размерами 150×20×8 мм из быстрорежущей стали Р6М5. Обработка проводилась без охлаждения.

Шероховатость обработанных поверхностей контролировали с помощью профилометра-профилографа модели *SurfTest SJ-201* фирмы *Mitutoyo* (Япония), подключенного к компьютеру. Шероховатость обработанной поверхности оценивали следующими основными параметрами: Ra , R_{max} и S_m , мкм.

Анализ параметров микронеровностей обработанных поверхностей для четырех случаев сочетания абразивов в рабочем слое шлифовальных кругов (рис. 9.2) показал, что при шлифовании быстрорежущих сталей соотношение R_{max}/Ra находится в диапазоне от 7,5 до 10, а средний показа-

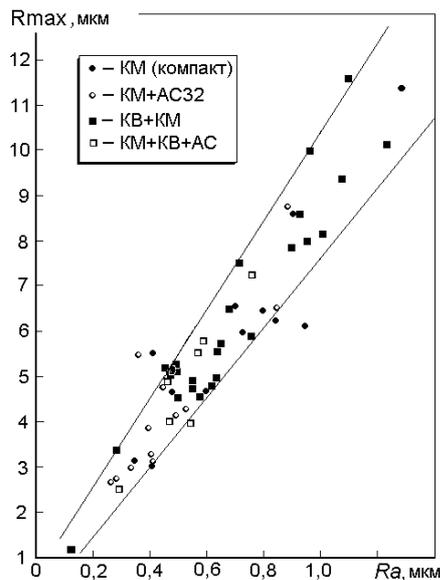


Рис. 9.2. Пример корреляционной связи между высотными параметрами шероховатости Ra и R_{max} обработанной поверхности стали Р6М5 при обработке кругами с разным сочетанием абразивов в их рабочем слое [521]

мощность шлифования. Косвенным подтверждением гипотезы о послойном изнашивании зерен должна быть небольшая разница в величинах шероховатости, при достаточно ощутимой разнице в величинах зернистостей, и увеличенный шаг неровностей в тех зернистостях, которые имеют неудовлетворительную режущую способность. Анализ данных по шероховатости обработанной поверхности подтвердил эту гипотезу. Сравнены три зернистости при одинаковой производительности шлифования – $120 \text{ мм}^3/\text{мин}$: 630/500 – $Ra = 0,44 \text{ мкм}$, 250/200 – $Ra = 0,37 \text{ мкм}$, 160/125 – $Ra = 0,46 \text{ мкм}$. Для $200 \text{ мм}^3/\text{хв.}$: 250/200 – $Ra = 0,93 \text{ мкм}$, 200/160 – $Ra = 0,86 \text{ мкм}$, 160/125 – $Ra = 0,72 \text{ мкм}$, 125/100 – $Ra = 0,76 \text{ мкм}$. Видно, что при производительности $120 \text{ мм}^3/\text{мин}$ снижение зернистости компактов в кругах в 4 раза никак не повлияло на шероховатость, а при повышении производительности обработки наблюдается определенная тенденция по снижению шероховатости со снижением зернистости. Однако эта тенденция является нечеткой и принципиально большой разницы между, например, 250/200 и вдвое меньшей зернистостью – 125/100 не наблюдается. В свою очередь, анализ связи между показателем Ra и шагом неровностей S_m (рис. 9.3) четко выявил, что именно на таких зернистостях, которые

составляет 8,5, что соответствует тем данным, которые нами изложены выше. Характерным является также и то, что разные сочетания абразивов не выделяются в отдельные области, а находятся в общей совокупности данных.

В работе [521] рассмотрено соотношение высотных и шаговых параметров шероховатости для представленных выше условий. Общие результаты исследований эксплуатационных показателей первой партии кругов со шлифпорошками на основе компактов микропорошков кубонита показали, что для них характерен особенный механизм изнашивания зерен. Они, за исключением зернистости 160/125 и частично 250/200, изнашиваются в значительной мере не сколами, а как бы послойно, и поэтому режущая способность зерна не возобновляется, растет контакт площадки скольжения зерна по обрабатываемой поверхности. С повышением производительности шлифования срезание материала ухудшается и растет эффективная

оказались совсем неработоспособными в кругах (630/500, 200/160, 125/100), и наблюдается увеличение значений шага неровностей.

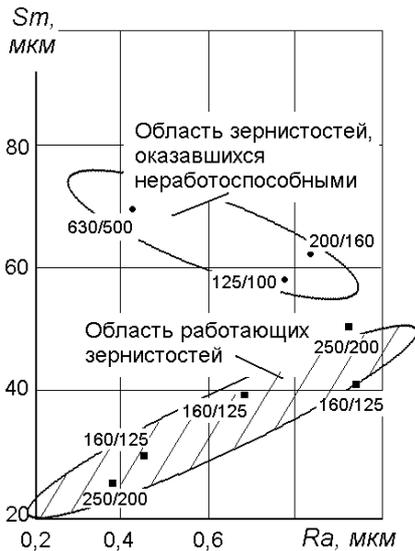


Рис. 9.3. Пример корреляционной связи между параметром шероховатости Ra и шагом микронеровностей Sm [521]

которые в определенной мере более близки к стандартным зернам КНБ, чем к компактам, что им и давало возможность удерживать режущую способность круга. Поэтому, на следующем этапе были изучены особенности профиля микронеровностей обработанной поверхности после обработки кругами, когда в качестве абразива использовалась бы смесь стандартных зерен КНБ и зерен компактов из микропорошков кубонита. Сравнивались между собой круги со смесью зерен из компактов зернистостью от КМ 125/100 до КМ 315/250 с добавлением стандартных зерен КВ 160/125

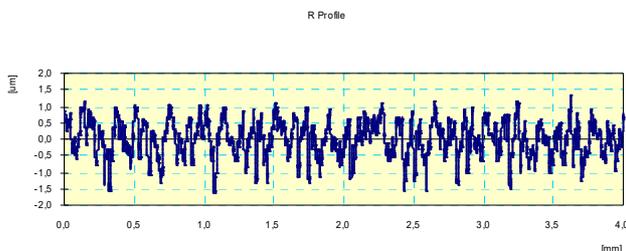


Рис 9.4. Профиль микронеровностей обработанной поверхности кругом с зернистостью КМ 630/500

Косвенным подтверждением приведенного выше является также и характер профиля микронеровностей обработанной такими кругами поверхности. Если для тех зернистостей, которые оказались неработоспособными, характерен более или менее равномерный профиль микрорельефа (рис. 9.4), то для зернистости 160/125, которая оказалась достаточно работоспособной, характерен профиль микрорельефа со своеобразными повторяющимися «карманами». Это как раз и отражает то, что у такой зернистости наряду с четко выраженными компактами встречаются и так называемые «режущие» зерна, которые и придают такой своеобразности профиля микронеровностей (рис. 9.5) [521]. Анализ приведенного выше позволяет сделать вывод о том, что вероятно тут имеет значение то, что у зернистости 160/125 (в общем объеме навески шлифпорошка) были зерна,

которые в определенной мере более близки к стандартным зернам КНБ, чем к компактам, что им и давало возможность удерживать режущую способность круга. Поэтому, на следующем этапе были изучены особенности профиля микронеровностей обработанной поверхности после обработки кругами, когда в качестве абразива использовалась бы смесь стандартных зерен КНБ и зерен компактов из микропорошков кубонита. Сравнивались между собой круги со смесью зерен из компактов зернистостью от КМ 125/100 до КМ 315/250 с добавлением стандартных зерен КВ 160/125 (КВ 125/100) в соотношении 50:50 и, при этом, зернистость компактов изменялась, а стандартных зерен – не изменялась (160/125 или 125/100).

В выводах по первой группе кругов уже указывалось на то, что даже при существенной разнице в зернистостях компактов величина шероховатости по параметру

Ra разнится немного, хотя и наблюдается определенная тенденция к снижению Ra со снижением зернистости. В работе [521] рассмотрен случай, когда есть базовая зернистость и переменная компактная. Для производительности в $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$ выявлено следующее: КМ 315/250 $Ra = 0,66 \text{ мкм}$, КМ 250/200 $Ra = 0,63 \text{ мкм}$, КМ 200/160 $Ra = 0,75 \text{ мкм}$, КМ 160/125 $Ra = 0,51 \text{ мкм}$, КМ 125/100 $Ra = 0,58 \text{ мкм}$. А для производительности в $400 \text{ мм}^3/\text{мин}$ получено такое: КМ 250/200 $Ra = 1,05 \text{ мкм}$, КМ 200/160 $Ra = 1,27 \text{ мкм}$, КМ 160/125 $Ra = 1,00 \text{ мкм}$, КМ 125/100 $Ra = 1,10 \text{ мкм}$. Видно, что в обоих случаях шероховатость где-то приблизительно одинакова, хотя несколько выпадает из общего ряда зернистость компакта в 200/160. Это свидетельствует о том, что зернистость компактов, как и предусматривается выше изложенной гипотезой, никак не влияет на шероховатость из-за особенностей изнашивания этих компактов. Вместе с тем, наличие в кругах стандартных зерен кубонита КВ 125/100 (160/125), из-за своей более лучшей режущей способности, улучшает показатели шероховатости. Например, у чистых компактов при производительности в $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$ диапазон Ra составил $0,72\text{--}0,93 \text{ мкм}$, а у смешанной группы – $0,51\text{--}0,75 \text{ мкм}$. Кроме того, обратим внимание на то, что у смешанных абразивов профиль микронеровностей является достаточно равномерным и не характеризуется четким наличием тех «карманов», на которые уже обращалось внимание для чистых (рис. 9.5) компактов.

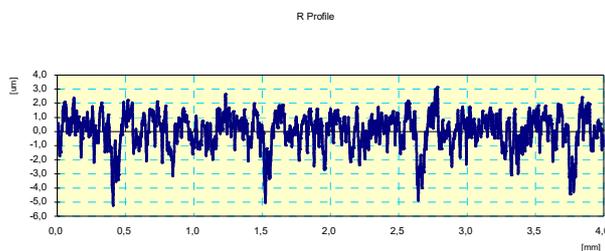


Рис. 9.5. Профиль микронеровностей обработанной поверхности кругом с зернистостью КМ 160/125

В целом, одновременное использование в шлифовальных кругах зерен шлифпорошков компактов на основе микропорошков кубонита и стандартных зерен кубонита несколько улучшает работоспособность кругов в сравнении с использованием исключительно шлифпорошков компактов, поскольку становится возможным достичь больших производительностей безприжоговой обработки быстрорежущей стали – $300 \text{ мм}^3/\text{мин}$ при смеси и всего $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$ при чистом компакте, а также несколько снизить шероховатость обрабатываемой поверхности, с $Ra = 0,72 \text{ мкм}$ при компактах до $Ra = 0,52 \text{ мкм}$ при смеси шлифпорошков кубонита). Поскольку использование смеси шлифпорошков дает определенный эффект, то на последнем этапе для сравнения были изучены эксплуатационные показатели кругов, когда в них используется смесь компактов КМ разной зернистости и стандартных алмазных зерен соответствующих зернистостей. Исследовали из-

носостойкость кругов со смесью в соотношении 50:50 зерен из компактов зернистостями от КМ 125/100 до КМ 400/315 и стандартных алмазных зерен АС32 соответствующих зернистостей. Тем самым, складывается фактически та же ситуация, что и в первой группе, однако теперь уже компактов в рабочем слое только 50 %, а остальные 50 % занимают алмазы, которые на быстрорежущей стали имеют приближенный к компактам механизм изнашивания, поскольку на них также образуются площадки износа, и это наблюдается по характеру микронеровностей обрабатываемой поверхности (рис. 9.6) [521].

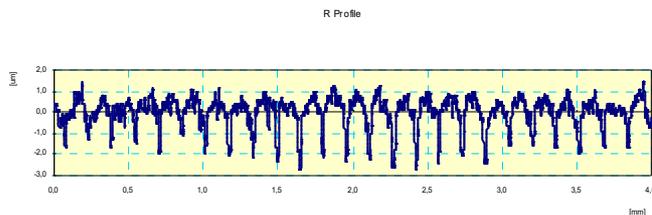


Рис. 9.6. Профиль микронеровностей обрабатываемой поверхности кругом со смесью шлифпорошков компакта КМ 400/315 и алмаза АС32 400/315 [521]

Напомним, что по первой группе компактов основной выявилась тенденция, когда снижение зернистости компактов до 160/125 оказалось наиболее эффективным с точки зрения износостойкости кругов. Логичным было бы ожидать такой же тенденции и в случае смеси компактов с алмазами. Так,

для производительности в $120 \text{ мм}^3/\text{мин}$ получено следующее: для КМ 400/315 – $Ra = 0,53 \text{ мкм}$, для КМ 315/250 – $Ra = 0,44 \text{ мкм}$, для КМ 250/200 – $Ra = 0,28 \text{ мкм}$, для КМ 200/160 – $Ra = 0,42 \text{ мкм}$, для КМ 160/125 – $Ra = 0,27 \text{ мкм}$, для КМ 125/100 – $Ra = 0,36 \text{ мкм}$. Из анализа этих данных можно сделать вывод о том, что в целом наблюдается тенденция в снижении шероховатости со снижением зернистости, хотя и имеется выброс для зернистости 125/100 [521]. Далее была повышена производительность до $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$: для КМ 250/200 – $Ra = 0,44 \text{ мкм}$, для КМ 200/160 – $Ra = 0,49 \text{ мкм}$, для КМ 160/125 $Ra = 0,39 \text{ мкм}$. Принципиальной разницы не наблюдается, но обращено внимание на уровень значений Ra для этой группы – $0,4\text{--}0,5 \text{ мкм}$. Если сравнить с показателями у кругов с чистыми компактами для этой же производительности, то тут уровень значений Ra уже выходит на диапазон – $0,7\text{--}0,9 \text{ мкм}$, то есть, фактически в 2 раза выше. А смесь компакта со стандартным кубонитом для $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$ дает диапазон Ra в $0,5\text{--}0,8 \text{ мкм}$. Видно, что смесь компактов с алмазами дает наименьшие показатели шероховатости обрабатываемой поверхности и, вероятно, это связано с тем, что они изнашиваются не сколами, а как бы послойно, и потому режущая способность зерна не возобновляется, возрастает контакт площадки скольжения зерна по обрабатываемой поверхности и снижается ее шероховатость. Возникает вопрос о том, как это отразилось на профиле микронеровностей. Вот тут и наблюдается в особо ярком виде

формирование микронеровностей обработанной поверхности с так называемыми «карманами», на которые уже обращалось внимание. Для кругов со смесью компактов КНБ и наличием алмазов при обработке стали Р6М5 это как раз и является наиболее характерным. Более отчетливо это наблюдается на больших зернистостях – 400/315 (рис. 9.6). Кроме того, характерным является также то, что профили микронеровностей обработанной такими кругами поверхности имеют аномально высокие шаги микронеровностей

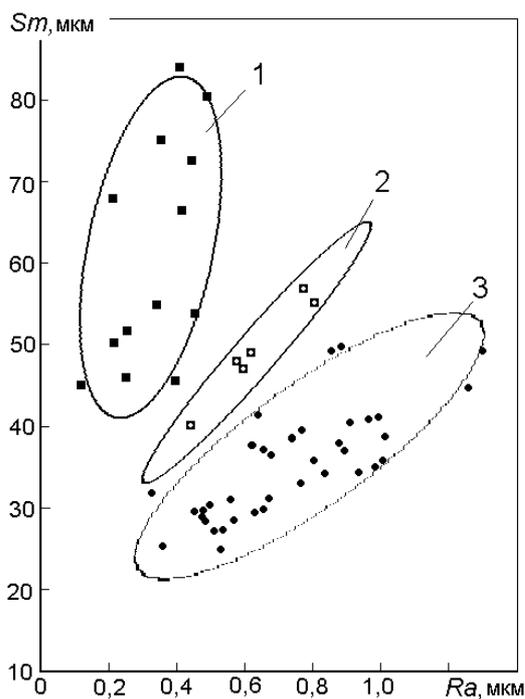


Рис. 9.7. Пример корреляционной связи между параметрами шероховатости Ra и Sm , применительно к особенностям формирования микронеровностей обработанной поверхности: 1 – область формирования поверхности с четко выраженными «карманами» (рис. 9.6), 2 – промежуточная область формирования поверхности с нечетко выраженными «карманами», характерная для повышенных производительностей шлифования с прижогами на обработанной поверхности, 3 – область формирования типичной поверхности (рис. 9.4) [521]

как раз и является наиболее характерным. Более отчетливо это наблюдается на больших зернистостях – 400/315 (рис. 9.6). Кроме того, характерным является также то, что профили микронеровностей обработанной такими

кругами поверхности имеют аномально высокие шаги микронеровностей (рис. 9.7), что как раз и подтверждает изложенную выше гипотезу по механизму изнашивания абразивных зерен в таких кругах.

Таким образом, одновременное использование в кругах зерен компактов и алмазных зерен ситуацию не улучшает как с точки зрения износостойкости кругов так и качества обработанной поверхности, поскольку невозможным является достичь условий производительной безприжоговой обработки быстрорежущей стали. Вместе с тем, выявлено, что именно при такой смеси в кругах и возможно достичь снижения шероховатости обработанной поверхности и специфического профиля микронеровностей, когда образуются так называемые «масляные карманы» [521].

Наличие пленок на обработанной поверхности влияет на шероховатость обработанной поверхности. В работе [62] это рассмотрено для условий электрохимического шлифования (ЭХШ) кругами из КНБ, когда на этой поверхности возникают анодные пленки. Обращено внимание на то, что при этом на обработанной поверхности наблюдаются два типа пленок, условно названных как «тонкие» и «толстые». Изменение напряжения технологического тока в диапазоне от 4 до 10 В несущественно влияет на шерохова-

тость, однако, имеется определенная особенность, связанная с наличием

плоскости на круге, параллельной обрабатываемой поверхности. При ее отсутствии формируются анодные пленки с условным названием – «тонкие». Наличие их на поверхности практически не изменяет параметр Ra в сравнении со шлифованием без тока. Если же такая плоскость существует на круге, то на поверхности формируются пленки условно названные «толстыми». Динамика такого перехода одних пленок в другие от количества снятого материала представлена в табл. 9.6 на примере шлифования быстрорежущей стали Р6М5 кругом 12А2-45° 150×10×3×32–КР 100/80–МО20-2–100 с производительностью 1000 мм³/мин многопроходным и глубинным способами. Круг предварительно правился таким образом, чтобы он имел исходную поверхность без какой-либо формы профиля, т.е. параллельную обрабатываемой. Далее в процессе съема обрабатываемого материала он приобретал треугольную форму с отсутствием плоскости, параллельной обрабатываемой, что и отражалось на изменении величины такого параметра, как Ra . Как только режущая поверхность круга приобретала треугольную форму профиля в радиальном направлении (для многопроходного шлифования это происходило в диапазоне от 100 до 200 г снятого материала, а для глубинного шлифования в диапазоне от 400 до 450 г снятого материала, что подтверждается и величиной относительного расхода КНБ: для глубинного шлифования они равнялись 0,56 мг/г, а для многопроходного – 1,27 мг/г), то шероховатость обработанной поверхности снижалась, поскольку «толстая» пленка уже на ней не образовывалась, а тут существует уже «тонкая» пленка.

Таблица 9.6. Динамика изменения параметру шероховатости Ra поверхности стали Р6М5 от количества сошлифованного материала при разных способах электрохимического шлифования ($U = 8$ В)

Шероховатость поверхности по параметру Ra при съеме стали, г										
35	75	100	200	300	400	450	500	600	700	800
Многопроходное шлифование										
0,37	–	0,45	0,25	0,26	–	0,32	0,29	0,29	0,29	–
Глубинное шлифование										
0,84	0,73	0,79	0,81	0,67	0,56	0,24	0,25	–	0,25	0,26

Примечание: темным цветом выделена область существования «толстых» пленок, серым цветом выделена область «тонких» пленок.

Следствием наличия такой разницы является то, что, как установлено исследованиями [62] (рис. 9.8) при ЭХШ «толстая» пленка своим наличием снижает наполненность профиля в диапазоне от 0...60 % R_{max} и приводит к возрастанию параметров Ra и R_{max} . Характерно то, что у «толстых» пленок отношение высоты максимального выступания неровностей

к глубине наибольшей впадины больше единицы, а у «тонких» пленок – меньше.

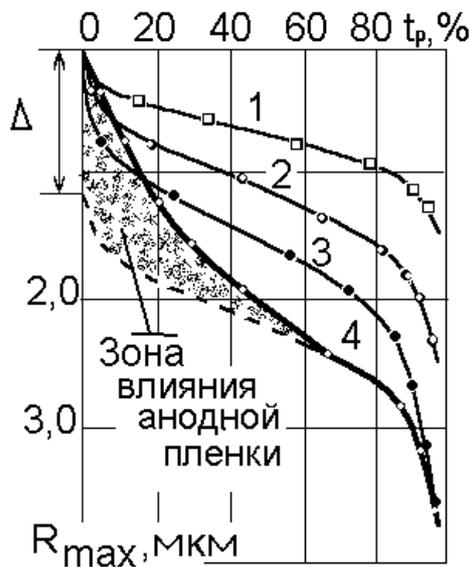


Рис. 9.8. Кривые опорных поверхностей после шлифования стали Р6М5 кругами из КНБ разными методами: 1 – ЭХШ трехслойным кругом; 2 – ЭХШ с «тонкой» анодной пленкой; 3 – электроэрозионным; 4 – ЭХШ с «толстой» анодной пленкой на обработанной поверхности (закрашена – область влияния анодной пленки на шероховатость, Δ – величина этого влияния) [62]

критериями при этом являются: по толщине – $\Delta R_{\max} = R^{\text{П}}_{\max} - R^{\text{Ч}}_{\max}$, где ΔR_{\max} – толщина анодной оксидной пленки, мкм; $R^{\text{П}}_{\max}$ – максимальная величина выступов при наличии пленки, мкм; $R^{\text{Ч}}_{\max}$ – максимальная величина выступов без пленки, мкм; по плотности: для «толстых» $H_{\max}/H_{\min} > 1$, для «тонких» $H_{\max}/H_{\min} < 1$, де H_{\max} – высота максимального выступа неровностей, мкм; H_{\min} – глубина наибольшей впадины неровностей, мкм. Укажем, что толщина «толстых» анодных пленок колеблется от 1,5 до 0,5 мкм [117], как на быстрорежущих сталях, так и на твердых сплавах.

Обратим внимание на то, что такое формирование электродных пленок может сказываться на качестве обработанной поверхности. Укажем, что под качеством обработанной поверхности понимается устойчивая си-

Как видно из рис. 9.8 сравнение кривых 2 и 4, когда соответственно на обработанной поверхности наблюдаются «тонкая» и «толстая» пленки, показывает, что параллельное смещение кривой 2 и совмещение ее с кривой 4 позволяет выделить область влияния анодной пленки на шероховатость (закрашенная зона на рис. 9.8). При этом видно, что, как следствие, параметр R_{\max} при наличии пленки формируется завышенным. Изложенное свидетельствует о том, что пленка распределена по поверхности несколько неравномерно: более густая на выступах и менее во впадинах неровностей. А толщина «толстых» анодных пленок как раз и составляет величину Δ на рис. 9.8. Приведенное выше дает возможность разработать методику установления толщины анодных оксидных пленок и их плотности. Для этого получают кривые опорных поверхностей с разными пленками, устанавливается зона влияния анодных пленок и определяется их толщина, исходя из ΔR_{\max} . Одновременно устанавливается отношение высоты максимального выступа неровностей к глубине наибольшей впадины. Основными

стема свойств поверхностного слоя, обеспечивающих его эксплуатацию в определенных целях [522]. Характеристики свойств поверхностного слоя образцов из быстрорежущей стали оценивали по структурным изменениям, шероховатости обработанной поверхности и микротвердости режущего лезвия.

В работе [522] определяли влияние на указанные показатели качества режимов шлифования и характеристик кругов из КНБ. Исследования проводили при глубинном электрохимическом шлифовании торцом круга образцов из быстрорежущей стали Р6М5 ($HRC\ 62-64$). Использовали круги формы 12А2-45° 150×10×3×32 КРС 100/80–МО20–100. Микротвердость режущего лезвия (угол заострения 70°) измеряли на приборе ПМТ-3 по методике [523]. Для изучения структурных изменений проводили рентгенографические исследования по определению интегральной ширины рентгеновских линий и содержанию остаточного аустенита на дифрактометре УРС50ИМ в железном излучении. При изготовлении микрошлифов краевые зоны предохраняли от заваливания. Результаты исследования исходной структуры образцов из стали Р6М5 показали отсутствие остаточного аустенита в ней, а ширина рентгеновской линии (110) α -Fe составляла 46,4 мм.

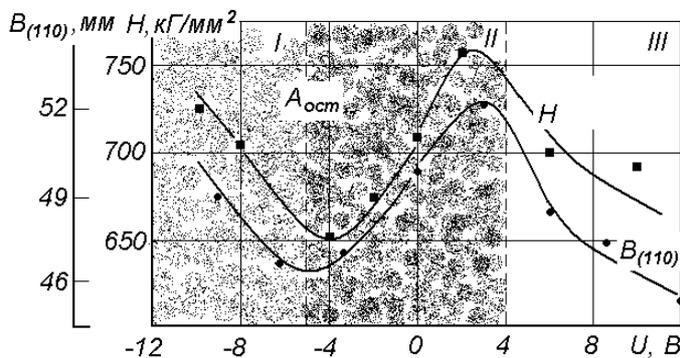


Рис. 9.9. Влияние напряжения технологического тока U на микротвердость режущего лезвия и интегральную ширину рентгеновской линии (110) α -Fe ($B_{(110)}$). Заштрихованная зона – наличие остаточного аустенита ($A_{ост}$). Режимы обработки: $v_{кр}=30$ м/с, $S_{пр}=0,3$ м/мин, $S_{поп}=0,5$ мм/дв.ход.

В связи с тем, что обработку проводили с наложением электрической энергии, определенный интерес вызывает возможность управления качеством обработанной поверхности с ее помощью. Был [522] выбран диапазон исследований при изменении напряжения технологического тока от 0 до 12 В (при прямой полярности) и от 0 до –12 В (при обратной полярности). Оказалось, что изменение микротвердости режущего лезвия в этом диапазоне носит синусоидальный характер

(рис. 9.9), причем можно выделить три зоны: от –12 до –4 В (зона I), от –4 до +4 В (зона II) и от +4 до +12 В (зона III). Результаты рентгеноструктурных исследований показывают, что для зоны I характерно наличие в структуре поверхностного слоя стали остаточного аустенита, причем его количество одинаково для всех значений напряжения. В зоне II в структуре поверхностного слоя также имеется остаточный аустенит, увеличиваю-

щийся при изменении напряжения технологического тока от +4 до -4 В. Для зоны III характерно отсутствие остаточного аустенита. При этом изменение интегральной ширины рентгеновской линии (110) α -Fe во всем диапазоне напряжений носит также синусоидальный характер. Следовательно, предпочтительным для применения является диапазон изменения напряжения технологического тока от 4 до 12 В (зона III). В этом случае при шлифовании образуется слегка наклепанный поверхностный слой с исходной структурой. Вызывает интерес состояние поверхностного слоя стали при напряжении в 3 В. Микротвердость в данном случае выше, что подтверждается наибольшей интегральной шириной рентгеновской линии (110) α -Fe. Однако наличие некоторого количества остаточного аустенита показывает, что при обработке образуется поверхностный слой со следами вторичной закалки, что снижает стойкость инструмента.

Известно [34], что при глубинной обработке температура достигает максимума в конце затачиваемой поверхности, где наблюдается ее повышение на 30–40 %. Это объясняется тем, что в направлении движения источника тепла вблизи границы детали, которая играет роль адиабатической преграды, происходит накопление большого количества тепла [34]. При многопроходном же шлифовании скорость источника тепла высока и тепло вблизи границы обрабатываемого изделия почти отсутствует. Поэтому можно предположить, что и микротвердость вдоль режущего лезвия инструмента при глубинном шлифовании также будет повышаться на выходе круга из контакта с обрабатываемой поверхностью. Такая закономерность выявлена при глубинном шлифовании с прямой и обратной полярностью и с выхаживанием (рис. 9.10). Повышение твердости происходит

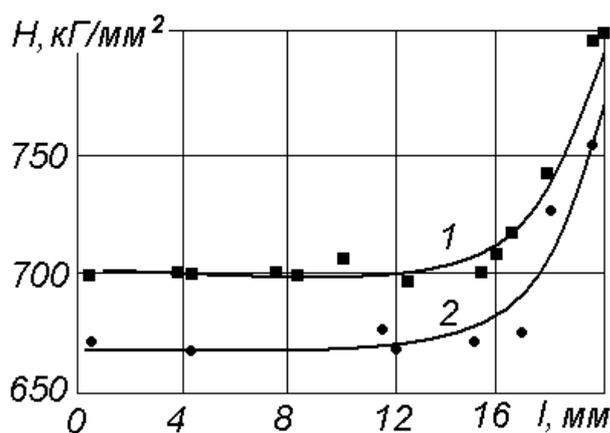


Рис. 9.10. Изменение микротвердости H вдоль режущего лезвия l при глубинном электрохимическом шлифовании образцов:

- 1 – $U=-12$ В, $S_{пр}=0,15$ м/мин, HRC 65,
2 – $U=6$ В, $S_{пр}=0,30$ м/мин, HRC 64

в среднем на 15–20 %, а при выхаживании без технологического тока на 10–12 %. Установлено, что с ростом продольной подачи ширина измененной зоны уменьшается. Повышение микротвердости объясняется наличием в поверхностном слое измененной зоны вторичной закалки вследствие накопления тепла и быстрого охлаждения [522].

В заключение данной подглавы обратим внимание еще на некоторые характеристики обработанной поверхности примени-

тельно к режущему инструменту, связанные с шероховатостью, например, радиус округления режущей кромки инструмента и ее зазубренность. В принципе они должны примерно соответствовать параметру R_{\max} , или быть чуть выше. Так, радиус округления режущей кромки для резцов из быстрорежущей стали после шлифования кругами из кубонита на металлической связке М1-04 составляет от 8 до 18 мкм [524]. В тоже время после алмазной обработки твердосплавного инструмента радиус округления составляет от 5 до 10 мкм, а после обработки дробью – от 30 до 50 мкм [525]. Зазубренность режущей кромки составляет от 10 до 18 мкм при шлифовании быстрорежущей стали кругами из кубонита на металлической связке М1-04 [524].

Кроме того, важно обратить внимание и на влияние свойств обрабатываемых материалов на шероховатость обработанной поверхности. Так в работе [117] это показано для твердых сплавов, где установлено, что шероховатость шлифованной поверхности твердых сплавов имеет определенную корреляционную связь с их физическими свойствами. Так, с возрастанием плотности и коэрцитивной силы твердых сплавов шероховатость увеличивается:

$$Ra = 1/(2,204+5,87 \cdot 10^5 e^{-\rho}), \quad Ra = 0,208+1,068 \cdot 10^{-2} K_c.$$

С повышением твердости, прочности при изгибе и величины зерен карбидной фазы шероховатость снижается:

$$Ra = 3,72-3,74 \cdot 10^{-2} H_{\text{ТС}}, \quad Ra = 0,4004-1,96 \cdot 10^{-5} R_{bm}, \quad Ra = 0,555-0,146 \cdot Z_{\text{ТС}}.$$

Приведенные зависимости позволяют в целом прогнозировать направление изменения показателя шероховатости шлифуемой поверхности, особенно в тех случаях, когда обрабатывается широкая номенклатура сплавов в условиях мелкосерийного производства [117].

9.3. Шероховатость поверхности монокристаллов с учетом их кристаллографической ориентации

Как уже было указано выше, наиболее распространенным и употребляемым в научной и технической литературе показателем шероховатости поверхности является показатель Ra . Между тем, опыт промышленной эксплуатации изделий свидетельствует о том, что для различных условий их использования необходимо контролировать не один, а несколько параметров. В данном сообщении остановимся на связи между двумя основными высотными параметрами Ra и R_{\max} . Показано [526], что эта связь сводится к ряду следующих простых соотношений. Например, для спеченной и необработанной поверхности она близка к виду $R_{\max} \approx 4 Ra$. При лез-

вийной обработке зависимость больше отвечает виду $R_{\max} \approx 6Ra$. Для абразивной обработки кругами из СТМ наиболее характерной будет зависимость близкая к виду $R_{\max} \approx 8Ra$. Для чисто абразивной обработки, например кругами из электрокорунда – $R_{\max} \approx (6-8)Ra$. Причем большие значения будут характерными для чистовых методов абразивной обработки, что и подтверждают данные [527] для тонкого шлифования оптических деталей из стекла. А вот при доводке керамики и покрытий зависимость $R_{\max} = f(Ra)$ близка к виду $R_{\max} \approx 10Ra$. В последнем случае свой вклад в повышение значения R_{\max} вносит пористость таких материалов, поскольку при доводке она уже играет значительную роль.

Приведенное выше, позволило автору работы [526] сформулировать следующее положение: чем более грубой является поверхность, тем она имеет меньше соотношение между R_{\max} и Ra , а чем более совершенна поверхность, полученная доводкой, полированием или другими финишными методами, тем это соотношение больше. Например, спеченная поверхность и поверхность после абразивной обработки обычными абразивами имеет соотношения в диапазоне $R_{\max} \approx (4-6)Ra$. Обработка шлифовальными кругами из СТМ, когда поверхность имеет меньшую шероховатость, чем после указанных выше методов, и при тонком шлифовании преимущественно характеризуется соотношением $R_{\max} \approx 8Ra$. То есть, чем больше затрат идет у нас на процесс получения поверхности изделия, тем больше величина соотношения возрастает: с 4-х до 8-ми. Между тем, ряд дальнейших исследований показал, что такой вывод является неполным, поскольку отражает только первую часть указанной тенденции. Оказывается, что если нам необходимо получить более совершенную поверхность после шлифования дополнительно еще полированием, с доведением величин шероховатости до 5–10 нм, а тем самым затраты на процесс получения поверхности возрастают, то величина соотношения $R_{\max} = f(Ra)$ начинает снижаться и достигается ситуация, когда указанная выше зависимость становится близкой к виду $R_{\max} \approx 4Ra$.

Продемонстрируем указанное выше на примере формирования обработанной шлифованием и полированием поверхности монокристалла тетрабората лития, нового перспективного материала для функциональной электроники, обработка которого является исключительно затратной, поскольку требует получения конечной шероховатости по параметру Ra в пределах 1 нм. После разрезания монокристалла, его шлифование проводится свободным абразивом с понижением зернистости абразива и логично было бы предположить, что отношение R_{\max}/Ra , исходя из изложенного выше, будет в пределах 6 (реально от 5,25 до 6,25). Дальнейшее полирование монокристаллов тетрабората лития проводили на смоляных полировальниках с использованием двух алмазных микропорошков АСМ зерни-

стостью от 2/1 до 1/0 и оксида хрома. Это увеличивает затратность процесса, но позволяет значительно снизить показатели шероховатости обрабатываемой поверхности монокристаллов. Так, например, шероховатость полированных поверхностей монокристаллов после обработки с использованием микропорошка АСМ 1/0 соответствует Ra в пределах от 3,5 нм до 6,5 нм. Последующее использование оксида хрома при полировании позволяет снизить показатели шероховатости до требуемых величин. Анализ полированной поверхности методом атомно-силовой микроскопии показал, что у монокристалла тетрабората лития по плоскости (100) микрорельеф имеет показатели R_{max} , Rz и Ra составляют 5,26 нм, 4,82 нм и 1,24 нм соответственно, а соотношение R_{max}/Ra составляет 4,25. Представленное выше, как раз и говорит о том, что чем более затратным является процесс получения высококачественной поверхности, тем соотношение R_{max}/Ra снижается до величины 4.

В целом, мы имеем своеобразную «дугу шероховатости» по соотношению R_{max}/Ra , когда вначале для обычной грубой исходной поверхности оно близко к 4, далее абразивная и алмазная обработка этой поверхности поднимают это соотношение в 6 и потом к 8, а вот дальнейшие методы абразивной доводки и полирования снижают соотношение уже к 6 и далее химико-механическое полирование на высококачественной поверхности возвращает это соотношение к величинам близким к 4. Это означает, что если вначале затраты на шлифовку исходной поверхности отражаются на увеличении соотношения, то дальнейшие затраты на доводочные и полировальные работы снижают величину соотношения к исходному – 4.

Более детально это рассмотрено в работе [528] для условий получения кислородсодержащих монокристаллов парателлуриата и тетрабората лития, полученных методом вытягивания из расплава, их ориентации и условий их механической обработки на характеристики микрорельефа поверхностей. Укажем, что среди большого количества эффективных материалов, синтезированных и исследованных последнее время широко известными являются оксидные соединения, в основном в виде монокристаллов, таких как парателлурит (TeO_2), классический акустооптический материал, на основе которого разработан ряд акустооптических приборов и приспособлений и тетраборат лития ($Li_2B_4O_7$) – новый монокристалл с большой пьезоэлектрической константой и перспективой применения в приспособлениях с поверхностными акустическими волнами, оптических квантовых генераторах, термостабильных приборах, тензодатчиках, в виде легированной прессованной керамики для термолюминесцентной дозиметрии нейтронного та γ -излучения.

Исследования микрорельефа поверхности монокристаллов и его показателей было проведено методом атомно-силовой микроскопии (AFM), при этом использовали серийный атомно-силовой микроскоп *Nano Scope*

Ша Dimension 3000 фирмы *Digital Instruments* и рабочую станцию для обработки результатов измерений. В данном случае ограничивались только некоторыми характеристиками основных метрических параметров для анализа АТСМ-изображений при топографировании, при этом учитывали только амплитудные параметры, характеризующие средние статистические параметры всей поверхности. Разделяющая способность при этом находилась в пределах 0,1 нм. При определении влияния условий механической обработки применительно к условиям шлифования шероховатость обработанных поверхностей измерялась на профилометре модели *Talysurf 5M-120* (Великобритания) с точностью измерений $\pm 0,01$ мкм [528].

Процесс механической обработки монокристаллов включал три стадии – разрезание, шлифование и полирование. Снижение шероховатости обрабатываемой поверхности осуществлялось последовательным снижением зернистости порошков. Для изготовления оптических изделий из указанных выше монокристаллов использовались абразивные микропорошки из электрокорунда зернистостью М63, М40, М28, М10, М7, а на последней стадии предварительного процесса механической обработки (шлифования), а именно доводки, использовали алмазные микропорошки АСМ 5/3. Поскольку важность влияния предварительной стадии (шлифования) на показатели конечной стадии обработки (полирования) достаточно значительна, то на первом этапе были проведены исследования по определению влияния условий обработки на формирование показателей микрорельефа обработанных поверхностей, в т.ч. для разных кристаллографических плоскостей [528].

Таблица 9.7. Значения шероховатости поверхностей монокристаллов парателлурита по разным кристаллографическим плоскостям после шлифования разными абразивами в течение 5 мин

Кристаллографическая плоскость	Показатели шероховатости		
	Ra , мкм	R_{max} , мкм	R_{max} / Ra
Шлифование абразивом М63			
(001)	0,75	3,86	5,15
(110)	1,09	5,96	5,47
(100)	2,05	11,07	5,40
Шлифование абразивом М28			
(001)	0,67	3,98	5,94
(110)	1,04	5,66	5,44
(100)	0,64	4,71	7,36
Доводка алмазным микропорошком АСМ 5/3			
(001)	0,13	0,81	6,23
(110)	0,04	0,34	8,50
(100)	0,10	0,43	4,30

Таблица 9.8. Значения шероховатости поверхностей монокристаллов тетрабората лития по разным кристаллографическим плоскостям после шлифования разными абразивами в течение 5 мин

Кристалло- графическая плоскость	Показатели шероховатости		
	Ra , мкм	R_{max} , мкм	R_{max} / Ra
Шлифование абразивом М63			
(001)	2,05	11,72	5,72
(100)	1,24	7,75	6,25
Шлифование абразивом М28			
(001)	0,87	4,75	5,46
(100)	0,19	1,10	5,79
Доводка алмазным микропорошком АСМ 5/3			
(001)	0,08	0,46	5,75
(100)	0,04	0,21	5,25

Результаты исследований шероховатости при разных условиях шлифования монокристаллов по разным кристаллографическим плоскостям, контролировались с помощью профилометра *Talysurf 5M-120* и приведены в табл. 9.7 и 9.8, из которых видно, что значения шероховатости при одинаковой продолжительности обработки на разных кристаллографических плоскостях различны. Установлено, что наиболее качественные и количественные показатели шероховатости поверхности и ее микрорельефа в одинаковых условиях обработки монокристаллов являются характерными для кристаллографической плоскости (100), а наихудшими являются показатели для плоскости (001). Вероятно, это вызвано анизотропией механических свойств материала. В работе [528] обращено внимание на определенную количественную разницу в показателях шероховатости для разных кристаллографических осей исследованных монокристаллов и показано, что с изменением условий обработки и кристаллографической плоскости соотношение R_{max}/Ra в целом остается относительно одинаковым (в пределах 5,4–6,0). При этом, для тетрабората лития колебание величины отношения R_{max}/Ra является меньшим, чем для парателлуриата, где наблюдается определенное повышение данного отношения со снижением зернистости шлифпорошков. Обратим внимание, что для кристаллографической плоскости (110) (табл. 9.7) получены несколько разноречивые результаты. Так, для условий обработки шлифпорошками установлены повышенные значения показателя Ra , а для процесса доводки получены как раз меньшие значения показателя Ra .

Полирование монокристаллов парателлуриата и тетрабората лития проводилось на смоляных полировальниках на станках модели В1МЗ с использованием двух полирующих микропорошков: алмазных микропорош-

ков АСМ зернистостью от 2/1 до 1/0 и оксида хрома. Это позволяет значительно снизить показатели шероховатости обрабатываемой поверхности монокристаллов. Так, например, шероховатость полированных поверхностей для монокристаллов парателлурита после обработки с использованием микропорошка АСМ 1/0 соответствует Ra в пределах от 3,5 нм до 6,5 нм. Дальнейшее использование оксида хрома при полировании позволяет и далее снизить показатели шероховатости.

На втором этапе работы были изучены условия формирования топографии и микрорельефа обработанных поверхностей монокристаллов при полировании в зависимости от направления кристаллографических плоскостей. Для проведения исследований по атомно-силовой микроскопии из монокристалла парателлурита диаметром поперечника 30 мм и длиной 80 мм из участка, а этот участок на монокристаллах является наиболее качественным, размещенным на 1/3 длины от точки затравливания, вырезали элемент в виде прямоугольного параллелепипеда, грани которого соответствуют кристаллографическим плоскостям (110), (100) и (001). Размеры граней параллелепипеда составляли 15×10, 15×10 и 10×10 мм соответственно. Отклонение каждой из граней от заданной ориентации не превышало 20'. Исследуемые поверхности готовили предварительно шлифованием с помощью абразивной суспензии и полированием алмазной пастой АСМ 1/0 на мягкой основе с использованием «паразитных» элементов из монокристалла парателлурита, которые вместе с исследуемым элементом блокировали на одной металлической основе впритык, что и дало возможность получить поверхности с минимальной кривизной. На рис. 9.11 показан микрорельеф фрагмента участка поверхности грани, ориентированной параллельно плоскости (110), на которой в дальнейшем установлены амплитудные параметры, характеризующие средние статистические характеристики всей поверхности и по полученному спектру определили размеры величин R_{max} , Rz и Ra , которые составили 6,42 нм, 6,33 нм и 1,38 нм соответственно.

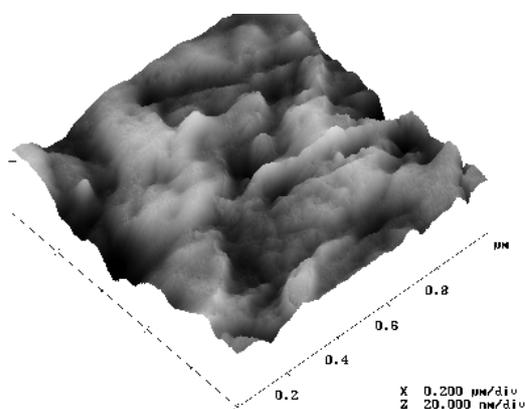


Рис. 9.11. Микрорельеф участка поверхности, ориентированной вдоль плоскости (110)

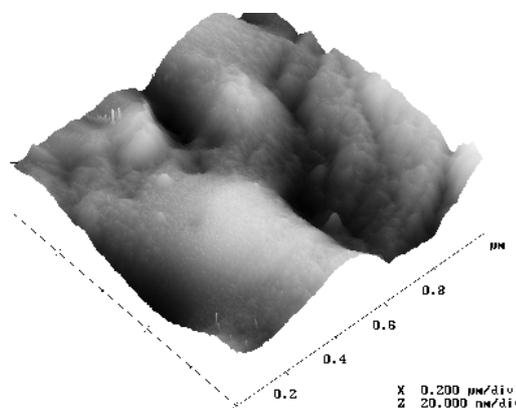


Рис. 9.12. Микрорельеф участка поверхности, ориентированной вдоль плоскости (001)

Микрорельеф участка поверхности грани, ориентированной параллельно плоскости (001) показан на рис. 9.12. Из полученных спектров для этого случая определили R_{max} , R_z и R_a , имеющие значения 23,47 нм, 10,06 нм и 3,48 нм соответственно.

На рис. 9.13 представлен микрорельеф участка на поверхности, сориентированной параллельно плоскости (100). В этом случае для R_{max} получено значение 13,65 нм, для R_z – 9,33 нм, а $R_a = 2,35$ нм.

Несмотря на то, что исследуемые поверхности обработаны в идентичных условиях, наблюдаются разные значения шероховатости, что обусловлено анизотропией механических свойств монокристалла парателлуриата. Про это говорят также и спектры сечения микрорельефа участка поверхности монокристаллов вдоль плоскостей (110) (рис. 9.14) та (001) (рис. 9.15). Наблюдается лучшая равномерность микрорельефа поверхности в первом случае, что и подтверждается снижением величины отношения R_{max}/R_a от 6,74 на плоскости (001) до 4,65 на плоскости (110). Тем самым установлено, что меньшие показатели шероховатости наблюдаются при обработке граней монокристаллов, ориентированных параллельно кристаллографической плоскости (110), а наибольшие – (001), и это необходимо учитывать при изготовлении рабочих элементов изделий [528].

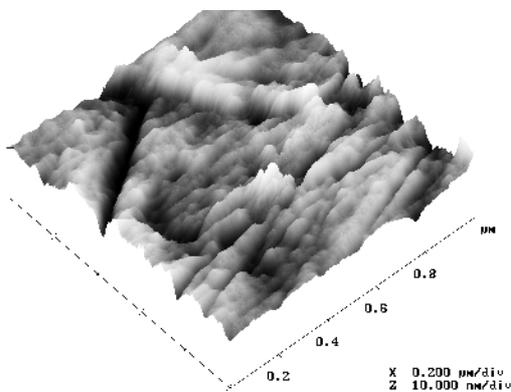


Рис. 9.13. Микрорельеф участка поверхности, ориентированной вдоль плоскости (100)

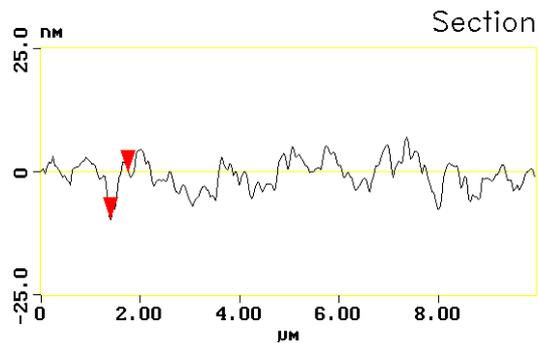


Рис. 9.14. Спектр сечения микрорельефа участка поверхности монокристалла парателлуриата при ориентировании вдоль плоскости (110)

Одним из важных факторов обеспечения качества поверхностей монокристаллов являются условия их выращивания, что и рассмотрено [528] на примере монокристалла тетрабората лития. Один из исследованных образцов (№ 1) изготовили из монокристалла полученного при скорости вытягивания 3 мм в сутки, а другой (№ 2) из монокристалла, полученного при скорости вытягивания 6 мм/сутки с размерами, близкими к первому. Понижение нижней границы скорости вытягивания (менее за 3 мм в сутки) в целом не рационально в связи с большими энерго- и трудозатратами. По-

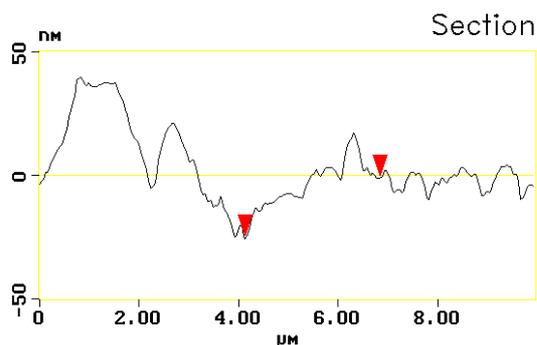


Рис. 9.15. Спектр сечения микро- рельефа участка поверхности монокристалла парателлуриата при орден- тировании вдоль плоскости (001)

вышение скорости роста кристалла (за 6 мм/сутки) приводит к повышению напряжений в кристалле, что напрямую связано с обработкой в связи с увеличением количества кристаллов растрескивающихся еще при разрезании. Напряжения в кристалле увеличивают время на снятие внешнего дефектного слоя, а также, вследствие углубления дефектов, увеличивают вероятность трещин и сколов на поверхностях при полировании и ухудшают объемные свойства (физико-химические) самого монокристалла.

Для исследования микро рельефа полированной поверхности из монокристаллов тетрабората лития диаметром поперечного сечения 18 мм и длиной 20 мм изготовили два параллелепипеда размерами 4×4×8 мм, большая грань которых ориентирована параллельно кристаллографической плоскости (100), выбор которой определялся исследованиями изложенными для условий шлифования монокристаллов тетрабората лития. Исследованные поверхности получали в конечном итоге по полной программе полирования алмазной пастой АСМ 1/0 и с помощью абразивной суспензии оксида хрома и полированием на мягкой основе с использованием «паразитных» элементов из монокристаллов тетрабората лития, которые вместе с исследованным элементом блокировали на одной металлической основе впритык, что дало возможность получить исследуемые поверхности с минимальной кривизной [528]. Анализ полированной поверхности обоих монокристаллов методом АТСМ показал, что в монокристалле, полученном с меньшей скоростью вытягивания, по плоскости (100) микро рельеф полированной поверхности является более равномерным (рис. 9.16), чем у монокристалла, полученного с большой скоростью вытягивания (рис. 9.17). Это подтверждают спектры микро рельефа, представленные на рис. 9.18 та 9.19 Величины показателей R_{max} , R_z и R_a образца № 1 составляют 5,26 нм, 4,82 нм и 1,24 нм соответственно, а образца № 2 становятся – 10,35 нм, 8,04 нм и 1,85 нм соответственно. Видно, что в первом случае значения показателей шероховатости почти в два раза меньше, а также показатель соотношения R_{max}/R_a , который в первом случае является меньшим и составляет 4,25, а в другом, возрастает к величине в 5,5. Учитывая то, что исследованные поверхности обоих образцов обрабатывали идентично, а параметры роста кристаллов разные, возможно утверждать, что именно на монокристаллах тетрабората лития полученных

методом вытягивания из расплава со скоростью около 3 мм/сутки получается более качественная поверхность после полирования.

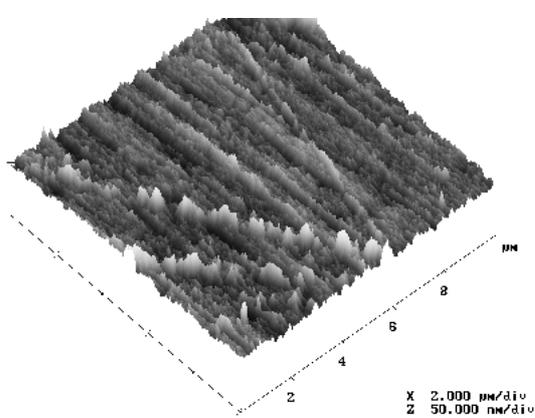


Рис. 9.16. Микрорельеф участка поверхности 10×10 μм монокристалла № 1

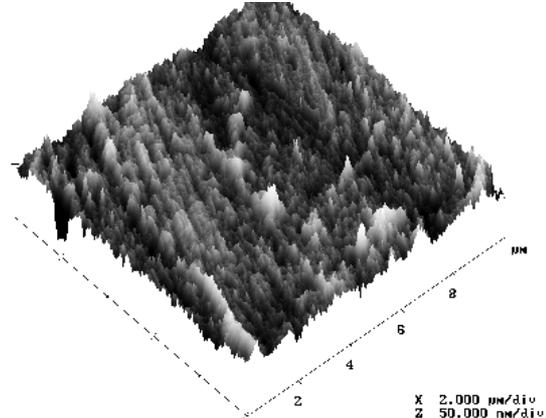


Рис. 9.17. Микрорельеф участка поверхности 10×10 μм монокристалла № 2

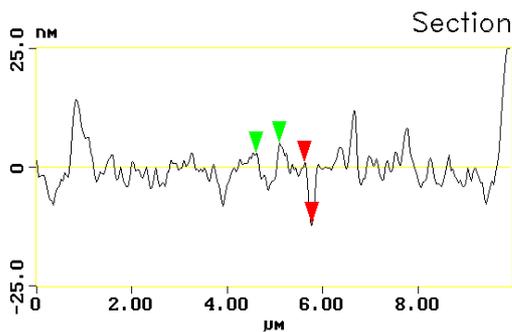


Рис. 9.18. Спектр сечения микрорельефа участка поверхности монокристалла № 1

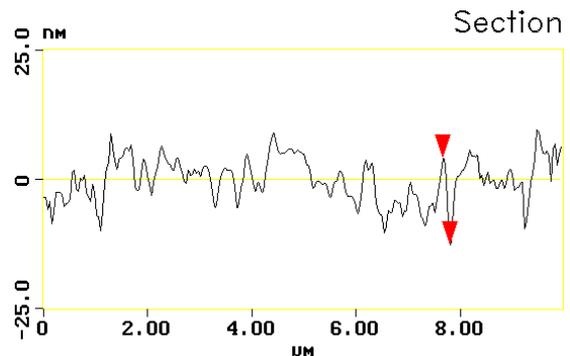


Рис. 9.19. Спектр сечения микрорельефа участка поверхности монокристалла № 2

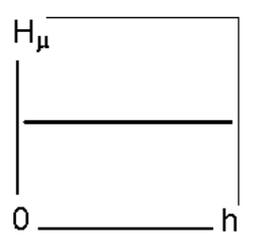
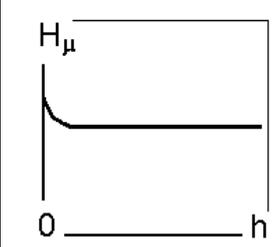
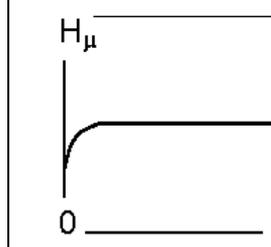
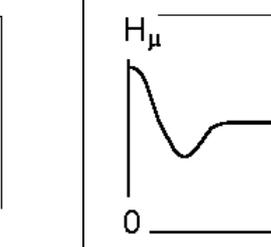
Таким образом, в результате исследования изменения показателей шероховатости обработанной поверхности монокристаллов парателлурита и тетрабората лития в процессе их предварительной обработки (шлифования) показано, что шероховатость при одинаковой продолжительности обработки на разных кристаллографических плоскостях является разной. Установлено [528], что наиболее качественные показатели шероховатости поверхности и ее микрорельефа в одинаковых условиях обработки монокристаллов являются характерными и для кристаллографической плоскости (100), а наихудшими являются показатели для плоскости (001). Аналогичное влияние анизотропии механических свойств как монокристаллов TeO_2 так и $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ на шероховатость поверхностей показан и на примере окончательной обработки (полирования). Выявлено, что у монокристалла,

полученного с меньшей скоростью вытягивания в пределах 3 мм/сутки, вдоль плоскости (100) микрорельеф более равномерен, чем у монокристалла, полученного с большей скоростью вытягивания (6 мм/сутки). Это необходимо учитывать при требованиях получения более качественной поверхности по показателям шероховатости после полирования.

9.4. Структурные изменения и напряжения в поверхностном слое обрабатываемых материалов

Укажем, что структурные изменения в поверхностном слое изделий из закаленной стали при их механической обработке определяются как видом механической обработки, так и типом инструментального материала. В работе [529] для закаленной до 54–56 HRC стали ХВСГ показано, что содержание остаточного аустенита по глубине существенно зависит от вида обработки и инструментального материала. Если для абразивной обработки его количество на глубине 10 мкм составляет 24 %, а на глубине 160 мкм – 30 %, то после шлифования гексанитовым кругом 3 2% и 30 % соответственно. При лезвийной обработке резцом из гексанита-Р количество остаточного аустенита зависит от скорости резания, причем при $v = 20$ м/мин его содержание составляет 23 %, а при $v = 80$ м/мин и более он равен 30 %. Процесс абразивной обработки характеризуется возникновением напряжений растяжения I рода в α -фазе структуры скоростного отпуска на глубину до 120 мкм от поверхности при максимальных значениях на глубине 20–30 мкм, а в γ -фазе имеют место напряжения сжатия на глубину 50 мкм. При шлифовании гексанитовым кругом в α -фазе напряжения сжатия снижаются до нуля на глубине 30 мкм, а в γ -фазе к минимальным значениям (620 МПа) на глубине 40 мкм. Обработка резанием оказывает влияние на возникновение зоны напряжений сжатия на поверхности образцов. Таким образом, повышение теплопроводности инструментального материала минимизирует величину структурных изменений, и, при этом, отмечено [529], что обработка гексанитовым кругом (ГА 125/100–БСТ–100) оказывает влияние на возникновение исключительно напряжений сжатия в α - и γ -фазах, а абразивная (63С6СМ1К) – возникновение напряжений растяжения I рода в α -фазе структуры скоростного отпуска.

Учитывая указанные изменения логично предположить, что имеется и определенная связь микротвердости и микроструктуры в поверхностном слое. Так, для быстрорежущих сталей после шлифования, она такая [520]:

1	2	3	4
			
Исходная микроструктура	Наклеп	Прижег отпуска	Прижег вторичной закалка
	Микроструктура поверхностного слоя мелкодисперсная в виде дробленных кристаллов	Отпущенный поверхностный слой. Трооститно-сорбитный слой вторичного отпуска с крупными блоками кристаллов хорошего травления	Поверхностный слой – аустенитно-мартенситная структура

Возникновение напряжений в поверхностном слое покажем на примере возникновения напряжений в слоистой керамике от температурного воздействия при шлифовании. Показано [117], что кроме чисто силового воздействия режущей поверхности алмазного круга на поверхность керамического изделия, важным фактором, определяющим качество обрабатываемой поверхности пластин, является тепловое воздействие на керамику в процессе шлифования, которое может быть достаточно существенным, а это особенно опасно для керамик с точки зрения возникновения трещин и сколов на кромках пластин за счет нежелательного распределения поля напряжений в многослойных пластинах. Для того, чтобы этого избежать, необходимо следить за величинами соотношения толщины слоев, что позволит отодвинуть опасные напряжения от края пластин. Соотношения толщины слоев могут быть рассчитаны с учетом распределения температур и напряжений, возникающих при шлифовании таких пластин. Известно [530], что напряжения, возникающие в изделии при обработке, обуславливаются не максимальной температурой, а, в значительной степени, градиентом температур, и ограничениями, в том числе, размерами и способами закрепления, и свойствами материалов. Так, при одной и той же максимальной температуре шлифования в зоне контакта градиент температур в объеме изделия может быть разным из-за неодинаковых условий охлаждения и свойств обрабатываемого материала. В рамках данного исследования изучались поля температур и напряжений в многослойных пластинах с режущим слоем из керамики оксидно-карбидного типа и БВТС (при разном сочетании их толщин), примени-

тельно к алмазному шлифованию их опорных и боковых поверхностей. Каждый слой отдельно рассматривался как однородный и изотропный материал. На первом этапе, определялось температурное поле в изделии. Распределение температуры в двухслойной пластине от движущегося источника тепла рассматривали в рамках линейной стационарной двухмерной модели [368] температурного поля:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),$$

где c – удельная теплоемкость изделия; ρ – плотность; λ_T – коэффициент теплопроводности изделия; T – температура шлифования; t – время шлифования.

Начальные условия и ограничения: $T(x, y, 0) = T_0$;

$$\lambda \frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = \alpha_1 [T(0, y, t) - T_0]; \quad \lambda \frac{\partial T(L, y, t)}{\partial x} = -\alpha_1 [T(L, y, t) - T_0];$$

$$\lambda \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = \alpha_2 [T(x, 0, t) - T_0]; \quad \lambda \frac{\partial T(x, M, t)}{\partial y} = q(x) \text{ при } S_{\text{пр}t} - b \leq x \leq S_{\text{пр}t};$$

$$q(x) = \{0,045 + 0,119 \exp[-4,5 \left(\frac{x+b+S_{\text{под}t}}{b} \right)^2]\} \frac{P_Z v_{KP}}{S_k};$$

$$\lambda \frac{\partial T(x, M, t)}{\partial y} = -\alpha_1 [T(x, M, t) - T_0] \text{ при } S_{\text{пр}t} - b > x > S_{\text{пр}t}.$$

где $T(x, y, t)$ – температурное поле пластины; x, y – координаты; α_1 – коэффициент теплоотдачи на поверхности обработки и боковой; α_2 – то же самое, с тыльной поверхности; T_0 – температура окружающей среды; b – длина теплового источника; S_k – площадь контакта круга с изделием.

При выборе ограничений принималось во внимание следующее. Наиболее сложными условиями обработки пластин характеризуется процесс алмазного шлифования их опорных поверхностей, когда производительность съема материала достигает до 4000 мм³/мин. Температура в зоне шлифования, для изложенных выше условий, в соответствии с [103] принималась равной 670 °С.

На первом этапе исследовалось распределение температур в обрабатываемой слоистой пластине при разном соотношении толщин слоев. Изучались слоистые пластины, которые состояли (рис. 9.20) из:

- полностью оксидно-карбидной керамики;
- 6 мм толщины оксидно-карбидной керамики (рис. 9.20, области II–V) и 2 мм толщины безвольфрамового твердого сплава (область I);

- 2 мм толщины оксидно-карбидной керамики (область V) и 6 мм толщины безвольфрамового твердого сплава (области I–IV).

Ограничения:

- на поверхности тела S_m для любого момента времени распределение температур является таким:

$$T = 670 \text{ }^\circ\text{C} \quad | \quad x = [0, 6], \quad y = 8$$

$$T = 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad | \quad x = 6, \quad y = [2, 6];$$

- на поверхности тела S_q тепловой поток равен 0 при: $x = 0, y = [0, 8]$.

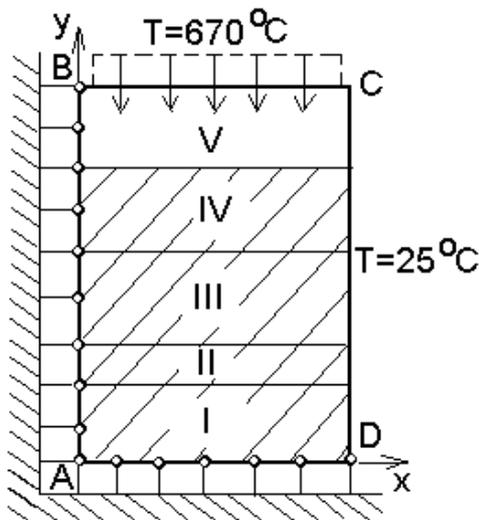


Рис. 9.20. Схема к расчету полей температур и остаточных напряжений при шлифовании многослойных пластин

Схема к расчету температурных полей и остаточных напряжений приведена на рис. 9.20. Использовался универсальный пакет прикладных программ «Термоупругость», основанный на методе конечных элементов. Пластина разбивалась на 456 элементов с количеством узлов 258. Разбивка определенной области на треугольные конечные элементы и подготовка исходной информации происходила автоматически. Ошибка расчетов не превышала 6%. Эта математическая модель позволяла решать нестационарную задачу теплопроводности для движущегося источника тепла и дискретно с заданным временным шагом находить распределение температуры в объеме пластины на протяжении всего процесса ее шлифования. По полу-

ченным значениям температурного поля в фиксированные моменты времени рассчитывались поля напряжений. Расчеты подтвердили, что наиболее оптимальной с точки зрения снижения градиента температур, будет пластина, в которой толщина безвольфрамового твердого сплава составляет 6 мм (области I–IV), а оксидно-карбидной керамики – 2 мм (область V). В целом, показано, что наиболее оптимальной с точки зрения снижения градиента температур, будет пластина, в которой толщина твердого сплава составляет $\frac{3}{4}$ толщины пластины, а оксидно-карбидной керамики – $\frac{1}{4}$. Проведенными расчетами выявлено также, что температурное поле в слоистых пластинах преимущественно формируется в керамике (рис. 9.21), поэтому основным элементом, выдерживающим тепловое нагружение, является керамика. Изменение удельной теплоемкости керамики от 0,42 до 1,26 кДж/(кг·К) несущественно влияет на распределение поля температур в такой керамике.



Рис. 9.21. Распределение поля температур в двухслойной пластине (T в $^{\circ}\text{C}$)

Вторым этапом расчетов [117] была оценка напряженно-деформированного состояния, возникающего от действия градиента температур для умов шарнирного закрепления пластины по двум граням (рис. 9.20). Учитывая конструктивные особенности, способ закрепления и нагружения, а также хрупкий характер разрушения пластин, расчет их напряженно-деформированного состояния сводился к решению краевой плоской задачи теории термоупругости. С этой целью строилась математическая модель процесса деформирования пластины под действием температурного поля. При построении модели считали, что материалы являются упругими, однородными и изотропными. Принимали, что модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν и коэффициент температурного расширения α обрабатываемого материала постоянны и не зависят от температуры. Задачу решали в линейном виде. Для вывода развязываемых соотношений использовали стандартную формулировку метода конечных элементов.

При решении исходили из следующих кинематических ограничений:

$$u = 0 \quad \left| \quad \begin{array}{l} x = 0 \\ 0 \leq y \leq 8 \end{array} \right. \quad v = 0 \quad \left| \quad \begin{array}{l} 0 \leq x \leq 6 \\ y = 0 \end{array} \right.$$

где u и v – соответственно перемещения по осям x и y (рис. 9.20).

При этом в качестве начальных условий задавалось поле температур, найденное в каждом узле сетки конечных элементов по методике, описанной выше. В целом, напряженно-деформированное состояние режущей пластины рассчитывалось в конкретные моменты времени шлифования, при определенном расположении круга относительно пластины и, соответственно, по полям температур и напряжений, характерным для этого же момента времени. Полученные результаты выводились на печать в виде таблиц и изолиний полей тензора напряжений, которые рассчитывались согласно теории прочности Писаренко-Лебедева. В дальнейшем при анализе рассматривали только эквивалентные напряжения.

Для расчета были выбраны следующие константы обрабатываемых материалов:

Материал	E , ГПа	ν	$\alpha_m, K^{-1} 10^{-6}$
Режущая керамика	0,41	0,24	8,87
Твердый сплав	0,40	0,24	5,0; 8,8; 15,0



Рис. 9.22. Характер распределения остаточных напряжений σ_x в слоистой пластине при шлифовании в зависимости от соотношения КТР слоев: 1 – 0,59; 2 – 1,0; 3 – 1,7

Анализ распределения напряжений показал, что максимальные нагрузки растяжения, достигающие почти 400 МПа, находятся в верхней правой кромке пластины, максимальные сжимающие напряжения находятся в области раздела фаз, при этом имеет место резкий переход напряжений от сжатия к растяжению. Поэтому, наличие прослойки с повышенным содержанием никеля для слоистых пластин является крайне важной. Укажем, что изменением свойств керамики и БВТС возможно изменить характер напряжений в опасных точках. Так [117] рассматривалось соотношение величин КТР, по отношению — $K_\alpha = \alpha_{\text{кер}} / \alpha_{\text{БВТС}}$. На рис. 9.22 приведен характер изменения значений напряжений по внешней кромке C (рис. 9.20) при увеличении отношения величины K_α от 0,59 до 1,7. Исследованиями установлено, что необходимо стремиться к снижению данного

отношения. При этом, распределение напряжений будет изменяться следующим образом: на поверхности керамики напряжения растяжения снизятся, в объеме твердого сплава снизится градиент напряжений, что, в свою очередь, вызовет снижение напряжений в переходной зоне от твердого сплава к керамике. Изменение величины K_α за счет подслоя из твердого сплава или формирования слоистых пластин, как раз и позволяет выявить пути снижения напряжений растяжения на кромках пластин, изменить распределение напряжений в пластинах и отодвинуть их максимум от края пластин. Тем самым, для избежания образования сколов по внешним кромкам при шлифовании пластин из режущей керамики, возможно использование двух вариантов. Во-первых, использовать режимы обработки и круги, обеспечивающие невысокие температуры шлифования, и, во-вторых, использовать двухслойные пластины «керамика–твердый сплав», позволяющие снизить максимальные значения напряжений на кромках пластин и их градиент [117].

9.5. Использование внутренних напряжений для изменения качества поверхностного слоя

Обратим внимание на то, что в работе [531] поверхностный слой металла определяется как слой металлического материала, ограниченный поверхностью обрабатываемой детали, содержащий в себе объем материала со свойствами, отличающимися от свойств материала основы. Причиной, вызвавшей такое изменение свойств поверхностного слоя, может быть единичное или совместное воздействие механических или электрических сил, химических факторов и т.п.

Рассмотрим такое изменение на примере изменения градиента концентрации подвижной фазы композитов – как эффекте, изменяющем качество поверхностного слоя за счет использования внутренних напряжений, формирующихся в фазах композита после спекания.

В работе [117] это показано для режущих пластин из БВТС. Вызвано это тем, что для них существует проблема потери никеля из поверхностного слоя в процессе их обработки, поскольку такие потери возникают как при электрохимической, так и при электроискровой обработке, когда из лунок разряда уходит никель, а также при шлифовании пластин, когда сошлифовывается спеченный поверхностный слой с повышенным содержанием никеля. Поэтому возникает необходимость или возобновления его в поверхностном слое, или обеспечения повышенного содержания никеля в нем. Для решения указанных проблем, именно за счет внутренних резервов, выдвинута гипотеза [117] о возможности изменения градиента концентрации связующего в поверхностном слое путем использования внутренних напряжений, формирующихся при спекании в фазах композита, в особенности в карбиде твердого сплава [532]. Пластины из БВТС спекают из порошков карбида или карбонитрида титана со связующим в виде никеля.

Одной из особенностей изготовления таких композиционных изделий является их спекание в присутствии жидкой металлической фазы, поэтому было выдвинуто предположение [117] о том, что при спекании тело в сжатом состоянии замкнуто в достаточно жесткую оболочку, в которой находятся тугоплавкие частички, окруженные вязкой несжимаемой жидкостью. При температурах спекания тугоплавкие частички склонны к увеличению, однако не могут, вследствие изложенных выше причин, реализовать это увеличение. После завершения спекания система находится в метастабильном состоянии и дальнейшее снижение ее энергии связано с ростом тугоплавких частичек. Вследствие этого, в БВТС по окончании процесса спекания и охлаждения зерна карбида находятся в сжатом состоянии с запасом внутренней энергии. Для реализации этой энергии с целью изменения градиента концентрации никеля необходимо, чтобы никель стал пластичным и сработал спусковой механизм термопластичности, что ха-

рактенно для эффектов возврата накопленной деформации [140], а это достигается нагревом. Тогда с момента возникновения пластичного состояния никеля появляется возможность увеличения зерен карбида титана и вытеснения никеля в поверхностные слои. Именно этим эффектом можно пояснить наблюдаемый авторами [533], но не поясненный факт, что при термообработке твердого сплава, начиная с температуры в 700 °С, происходит значительное повышение температуропроводности сплава. Между тем, именно с этой температуры, как будет далее показано, как раз и срабатывает механизм термопластичности, связующее заполняет поры и дефекты и температуропроводность естественно увеличивается.

Исследованиями [117] установлено, что уже в спеченной пластине БВТС существует изначальный градиент концентрации фаз, а именно, в поверхностном спеченном слое толщиной 50 мкм наблюдается повышенная концентрация никеля (рис. 9.23). Причем отношение поверхностной



Рис. 9.23. Градиент концентрации никеля в спеченной пластине БВТС и отсутствие его после шлифования (середина) [117]

концентрации к внутренней для сплава КНТ16 составляет 2,4–2,7, а для сплава ТН20 – 3,3–3,6. Такой градиент концентрации фаз вызван тем, что в период спекания расплав металла вытесняется из внутренних в периферийные области. Поскольку в процессе шлифования пластин припуск на обработку составляет от 0,05 до 1,0 мм, то слой с повышенным содержанием никеля гарантированно удаляется и в шлифованном образце никель распределен уже равномерно без наличия объемного градиента концентрации фаз. Вместе с тем, в целом, повышенное содержание никеля пластифицирует поверхностные слои, увеличивает – прочность при изгибе, коэффициент Пуассона и линейного термического расширения, коррозионную стойкость, а также износостойкость пластин при резании. Однако при этом, ухудшается шлифуемость, поэтому производство отдает предпочтение сплавам с низким содержанием никеля (от 12 до 16 масс. %), а именно маркам КНТ16 и ТН20. Для проверки и реализации изложенной выше гипотезы были отобраны пластины SNUN-120412 из сплавов ТН20 и КНТ16, которые спекались по промышленной технологии, далее их шлифовали и исследовали. Проводился их нагрев на воздухе до температур 1400 К с выдержкой в печи до 180 мин. Контролировали интенсивность рентгеновской линии (111) никеля с поверхности пластин (рис. 9.24). Установлено, что

коэффициент Пуассона и линейного термического расширения, коррозионную стойкость, а также износостойкость пластин при резании. Однако при этом, ухудшается шлифуемость, поэтому производство отдает предпочтение сплавам с низким содержанием никеля (от 12 до 16 масс. %), а именно маркам КНТ16 и ТН20. Для проверки и реализации изложенной выше гипотезы были отобраны пластины SNUN-120412 из сплавов ТН20 и КНТ16, которые спекались по промышленной технологии, далее их шлифовали и исследовали. Проводился их нагрев на воздухе до температур 1400 К с выдержкой в печи до 180 мин. Контролировали интенсивность рентгеновской линии (111) никеля с поверхности пластин (рис. 9.24). Установлено, что

только при превышении температуры обработки за $0,5 \cdot T_{\text{пл}}^{\text{Ni}}$, где $T_{\text{пл}}^{\text{Ni}}$ – температура плавления никеля, начинает срабатывать механизм, изложенный выше и реализуется эффект возврата накопленной деформации. Со значительным превышением температуры выше указанных $0,5 \cdot T_{\text{пл}}^{\text{Ni}}$ (рис. 9.24), когда никель становится еще более пластичным, интенсивность линии никеля в поверхностном слое возрастает, однако повышать температуру более 1300 К нежелательно, поскольку с этой температуры начинается активное окисление поверхности БВТС-сплавов (на кривой TG

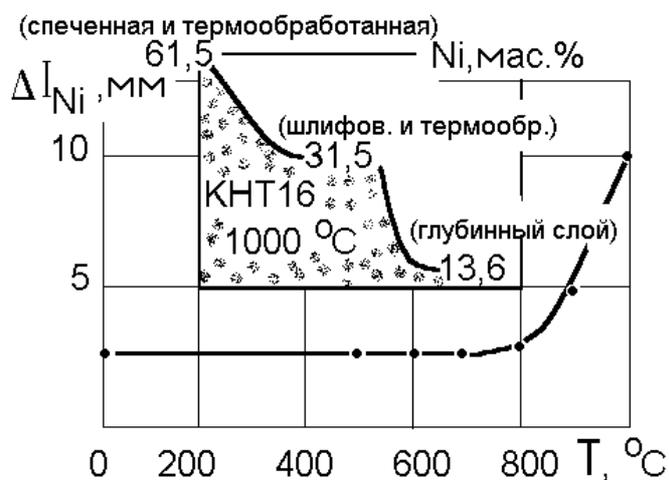


Рис. 9.24. Изменение интенсивности рентгеновской линии (111) никеля в поверхностном слое сплава ТН20 после шлифования и термообработки при разных температурах, а также сравнение концентрации никеля в поверхностных слоях сплава КНТ16 на разных уровнях при термообработке (1000 °C, $\tau = 10$ мин) [117]

где такое содержание соответствует глубинным слоям. Из анализа табл. 9.9 следует еще один важный результат: исходный спеченный слой содержит больше никеля в 2,4 раза, чем глубинные слои, однако и после термообработки сплава никеля на поверхности становится больше, и именно в 2,4 раза, в сравнении с нетермообработанной поверхностью. Это подтверждает изложенную выше гипотезу о том, что градиент содержания никеля образуется за счет напряжений в карбидной фазе твердого сплава. Визуально повышение содержания никеля представлено на вставке рис. 9.22 для сплава КНТ16. Приведенные выше эксперименты были выполнены при термообработке на воздухе. Однако, эффект срабатывает в любой газовой среде или без нее. Так, для сравнения были подвергнуты обработке пластины из сплава КНТ16 при температуре 1000 °C в течении 10 мин в среде водорода. Выявлено, что на поверхности пластины после термообработки

дериватограмм фиксируется прирост массы образца). Таким образом, за счет термообработки БВТС можно сформировать значительные градиенты концентрации подвижной фазы (связующего).

Таким образом, благодаря действию эффекта возврата накопленной деформации содержание никеля в поверхностном слое увеличивается (табл. 9.9), причем такое увеличение наблюдается, как для исходного спеченного поверхностного слоя, который и так уже имеет повышенное содержание никеля (рис. 9.23), так и для шлифованной поверхности,

содержание никеля составило 31,3 масс. %, тогда как в глубинных слоях – 12,6 масс. % [117].

Таблица 9.9. Содержание никеля в поверхностном слое образцов из сплава ТН20 при разных условиях термообработки

Характеристика слоя	Содержание никеля	
	в масс. %	по отношению к глубинному слою (в относительных единицах)
Исходный спеченный слой	41,0	2,4
Исходный спеченный слой после термообработки при 1273 К	81,5	4,6
Исходный, со шлифованной поверхностью	18,0	1,0
Исходный, глубинный слой	17,7	1,0
Шлифованный, и далее термообработанный при 1273 К	41,9	2,4

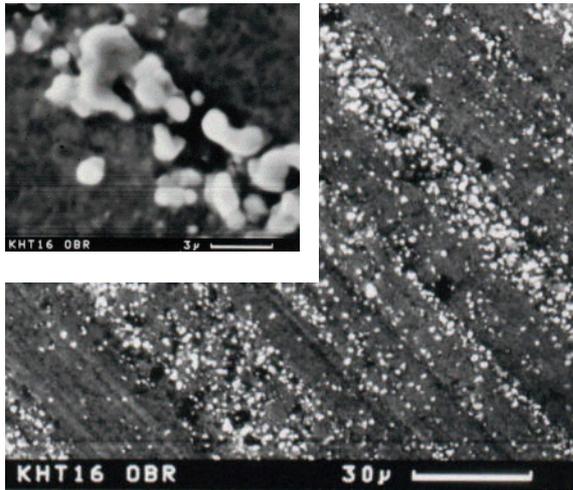


Рис. 9.25. Следы проявления никеля на поверхности сплава ТН20 после термообработки при 1400 К [117]

Для более четкого и явного проявления эффекта изменения градиента концентрации никеля дополнительно был поставлен [117] эксперимент по термообработке шлифованного сплава КНТ16 при температуре 1400 К с выдержкой в 10 мин. Для избежания наличия негативного эффекта окисления сплава при такой температуре, обработку проводили в среде водорода. На рис. 9.25 представлен общий вид поверхности сплава после термообработки. Видно, что никель особенно четко проявляется вдоль линий перемещения алмазных зерен

по предварительно шлифованной поверхности, где поры сплава лучше вскрыты и выход никеля облегчен. На рис. 9.25 во вставке представлены вытесненные фрагменты никеля и видно, что их величина составляет 1–2 мкм и логично предположить, что она определяется пористостью сплава. Приведенный эффект имеет для пластин из БВТС важный позитивный момент. Они достаточно дороги, поэтому важным является поиск ресурсов повышения износостойкости пластин за счет изменения физико-

химических свойств поверхностных слоев по отношению к объемным свойствам материала. В работе [117] предлагается повысить качество пластин путем перераспределения концентрации никеля между объемными и поверхностными слоями за счет действия эффекта возврата накопленной деформации. Эффект повышения содержания никеля в поверхностном слое позволяет достичь основного – повышения износостойкости пластин при резании. Например, при точении стали У8 (скорость детали 75,4–79,2 м/мин, продольная подача 0,05 мм/об, глубина резания 0,1 мм, длина детали 210 мм, время резания 10 мин 50 с) термообработанными пластинами из сплава ТН20 износостойкость возрастает в 1,6 раза (табл. 9.10).

Таблица 9.10. Стойкость пластин из сплава ТН20 при точении стали У8 [117]

Характеристика пластин	Средний износ пластин по задней поверхности, мкм	Коэффициент повышения стойкости пластин
Исходные	719	1,0
После термообработки – нагрев до температур:		
773 К	635	1,1
1273 К	441	1,6

Вполне возможно, что подобный эффект может быть использован и применительно к вольфрамовым твердым сплавам, у которых связующим является кобальт. Так, для твердого сплава Т5К10 в поверхностном слое фиксируется 16,5 масс. % кобальта, а у глубинных слоях – 9,5 %.

Таким образом, использование эффекта изменения градиента концентрации связующего в поверхностном слое композита в виде эффекта возврата накопленной деформации позволяет не только ликвидировать недостачу никеля в поверхностных слоях, а и увеличить его содержание в 2,4–4,6 раза. Причем, такое повышение после термообработки характерно как для исходного спеченного поверхностного слоя, который уже имеет повышенное содержание никеля, так и для шлифованной поверхности. Как следствие, такое повышение содержания никеля содействует повышению износостойкости пластин из БВТС [117].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Синтетические* сверхтвердые материалы. В 3-х т. / Т. 1: Синтез сверхтвердых материалов / редкол.: Новиков Н. В. (отв. ред.) и др. – К. : Наук. думка, 1986. – 280 с.
2. *Karvankova P., Veprek S.* Different approaches to extrinsically superhard materials // Proc. 1st Int. Workshop on Advanced Superhard Materials, 10–12 Dec., 2003. – Villetaneuse, France, 2003. – www-lpmtm.univ-paris13.fr.
3. *Новый* гибридный ультратвердый материал / А. А. Шульженко, Е. Е. Ашкинази, А. Н. Соколов и др. // Сверхтвердые материалы. – № 5. – 2010. – С. 3–14.
4. *Фирстов С. А., Роголь Т. Г.* Теоретическая (предельная) прочность // Доповіді НАН України. – 2007. – № 4. – С. 110–114.
5. *Hall Richard.* Shaping the Future: Developments in Abrasives and Processes // Gohram conferences : Precision Grinding & Finishing in the Global Economy. – Chicago, 2001. – October, 1–3, 2001.
6. ДСТУ 2486-94 «Алмази та інструменти алмазні. Терміни та визначення». – К. : Держстандарт України, 1994. – 31 с.
7. *Сверхтвердые* материалы. Получение и применение : монография в 6 томах / Том 1: Синтез алмаза и подобных материалов / отв. ред. А. А. Шульженко. – К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2003. – 320 с.
8. *Воронин Г. А., Осипов А. С.* Механизм формирования структуры и физико-механические свойства композита алмаз – карбид кремния // Поликристаллические материалы на основе алмаза и кубического нитрида бора: Сб. науч. тр. – К. : ИСМ АН УССР, 1990. – С. 31–34.
9. *Мильман Ю. В.* Новые методики микромеханических испытаний материалов методом локального нагружения жестким индентором // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. – К. : Наук. думка, 1998. – С. 637–656.
10. *Инструменты* из сверхтвердых материалов / под ред. Н. В. Новикова. – Киев : ИСМ НАНУ, 2001. – 528 с.
11. *Теплопроводность* синтетических алмазов / Т. Д. Оситинская, А. С. Вишневикий, В. А. Цендровский, В. И. Житнецкий // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 4. – С. 7–9.
12. *Беззубенко Н. К.* К вопросу о выборе связки круга для электроалмазного шлифования // Резание и инструмент. – 1975. – Вып. 14. – С. 80–86.
13. *Поляков В. П., Ножкина А. В., Чириков Н. В.* Алмазы и сверхтвердые материалы. – М. : Металлургия, 1990. – 327 с.

14. *Исследование* механизма разрушения алмаза при абразивной обработке / О. Н. Григорьев, Ю. В. Мильман, В. И. Трефилов и др. // Синтетические алмазы. – 1972. – Вып. 2. – С. 9–11.
15. *Смирнова Т. І.* Дослідження закономірностей синтезу алмазів з ростових систем, що містять нетрадиційні розчинники вуглецю на основі цинку : Автореф. ... канд. техн. наук. – К. : ИСМ НАН України, 2001. – 18 с.
16. *Распределение* удельного сопротивления монокристаллов полупроводникового синтетического алмаза по их объему / П. И. Баранский, И. А. Петруша, В. И. Торишний и др. // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 4. – С. 23–26.
17. *Энтальпия* и теплоемкость алмазов в широком диапазоне температур / В. И. Волга, Л. М. Бучнев, Н. В. Маркелов, Б. К. Дымов // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 3. – С. 9–11.
18. *Захаренко И. П.* Сверхтвердые абразивные материалы в инструментальном производстве. – К. : Вища школа, 1985. – 152 с.
19. *Волошин М. Н.* Структурные и фазовые превращения в чугунах при динамическом синтезе алмаза: Автореф. ... канд. техн. наук. – К. : ИСМ АН УССР, 1981. – 20 с.
20. *Андреев В. Д., Созин Ю. И., Волошин М. Н.* и др. Структурные изменения в алмазах динамического синтеза при нагреве в вакууме и при высоких давлениях // Сверхтвердые материалы. – 1985. – № 1. – С. 13–17.
21. *Лукаш В. А., Никитин Ю. И.* Некоторые свойства алмазов, получаемых динамическим методом // В сб.: Физико-химические проблемы синтеза сверхтвердых материалов. – Киев : ИСМ, 1978. – С. 45–47.
22. *Trueb L. F.* An electron microscope study of shock-synthesized diamond // J. Appl. Phys. – 1968. – Vol. 39. – № 10. – P. 4707–4716.
23. *Кулакова И. И.* Влияние газовой обработки на устойчивость наноалмаза в воздухе // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технологии его изготовления и применения: Сб. научн. тр. – Вып. 7. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2004. – С. 156–160.
24. *Долматов В. Ю.* Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение. – СПб. : НПО «Профессионал», 2011. – 536 с.
25. *Эфрос М. Г., Миронюк В. С.* Современные абразивные инструменты. – Л. : Машиностроение, 1987. – 158 с.
26. *Wentorf R. N.* Cubic form of boron nitride // J. Chem. Phys. – 1957. – Vol. 26. – № 4. – P. 956.
27. *Работоспособность* инструментов из различных микропорошков при обработке оптических стекла и керамики / Л. Л. Бурман, В. В. Рогов, Ю. И. Никитин, Э. С. Рабинович // Сверхтвердые материалы. – 1979. – № 3. – С. 34–38.
28. *Лысанов В. С.* Высокопроизводительный инструмент из эльбора. – М. : Машиностроение, 1975. – 35 с.

29. Дуб С. Н., Боримский И. А. Механические свойства монокристаллов КНБ, полученных спонтанной кристаллизацией и выращенных на заправке // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технологии его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 7. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2004. – С. 160–163.

30. Сидорко С. А., Майстренко А. Л. Физико-механические свойства композитов на основе легкоплавких стекол и кубического нитрида бора // Абразивсодержащие композиты из сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр. – К. : ИСМ АН УССР, 1990. – С. 28–31.

31. Шульженко А. А., Божко С. А., Соколов А. Н. и др. Синтез, спекание и свойства кубического нитрида бора. – Киев : Наук. думка, 1993. – 256 с.

32. Захаренко И. П., Меркулов В. Н. Обработка инструмента из быстрорежущей стали. – К. : УкрНИИНТИ, 1984. – 72 с.

33. Исследование порошков эльбора после термической обработки в нейтрально-восстановительной среде / М. С. Друй, М. И. Сохор, Л. И. Фельдгун и др. // Труды ВНИИАШ. – 1971. – № 13. – С. 6–18.

34. Эльбор в машиностроении / Под ред. В. С. Лысанова. – Л. : Машиностроение, 1978. – 280 с.

35. Гексанитовые шлифовальные круги на керамической связке : рекламное издание. – К. : Наук. думка, 1988. – 4 с.

36. Джамаров С. С., Крыжановский С. С., Воронков В. И. Шлифовальные круги из дробленых поликристаллов гексанита-А // Резание и инструмент. – 1977. – Вып. 18. – С. 112–115.

37. Сверхтвердые материалы / И. Н. Францевич, Г. Г. Гнесин, А. В. Курдюмов и др. – К. : Наук. думка, 1980. – 296 с.

38. Пилянкевич А. Н., Олейник Г. С. О мартенситном превращении вюрцитной модификации нитрида бора в графитоподобную // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 4. – С. 7–9.

39. Целенаправленное получение композиционных алмазных материалов с углеродной связкой и дифференцированными свойствами / Н. В. Новиков, Ю. И. Никитин, В. Г. Полторацкий и др. // Сверхтвердые материалы. – 1995. – № 3. – С. 13–19.

40. Полторацкий В. Г. Створення абразивних надтвердих композиційних матеріалів на основі алмазу та кубічного нітриду бору, структурованих вуглецевою зв'язкою при тисках нижче атмосферного: Автореф. ... канд. техн. наук. – К. : ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2014. – 20 с.

41. Композити на основі мікропорошків КНБ, структурованих вуглецевою зв'язкою, як функціональні елементи в структурі робочого шару алмазно-абразивного інструмента. Повідомлення 1. Шліфпорошки з ком-

позитів як абразивні елементи / В. І. Лавріненко, Б. В. Ситник, В. Г. Полторацький та ін. // Сверхтвердые материалы. – 2014. – № 3. – С. 65–72.

42. *Российские* ученые разработали новый метод получения сверхтвердого материала под названием «Фуллерит» // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2014. – № 5. – С. 69. (www.dailytechnoinfo.org)

43. *Начальная Т. А.* Фуллерены – новая форма углерода // Инструментальный світ. – 1997. – № 2. – С. 22–23.

44. *Созин Ю. И., Кацай М. А.* Фуллериты и влияние на них высоких давлений. Сообщение 1. Исходный фуллерит C₆₀ // Сверхтвердые материалы. – 1995. – № 5. – С. 54–56.

45. *Бакуль В. Н., Сердюк В. М.* Оптимальные марки алмазов для кругов на органической связке // Синтетические алмазы. – 1970. – Вып. 4. – С. 4–9.

46. *Резников А. Н.* Влияние теплофизических свойств круга на температуру режущей поверхности зерен при шлифовании // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 3. – С. 48–52.

47. *Смоляр А. С., Таран Н. Н., Манжелев И. В.* и др. Некоторые аспекты разработки алмазного однослойного инструмента на цинксодержащей стеклосвязке // Алмазсодержащие материалы и инструмент. Сб. науч. тр. – К. : ИСМ АН УССР, 1989. – С. 63 – 71.

48. *Научно-технические* разработки / АН Украины, Институт сверхтвердых материалов. – К. : ИСМ АН Украины, 1991. – 96 с.

49. *Адамовский А. А.* Некоторые свойства абразивных порошков карбида титана и гексанида-А // Синтетические алмазы. – 1979. – Вып. 3. – С. 32–33.

50. *Новиков Н. В.* Разработка новых инструментальных сверхтвердых материалов // Резание и инструмент. – 1981. – Вып. 26. – С. 8–12.

51. *Миклушиц В. В., Оситинская Т. Д., Подоба А. П.* Удельная теплоемкость кибора // Сверхтвердые материалы. – № 6. – 1986. – С. 22–24.

52. *Оситинская Т. Д.* Теплофизические свойства алмаза и кубического нитрида бора // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 3. – С. 46–48.

53. *Шульженко А. А., Соколов А. Н., Ильницкая Г. Д.* и др. Получение термостабильных шлифпорошков кубического нитрида бора // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр. – К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2005. – С. 39–46.

54. *Шепелев А. А., Лавриненко В. И.* Выбор характеристики кругов для шлифования инструментальных материалов. – К. : ИСМ АН УССР, 1989. – 11 с.

55. *Никитин Ю. И., Уман С. М., Коберниченко Л. В.* и др. Порошки и пасты из синтетических алмазов. – К. : Наук. думка, 1992. – 284 с.

56. Бакуль В. Н. Число зерен в одном карате – одна из важнейших характеристик алмазного порошка // Синтетические алмазы. – Вып. 4. – 1976. – С. 22–27.

57. Carius Alan. CBN Abrasives and the Grindability of Powder Metal Materials // Gohram conferences : Precision Grinding & Finishing in the Global Economy. – Chicago, 2001. – October, 1–3, 2001.

58. Мусиенко М. С., Котова Н. В. Определение пористости алмазных шлифпорошков по адсорбции додекана // Физико-химические свойства сверхтвердых материалов и методы их анализа. – К.: ИСМ АН УССР, 1987. – С. 76–79.

59. Ільницька Г. Д. Адгезійно-магнітне сортування шліфпорошків синтетичних алмазів за міцністю: Автореф. ... канд. техн. наук. – К. : ИСМ НАН України, 2002. – 19 с.

60. Зависимость прочности синтетических алмазов от их плотности / Е. Ф. Долгопольская, М. Я. Кац, Н. Ф. Кирова и др. // Новое в теории и практике создания и применения синтетических сверхтвердых материалов в народном хозяйстве. Секция 1. Синтез и исследование свойств сверхтвердых материалов. – К. : ИСМ АН УССР, 1977. – С. 79–82.

61. Цыпин Н. В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. – К. : Наук. думка, 1983. – 192 с.

62. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 томах / Том 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / Под ред. А. О. Шепелева. – К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2007. – 340 с.

63. Кныш С. В., Скленчук В. А. Выбор формы зерна при моделировании процессов шлифования // Резание и инструмент. – 1988. – Вып. 39. – С. 95–98.

64. Мишинаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов. – К. : Наук. думка, 1982. – 192 с.

65. Кремнев Г. П. Силы резания при алмазном и эльборовом шлифовании магнитно-мягких материалов // Резание и инструмент. – 1977. – Вып. 15. – С. 45–49.

66. Матюха П. Г., Полтавец В. В. Геометрическая форма алмазного зерна при алмазно-искровом шлифовании // Резание и инструмент. – 1987. – Вып. 38. – С. 23–29.

67. Узунян М. Д. Теоретический анализ и расчет количества зерен на рабочей поверхности алмазного круга // Резание и инструмент. – 1978. – Вып. 19. – С. 75–82.

68. Абразивная и алмазная обработка материалов : Справочник / Под ред. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 391 с.

69. *Seiki Matsui*. Statistical Approach to Grinding Mechanism Influence of the Distribution in Depth for the Position of Grain Tip Angles // *Technology Reports Tohoku University*. – 1972. – № 2. – P. 297–312.

70. *Лавриненко В. И., Шепелев А. А., Петасюк Г. А.* Модели формы зерен СТМ // *Сверхтвердые материалы*. – 1994. – № 5–6. – С. 18–21.

71. *Лавриненко В. И.* Электрошлифование инструментальных материалов. – К.: Наук. думка, 1993. – 152 с.

72. *Геометрические* параметры зерен β -ромбоэдрического бора / Г. В. Самсонов, А. А. Адамовский, А. И. Безыкорнов и др. // *Синтетические алмазы*. – 1974. – Вып. 1. – С. 5–8.

73. *List E., Frenzel J, Vollstadt H.* A new system for single particle strength testing of grinding powders // *Industrial diamond review*. – 2006. – № 1. – P. 42–47.

74. *Петасюк Г. А.* Системно-критеріальний метод кількісної оцінки однорідності надтвердих дисперсних матеріалів // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2003. – № 5. – С. 101–105.

75. *Петасюк Г. А., Богатирьова Г. П.* Экстраполяционно-аналитический метод определения удельной поверхности порошков сверхтвердых материалов // *Сверхтвердые материалы*. – 2007. – № 6. – С. 65–76.

76. *Каменецакая Д. С., Корсунская И. А., Литвин Ю. А.* Влияние графитизирующих элементов на равновесие с расплавом в системе железо-углерод при высоких давлениях // *ФМХ*. – 1978. – № 45. – С. 9–14.

77. *Боримский А. И., Делеви В. Г., Нагорный П. А.* Кинетика образования и роста алмазов в системе Fe–Si–C // *Сверхтвердые материалы*. – 1999. – № 3. – С. 9–14.

78. *Смоквина В. В.* Підвищення зносостійкості шліфувального інструменту з НТМ спрямованим тепловим впливом на різальні зерна: Автореф. ... канд. техн. наук. – К. : ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. – 20 с.

79. *Баконь А.* Исследование изменений происходящих в алмазных порошках при нагреве // *Сверхтвердые материалы*. – 1983. – №.6. – С. 20–23.

80. *Исследование* изменений, возникающих в алмазах при нагреве / А. В. Белянкина, Л. М. Мультан, Э. С. Симкин и др. // *Синтетические алмазы*. – 1972. – № 1. – С. 20–22.

81. *Лавриненко В. И., Ильницкая Г. Д., Смоквина В. В.* и др. Дослідження умов спрямованого теплового впливу на зміну фізико-механічних властивостей алмазних зерен та їх зносостійкість у шліфувальних кругах // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов*. – Вып. 16. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2013. — С. 450–454.

82. *Влияние* физико-механических характеристик синтетических алмазных порошков марки АС6 на износостойкость шлифовального инстру-

мента / Лавриненко В. И., Ильницкая Г. Д., Петасюк Г. А. и др. // Сверхтвердые материалы. – 2013. – № 5. – С. 72–81.

83. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 томах / Том 3: Композиционные инструментальные материалы / Отв. ред. А. Е. Шило.* – К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005. – 280 с.

84. *Агрегированные металлизированные алмазные порошки в инструментах на антифрикционной органической связке / Ю. В. Найдич, И. А. Лавриненко, Я. Ф. Моцак и др. // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. Часть 2.* – К. : Наук. думка, 1977. – С. 69–74.

85. *Найдич Ю. В., Колесниченко Г. А., Перевертайло В. М.* Смачиваемость и контактное взаимодействие металлических расплавов с алмазом и кубическим нитридом бора // Синтетические алмазы в промышленности. – К. : Наук. думка, 1974. – С. 32–36.

86. *Yokogawa M., Yokogawa K.* Вплив Ni-покриття на зернах на абразивну здатність кругів з КНБ на полімерній зв'язці // Кікай то когу. – 1985. – 29, № 11. – Р. 107–115.

87. *Кухаренко С. А., Шило А. Е., Бондарев Е. К.* Структурные превращения в смеси натрийборосиликатной и свинцовоцинкборосиликатной систем при нагреве // Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 4. – С. 47–55.

88. *Дослідження умов виникнення та функціонування термоЕРС при шліфуванні сталевого інструменту кругами із металізованим склопокриттям зерен КНБ / В. І. Лавріненко, О. А. Девіцький, С. А. Кухаренко та ін. // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Матер. 14-го Межд. науч.-техн. семинара, 24–28.02.2014 г., г. Свалява.* – Киев : АТМ Украины, 2014. – С. 109–111.

89. *Вольфсон А. И.* Инструмент из алмаза и кубического нитрида бора на органических связках // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сб. статей Межд. науч.-техн. конф. – Волжский : ВолГАСА, 2001. – С. 60–62.

90. *Исследование взаимодействия в системах Cu–Sn–алмаз и Cu–Sn–КР при динамическом нагреве / Л. Н. Лавриненко, В. В. Огородник, Ф. М. Васерман, А. В. Курищук // Алмазодержащие материалы и их применение.* – К. : ИСМ АН УССР, 1985. – С. 39–43.

91. *Бекренев А. Н., Сагалович С. Я.* Фазовый состав поверхностных слоев алмазных инструментов после электроэрозионной правки // Синтетические алмазы. – 1974. – Вып. 5. – С. 12–14.

92. *Структурообразование в системе Cu–Sn–Pb при спекании / Л. Ф. Колесниченко, О. И. Фушич, Л. Д. Игнатенко и др. // Порошковая металлургия.* – 1986. – № 5. – С. 28–34.

93. Михайлуца Э. Б. Режущая поверхность алмазного инструмента и формирование ее свойств электроэрозионным воздействием. – К. : Общ-во «Знание», 1990. – 16 с.

94. Федорович В. А. Влияние модуля упругости связки на эффективность алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2002. – Вип. 1(5). – С. 406–416.

95. Галицкий В. Н., Муровский В. А., Курищук А. В. и др. Влияние свойств металлических связок на эксплуатационные показатели алмазного инструмента // Синтетические алмазы. – 1978. – Вып. 5. – С. 23–26.

96. Волкогон В. М., Таланцев Л. Л., Аврамчук С. К. и др. Опыт и эффективность применения специального инструмента из гексанита-А при шлифовании пазов форвакуумного насоса // Современные технологии в машиностроении: Сб. науч. статей / Под общ. ред. А. И. Грабченко. – Т. 1. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – С. 57–63.

97. Львов В. Н., Данилова Ф. Б., Сафронов В. Г. Новые круги на органической связке для электрохимического шлифования жаропрочных, магнитных и других труднообрабатываемых материалов // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1975. – Вып. 12. – С. 9–13.

98. Связки металлические марок МО4, МО13, МО13Э. Стандарт предприятия. СТП 504–73.

99. Галицкий В. Н., Курищук А. В., Муровский В. А. Физико-механические свойства металлических связок алмазного инструмента // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 4. – С. 31–33.

100. Загребин Л. Д., Свитковский Ф. Ю. Определение некоторых теплофизических параметров металлических связок алмазных кругов // Физика и химия формирования поверхностного слоя. – 1977. – Вып. 1. – С. 53–57.

101. Новые связки алмазно-абразивного инструмента / В. Н. Галицкий, В. А. Муровский, Е. С. Землянский, С. И. Лищинский // Синтетические алмазы. – 1970. – Вып. 2. – С. 52–53.

102. Лавриненко В. И. Фізико-механічні властивості ріжучого шару кругів з НТМ // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин : Зб. наук. праць (серія «Г») / НАН України. ІНМ ім. В. Н. Бакуля. – Київ, 2001. – С. 50–60.

103. Связки металлические марок М1, МП1. Стандарт предприятия. СТП 498–72.

104. Коновалов В. А., Александров В. А. Исследование износостойкости связок алмазного камнерезного инструмента // Синтетические алмазы. – 1974. – Вып. 5. – С. 27–29.

105. *Связка* металлическая марки МО16. Стандарт предприятия. СТП ИСМ 533–80.

106. *Связка* металлическая марки МО20. Технические условия ТУ-037-325-82.

107. *Связки* металлические марок МЗ-16 (МО8), МЗ-17 (МО9). Стандарт предприятия. СТП 90.620–85.

108. *Связки* металлические марок МЖ, МЗ, МОЗ. Стандарт предприятия. СТП 502–72.

109. *Некоторые* особенности изготовления алмазного инструмента для тонкого шлифования стекла / Л. Л. Бурман, В. В. Рогов, Г. Д. Костенецкая и др. // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 3. – С. 36–40.

110. *Курищук А. В.* Исследование и выбор оптимальной характеристики алмазных зубчатых хонов и технологических параметров их изготовления // Автореф. ... канд. техн. наук. – К., 1976. – 23 с.

111. *Иванов С. А., Ветров А. П., Майстренко А. Л.* и др. Методика и устройство для измерения теплопроводности композиционных алмазосодержащих материалов на металлической связке // Сверхтвердые материалы. – 2003. – № 2. – С. 44–49.

112. *Вальчук Г. И., Перельройзен М. А., Коновалов В. А.* Антифрикционные свойства связок, применяемых при шлифовании стекла // Синтетические алмазы. – 1971. – Вып. 3. – С. 48–51.

113. *Беззубенко Н. К., Тананко И. А., Бобух Ж. С.* и др. Формирование режущей поверхности алмазного инструмента на металлической связке при электроэрозионной правке // Синтетические алмазы. – 1975. – Вып. 1. – С. 18–22.

114. *Связки* металлические марок МС1, МС2, МС6, МС15. Стандарт предприятия. СТП 505–72.

115. *Захаренко И. П.* Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. – К. : Наук. думка, 1981. – 300 с.

116. *Горшков Б. Т.* Обдирочное шлифование проката. – М. : Металлургия, 1991. – 176 с.

117. *Лавріненко В. І.* Наукові основи шліфування інструментальних матеріалів із спрямованою зміною характеристик контактних поверхонь: Автореф. ... докт. техн. наук. – К. : ІНМ НАН України, 2000. – 35 с.

118. *Парсегов С. В.* Обеспечение бездефектной обработки при изготовлении режущих инструментов из сверхтвердых поликристаллов нитрида бора // Автореф. ... канд. техн. наук. – Л., 1987. – 22 с.

119. *Связки* полимерные серии В1-13. Стандарт предприятия. СТП 90.1126–87.

120. *Связки* органические марок Б1, Б2, Б8, Б11, Б15, БР, БР1. Стандарт предприятия. СТП ИСМ 460–77.

121. *Алмазный инструмент на каучуковых связках и области его применения* / Э. С. Рабинович, Л. Ф. Макарова, Ю. А. Яковчук, В. Н. Бычихин. – К. : ИСМ АН Украины, 1991. – 20 с.
122. *Ковыженко Г. И.* Роль связки и алмазных зерен при работе эластичного инструмента // *Сверхтвердые материалы*. – 1987. – № 6. – С. 46–49.
123. *Рабинович Э. С., Оситинская Т. Д., Миклушис В. В.* и др. Теплофизические свойства каучуковых композиций для алмазно-абразивного инструмента // *Сверхтвердые материалы*. – 1985. – № 6. – С. 16–19.
124. *Инструмент из сверхтвердых материалов на керамических связках* / А. А. Пащенко, Б. М. Емельянов, Ф. Г. Рубан и др. – К. : Наук. думка, 1980. – 44 с.
125. *Связки керамические марок К1, К5, СК, СК2. Стандарт предприятия. СТП 499–72.*
126. *Ралко А. В., Пащенко А. А., Рубан Ф. Г.* Термическое расширение керамических связок // *Синтетические алмазы*. – Вып. 3. – 1969. – С. 7–9.
127. *Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента* // В. Н. Бакуль, И. П. Захаренко, Я. А. Кункин и др. – К. : Техніка 1971. – 207 с.
128. *Шульженко А. А., Гаргин В. Г., Шишкин В. А.* и др. Поликристаллические материалы на основе алмаза. – К. : Наук. думка, 1989. – 192 с.
129. *Новиков Н. В., Майстренко А. Л., Кулаковский В. Н.* Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. – К. : Наук. думка, 1994. – 220 с.
130. *Шишков Н. З., Синьковский Л. К., Симонян Р. В.* Измерение твердости алмазосодержащего слоя шлифовальных кругов на органических и металлических связках // *Алмазы и сверхтвердые материалы*. – 1979. – Вып. 11. – С. 8–9.
131. *Коновалов В. А.* Исследование влияния прочности алмазоудержания и износостойкости металлических связок на работоспособность алмазно-абразивного инструмента : Автореф. ... к.т.н. – Харьков : ХПИ, 1974. – 27 с.
132. *Гуль В. Е., Шенфиль Л. З.* Электропроводящие полимерные композиции. – М. : Химия, 1984. – 240 с.
133. *Лавриненко В. И., Цыганов И. Д., Шкляренко В. В.* Электросопротивление алмазосодержащих композитов // *Алмазосодержащие материалы и инструменты*. – К. : ИСМ АН УССР, 1989. – С. 94–97.
134. *Костржицкий А. И., Соколов А. Д., Калинин А. Ю.* Конденсированные системы сплавов меди в изделиях электронной техники // *Композиционные материалы в промышленности «Славполиком»*: Матер. XXII Межд. науч.-пр. конф. 1–5 июня 2002, Ялта. – К. : УИЦ«НТТ». – С. 58–59.

135. Чалый В. Т., Оситинская Т. Д., Рябинина О. Б. Теплопроводность алмазополимерных композитов // Процессы взаимодействия на границе раздела фаз: Сб. науч. тр. – К. : ИСМ АН УССР, 1982. – С. 109–116.

136. Иванов Ю. И., Бородин Г. Р., Буров В. А. Теплофизические свойства эльборовых и алмазных кругов // Алмазы. – 1972. – Вып. 3. – С. 5–6.

137. Водопоглощение алмазосодержащих композитов применительно к электрошлифованию кругами из СТМ / В. И. Лавриненко, А. А. Зленко, А. А. Сытник и др. // Электронная обработка материалов. – 1991. – № 3. – С. 39–41.

138. Використання ефекту зміни градієнту рухомої фази при розробці інструментальних композитів з НТМ / В. І. Лавріненко, А. О.Шепелев, І. В. Лещук та ін. // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. праць КДТУ. – Кіровоград : КДТУ. – 2003. – Вип. 13. – С. 57–60.

139. Лавриненко В. И. Использование ЭПФ в рабочих процессах высоких технологий // Резание и инструмент. – 1993. – Вып. 48. – С. 3–5.

140. Тихонов А. С., Герасимов А. П., Прохорова И. И. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении – М. : Машиностроение, 1981. – 80 с.

141. Исследование структуры металлических связей алмазного инструмента / В. Н. Галицкий, А. С. Вишневский, Л. Л. Кузьмина и др. // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 2. – С. 31–34.

142. Встановлення закономірностей формування двокаркасних металополімерних композитів з КНБ за умов їх програмованого спікання та пресування / А. О. Шепелев, В. І. Лавріненко, О. Г. Гонтар та ін. // Резание и инструмент в технологических системах. – 2001. – Вып. 60. – С. 258–261.

143. Лавриненко В. И. Угол направления действия касательных напряжений – ключ к инструменту из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 2002. – № 2. – С. 71–76.

144. Яценко В. Ф. Прочность композиционных материалов. – Вища шк., 1988. – 191 с.

145. Оценка качества режущей поверхности кругов из СТМ методом растровой электронной микроскопии / А. А. Шепелев, В. И. Лавриненко, А. Г. Гонтарь, В. Н. Ткач // Управление качеством финишных методов обработки : Сб. науч. тр. – Пермь : ПГТУ, 1996. – С. 31–34.

146. Лавриненко В. И. Пространственное расположение зерен СТМ в абразивсодержащем слое круга // Сверхтвердые материалы.– 1997. – № 5. – С. 72–79.

147. Визначення можливостей отримання структурованого робочого шару абразивного інструменту з надтвердих матеріалів / В. І. Лавріненко, О. О. Пасічний, Б. В. Ситник та ін. // Породоразрушающий и металлообра-

батывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 11. – Киев : ИСМ НАН Украины, 2008. – С. 402–407.

148. *Полуян А. И.* Исследование структуры алмазных композитов на металлических связках // *Машиностроение и техносфера XXI века : Сб. трудов IX Межд. науч.-техн. конф., Т. 2, 09–12.09.2005 г., Севастополь–Донецк.* – Донецк : ДНТУ. – 2005. – С. 268–270.

149. *Особливості* формування структурованості в гальванічному зв'язуючому алмазному правлячому інструменту / В. І. Лавріненко, І. П. Фесенко, А. Г. Лубнін та ін. // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 14. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – С. 524–529.*

150. А.с. № 1073082 (СССР). Шлифовальный круг / Московский станкоинструментальный институт и Институт высоких температур АН СССР: *И. П. Третьяков, В. Н. Тимофеев, Б. П. Кудряшов, В. Т. Ивашиников.* – Оpubл. в Б.И., 1984, № 6.

151. Пат. № 4385907 (США). Шліфувальний круг з опорним елементом з теплоізоляційного матеріалу / *Toyota Koki Kabushiki Kaisa: T. Tomita, I. Suzuki, T. Imai, M. Kitajima.* – Оpubл. 31.05.83.

152. *Новые* абразивостойкие материалы для узлов трения горнодобывающей техники / С. С. Затуловский, В. Акбарнеджад, А. В. Косинская и др. // *Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях. Матер. IV Промышл. конф. с Межд. участием. п. Славское, Карпаты, 2–4 февраля 2004 г. – Киев : УИЦ «НТТ», 2004. – С. 104–106.*

153. *Коновалов В. А., Мацкевич Е. Р., Степаненко Т. О.* Исследование взаимодействия полифосфата натрия с бронзовой матрицей при гранулировании и спекании металлоалмазных композиций // *Абразивсодержащие композиты из сверхтвердых материалов: Сб. науч. трудов. – Киев : ИСМ АН УССР, 1990. – С. 71–77.*

154. *Алмазный* композиционный материал на основе ацетоноформальдегидной смолы и жидкого стекла / В. А. Степанов, Е. В. Олейник, С. П. Высоцкий и др. // *Композиционные материалы в промышленности : Матер. XXVII Межд. конф. 28 мая–1 июня 2007, Ялта. – К. : УИЦ«НТТ», 2007. – С. 113.*

155. *Лавріненко В. І, Солод В. Ю., Ситник Б. В.* и др. Застосування опорних елементів у структурі робочого шару кругів з надтвердих матеріалів для підвищення їх експлуатаційних показників // *Сверхтвердые материалы. – 2011. – № 1. – С. 72–79.*

156. Резников А. Н., Федосеев О. В., Щипанов В. В. Вопросы теории резания при шлифовании сверхтвердыми материалами // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. Часть 1. – К. : Наук. думка, 1977. – С. 88–95.

157. Узунян М. Д. Расчет числа зерен, участвующих в резании, и расстояние между ними на поверхности алмазного круга // Станки и режущие инструменты. – 1966. – Вып. 1.

158. Старков В. К., Кондратов А. С. Эффективность шлифования алмазными и абразивными кругами труднообрабатываемых сталей // Материалы семинара МДНТП. – М. : МДНТП, 1968. – С. 115–121.

159. Кузнецов А. М., Голосев И. И. Влияние температурных параметров синтетических алмазных зерен на их режущие свойства // Станки и инструмент. – 1964. – № 12. – С. 28–29.

160. Резников А. Н. Краткий справочник по алмазной обработке. – Куйбышев : Кн. Изд.-во, 1967. – 202 с.

161. Кондратов А. С., Старков В. К. Закономерности расположения зерен на рабочей поверхности круга // Внедрение алмазов в промышленности. – М. : НИИМАШ, 1967.

162. Спивак Б. Е. Определение некоторых характеристик рельефа однослойных алмазных инструментов // Резание и инструмент. – 1972. – Вып. 5. – С. 86–94.

163. Марченко Д. Г., Беляев Н. В. Исследование геометрических параметров зерен эльбора // Абразивы. – 1970. – № 6. – С. 14–16.

164. Хрульков В. А., Головань А. Я. Особенности алмазного шлифования и доводки деталей из минералокерамики и твердых сплавов // Алмазный инструмент и процессы алмазной обработки. – М. : МДНТП, 1964. – С. 86–111.

165. Ультразвуковое шлифование абразивно-алмазным инструментом новых конструкционных материалов. – Л. : ЛДНТП, 1969. – 32 с.

166. Гомон П. Э. Управление качеством поверхности при алмазной обработке плоских керамических заготовок. – Дис. на соиск. ... канд. техн. наук. – Л. : ЛПИ, 1986. – 268 с.

167. Прудников Е. Л., Гаманюк М. П., Кабыш О. А. Методика расчета количества зерен в однослойном алмазно-гальваническом покрытии // Синтетические алмазы. – Вып. 4. – 1976. – С. 27–30.

168. Гавриш А. П., Кремнев Г. П., Скрипко Г. Ф. Обработка магнитно-мягких материалов алмазными кругами // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. Часть 2. – К. : Наук. думка, 1977. – С. 183–189.

169. Красник В. Г. К вопросу о количестве алмазных зерен на поверхности круга // Сверхтвердые материалы. Производство и применение. – К. : ИСМ АН УССР, 1977. – С. 54–59.

170. Яцерицын П. И., Аканович В. А., Пустовойт Г. В. и др. Исследование путей совершенствования алмазно-абразивного инструмента // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. Часть 1. – К. : Наук. думка, 1977. – С. 147–150.

171. Matsuo T., Oshima E., Ohbuchi J., Toyoura S. Effect of grain shape on cutting force in superabrasive single-grit test // CIRP Ann. – 1989. – № 38. – P. 323–326.

172. Хачикян Г. С. Исследование ориентации абразивных зерен изготовления абразивного инструмента из СТВ // Сверхтвердые материалы в народном хозяйстве. – Киев, 1989. – С. 194–197.

173. Крушевский А. Е. Аналитическое исследование напряженного состояния зерна шлифовальника в области соединения его со связкой // Машиностроение: Респ. межвед. сборник. – 1985. – Вып. 10. – С. 32–38.

174. Матюха П. Г., Мартынов В. И. Расчет прочности закрепления алмазного зерна в металлической связке // Резание и инструмент. – 1991. – Вып. 46. – С. 14–19.

175. Бурмистров В. В. К теории определения сил шлифования, действующих на единичных зернах, при обработке хрупких материалов // Резание и инструмент. – 1990. – Вып. 44. – С. 14–19.

176. Евдокимов А. Е. Определение напряжений в шлифовальном круге в зоне взаимодействия зерен со связкой. – Харьков : Харьк. политехн. ин-т, 1987. – 11 с. – Деп. в УкрНИИТИ 30.07.87. – № 2270. – Ук. 87.

177. Лавриненко В. И., Кулаковский В. Н., Ламашевская Н. В. и др. Напряженное состояние в зоне взаимодействия зерна со связкой круга // Сверхтвердые материалы. – 1995. – № 4. – С. 46–49.

178. Yang Dong Y., Seireg Ali A. Model for predicting residual stresses in metal cutting // Proc. Jap. Int. Tribol. Conf. – Tokyo (Japan), 1990. – 1. – P. 439–444.

179. Зенкевич О. Н. Метод конечных элементов в технике. – М. : Мир, 1975. – 541 с.

180. Якимов А. В., Паршаков А. Н., Свирцев В. И. и др. Управление процессом шлифования. – К. : Техніка, 1983. – 184 с.

181. Чмир М. Я., Троицкий Н. А. Взаимосвязь технологических показателей алмазно-электрохимического шлифования, характеристик оборудования и условий обработки // Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов: Сб. науч. тр. – Тула : ТулПИ, 1990. – С. 80–92.

182. Алмазное шлифование неметаллических материалов. Обзор / Р. З. Цыпкин, В. Р. Кангун, В. И. Белов и др. – М. : НИИмаш, 1978. – 57 с.

183. ЩигOLEV А. Г., Виноградов А. А. Расчет сил при резании единичным алмазным зерном // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 1. – С. 51–56.

184. Лавріненко В. І. Шліфувальні круги з надтвердих матеріалів у верстатній системі: обмеження за критерієм жорсткості // *Сверхтвердые материалы*. – 2009. – № 2. – С. 82–87.

185. Шульман П. А., Семенов Л. Н., Колесниченко Ю. Н. К вопросу о влиянии динамики станков на характер процесса алмазного шлифования // *Вопросы теории и практики резания алмазными инструментами*. – К. : УкрНИИТНИ, 1968. – С. 33–35.

186. Петасюк Г. А., Лавриненко В. И. Осевая жесткость шлифовальных кругов прямого профиля из СТМ // *Сверхтвердые материалы*. – 1993. – № 6. – С. 47–52.

187. Петасюк Г. А., Лавриненко В. И., Петасюк О. У. Осевая жесткость стандартизованных шлифовальных кругов формы 12A2-45° из СТМ // *Сверхтвердые материалы*. – 1994. – № 4. – С. 28–31.

188. Осевая жесткость шлифовальных кругов формы 12A2-20° из СТМ / А. А. Шепелев, Г. А. Петасюк, В. И. Лавриненко и др. // *Сверхтвердые материалы*. – 1995. – № 4. – С. 43–60.

189. Лавриненко В. И. Твердость рабочего слоя кругов из СТМ на металлических связках // *Сверхтвердые материалы*. – 1982. – № 5. – С. 24–27.

190. Вишницкий А. Л., Ясногородский И. З., Григорчук И. П. Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов. – Л. : Машиностроение, 1971. – 212 с.

191. Дудукалов Ю. В., Раб А. Ф. Статистические характеристики макропрофиля рабочей поверхности абразивного инструмента // *Резание и инструмент*. – 1990. – Вып. 44. – С. 34–41.

192. Линенко-Мельников Ю. П. Метод исследования кинетики контактного взаимодействия в системе инструмент-заготовка при шлифовании // *Сверхтвердые материалы*. – 1991. – № 6. – С. 40–43.

193. Metzger J. L. Scatter in Grinding Tests – Curse or Blessing // *Ind. Diamond Revier*. – 1988. – 42, № 529. – P. 270–277.

194. *Инструменты их сверхтвердых материалов* / под ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2014. – 608 с.

195. Шепелев А. А., Лавриненко В. И. Проблемы прикладной науки: сверхтвердые материалы в инструментальном производстве // *Проблемы науки*. – 1999. – № 5. – С. 50–54.

196. Сторчак Г. А., Данилова Ф. Б., Попов С. А. Алмазно-абразивные круги // *Алмазы и сверхтвердые материалы*. – 1979. – Вып. 8. – С. 6–7.

197. Савченко Ю. Я., Лавриненко В. И., Солод В. Ю. Работоспособность кругов, содержащих алмаз и КНБ, при электрохимическом шлифовании быстрорежущих сталей // *Электрохимическая размерная обработка*

деталей машин: Тез. докл. VI Всесоюз. науч.-техн. конф. – Тула : ТулПИ, 1986. – С. 155–156.

198. *Способ электрохимического шлифования* / И. П. Захаренко, Ю. Я. Савченко, В. И. Лавриненко // А.с. СССР № 848234, Б.И. № 27, 1981.

199. *Инструмент для электроабразивного шлифования* / Б. И. Никулкин, В. М. Рогачев, Ю. Н. Герасимов // А.с. СССР № 776836, опубл. в Б.И., 1980, № 41.

200. *Худобин Л. В., Веткасов Н. И., Михайлин С. М.* Моделирование теплонапряженности круглого наружного врезного шлифования композиционными кругами // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. статей, Т. 2. – Харків : НТУ «ХП», 2006. – С. 285–296.

201. *Прерывистый абразивный круг* / В. Т. Чалый, А. Е. Шило, Л. Л. Мишнаевский и др. // А.с. СССР № 517478, Бюл. № 22, 1976.

202. *Стенд для исследования процессов шлифования материалов* / А. А. Орап, А. А. Сухобрус, В. А. Мельник и др. // Сверхтвердые материалы. – 1994. – № 3. – С. 51–54.

203. *Доброскок В. Л.* Исследование взаимосвязи параметров продольного профиля кругов с выходными показателями процесса шлифования // Резание и инструмент в технологических системах. – 1999. – Вып. 54. – С. 80–89.

204. *Лавриненко В. І.* Особливості зміни коефіцієнту абразивного різання при шліфуванні інструментальних матеріалів // Резание и инструмент в технологических системах. – 1999. – Вып. 55. – С. 152–154.

205. *Звоновских В. В.* Повышение эффективности плоского глубинного шлифования путем назначения рациональных рабочих циклов и управления скоростью шлифования : Автореф. ... канд. техн. наук. – Л. : ЛПИ им. М. И. Калинина, 1987. – 16 с.

206. *Семко М. Ф.* Особенности процесса резания алмазным и минералокерамическим инструментом и обработки пластмасс : Автореф. ... докт. техн. наук. – Киев : КПИ, 1968. – 76 с.

207. *Виткевич Н. А.* К вопросу возникновения волнового износа продольного профиля рельсов // Технологическое повышение надежности и долговечности деталей машин и инструментов. – Брянск : БИТМ, 1990. – С. 40–44.

208. *Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты* / В. И. Лавриненко, И. В. Лещук, В. А. Скрыбин и др. // Т. 1. Коллективная монография. – Москва : Издательский дом «Спектр», 2013. – 288 с.

209. *Савчук Ю. С.* О некоторых особенностях процесса глубинной заточки твердых сплавов // Сверхтвердые материалы, производство и применение. – К. : ИСМ АН УССР, 1977. – С. 74–77.

210. *Прогрессивные методы абразивной обработки металлов* / И. П. Захаренко, Ю. Я. Савченко, В. И. Лавриненко, С. М. Дегтяренко / Под ред. И. П. Захаренко. – К. : Техніка, 1990. – 152 с.

211. *Сипайлов В. А.* Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М. : Машиностроение, 1978. – 167 с.

212. *Шепелев А. А., Лавриненко В. И., Колосов Д. Э.* Алмазные отрезные круги и тенденции их развития // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов Межд. науч.-техн. конф. г. Севастополь 9–15.09.2002 г. – Донецк : ДонГТУ, 2002. – Т. 3. – С. 121–126.

213. *Браташевский А. Ю., Дудко П. Д.* Инновационные процессы – путь к развитию современных технологий // Резание и инструмент в технологических системах. – 1999. – Вып. 55. – С. 36–40.

214. *Сагарда А. А.* Некоторые вопросы механизма работы алмазного зерна в абразивном инструменте // Вопросы теории и практики резания алмазными инструментами. – К. : УкрНИИНТИ, 1968. – С. 12–14.

215. *Маслов Е. Н., Постникова Н. В.* Основные направления в развитии теории резания абразивным, алмазным и эльборовым инструментом. – М. : Машиностроение, 1975. – 48 с.

216. *Новіков Ф. В., Рябенков І. О.* Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей. – Харьков : ХНЕУ, 2013. – 352 с.

217. *Усов А. В., Донеv Э.* Управление технологическими процессами по критериям качества рабочих поверхностей // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць НТУ «ХП», 2002. – Вип. 1 (5). – С. 259–276.

218. *Доценко В. А.* Изнашивание твердых тел. – М. : ЦИНТИХИМ-НЕФТЕМАШ, 1990. – 192 с.

219. *Амосов М. И., Золотарев Г. Б.* Влияние процесса окисления на коэффициент трения меди // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1974. – № 10. – С. 32–35.

220. *Шустер Л. Ш.* Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. – М. : Машиностроение, 1988. – 96 с.

221. *Bowden F. P., Hanwell A. E.* Friction and wear of diamond in high vacuum // Nature. – 1964. – 201, № 4926. – P. 1279–1282.

222. *Кабалдин Ю. Г., Изотов С. А.* Анализ разрушения тонких покрытий на твердом сплаве при прерывистом резании // Сверхтвердые материалы. – 1987. – № 1. – С. 31–36.

223. *Кабалдин Ю. Г., Бритун В. Ф., Киле А. А.* Повышение работоспособности твердых сплавов с покрытием // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 4. – С. 38–43.

224. *Бойко В. С., Кривенко Л. Ф., Остапенко И. Т.* Исследование акустической эмиссии, сопровождающей микроразрушение карбида бора // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 2. – С. 18–21.

225. Вайнберг В. Е. Метод контроля режущих пластин из твердых сплавов с помощью акустической эмиссии // *Сверхтвердые материалы*. – 1988. – № 5. – С. 32–34.

226. Новиков Н. В., Лысенко О. Г., Девин Л. Н. Исследование акустической эмиссии при точении инструментом из поликристаллических сверхтвердых материалов. Сообщение 1 // *Сверхтвердые материалы*. – 1993. – № 5. – С. 25–30.

227. Новиков Н. В., Филоненко С. Ф., Покладий Г. Г. Акустическая эмиссия при правке абразивных кругов // *Сверхтвердые материалы*. – 1995. – № 3. – С. 24–28.

228. Лошак М. Г. Критерии долговечности твердосплавных элементов аппаратов высокого давления для синтеза сверхтвердых материалов // *Сверхтвердые материалы*. – 2002. – № 4. – С. 61–70.

229. *3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования* : учеб. пособие / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с.

230. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. – М. : Metallurgia, 1975. – 584 с.

231. Кравченко Б. А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке : учебн. пособие. – Куйбышев : КПТИ, 1981. – 90 с.

232. Харламов Ю. О., Клименко С. А., Бадаг'янци М. А. и др. Обробка деталей при відновленні і зміцненні : навчальний посібник. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. – 500 с.

233. Никулкин Б. И., Рогачев В. М. О подавлении автоколебаний при шлифовании // *Электрофизические и электрохимические методы обработки*. – 1973. – Вып. 10. – С. 19–23.

234. *Основы теории резания материалов*: учебник для высш. учебн. заведений / Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.; под общ. ред. Н. П. Мазура и А. И. Грабченко. – 2-е изд. перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

235. Сагарда А. А. Закономерности микрорезания единичным алмазным зерном // *Синтетические алмазы*. – 1969. – Вып. 2. – С. 9–14.

236. Сагарда А. А., Химач О. В. Контактная температура и силовые зависимости при резании алмазным зерном // *Синтетические алмазы*. – 1972. – Вып. 2. – С. 5–9.

237. Сагарда А. А. Особенности трения алмаза по металлам // *Сверхтвердые материалы*. – 1979. – № 3. – С. 23–27.

238. Яцерицын П. И., Аканович В. А. Влияние геометрических параметров алмазного зерна на процесс микрорезания // *Синтетические алмазы*. – Вып. 6. – 1970. – С. 18–21.

239. *Калафатова Л. П., Поезд С. А.* Исследование разрушения хрупких неметаллических материалов при резании // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 92. – Донецьк : ДонНТУ, 2005. – 294 с.

240. *Танович Л.* Дослідження в процесі шліфування кераміки Силініт-Р // Вісник ЖДТУ: Технічні науки, 2001. – С. 280–282.

241. *Хворостецкий В. И.* Исследование процесса алмазного бесцентрового наружного шлифования изделий из твердых сплавов : Автореф. ... канд. техн. наук. – Киев : КПИ, 1973. – 25 с.

242. *Старков В. К.* Физический механизм съема материала при шлифовании // Современные технологии в машиностроении: К юбилею Ф. Я. Якубова: Сб. науч. статей / Под общ. ред. А. И. Грабченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – С. 156–171.

243. *Зубкова М. Я.* Силы резания при шлифовании быстрорежущих сталей кругами из эльбора // Резание и инструмент. – 1971. – Вып. 3. – С. 80–84.

244. *Тагиев Э. А., Гаджиев А. М.* Исследование работоспособности кубонитовых кругов при глубинной заточке инструментов из быстрорежущих сталей // Абразивы. – 1978. – № 12. – С. 2–5.

245. *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В.Новикова и А. В. Якимова.* В 10 томах. – Т. 10. «Концепция развития технологии машиностроения». – Одесса : ОНПУ, 2005. – 565 с.

246. *Сухобрус А. А.* Исследование силовых и энергетических характеристик процесса шлифования хрупких материалов // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 1. – С. 64–69.

247. *Могильников В. А., Гагаев В. И., Жабин О. О.* Особенности микрорезания при алмазно-электрохимическом шлифовании // Электрохимическая размерная обработка деталей машин: Тез. докл. VI Всесоюз. науч.-техн. конф. – Тула : Приокск. кн. изд., 1986. – С. 55–57.

248. *Филимонов Л. Н.* Основные закономерности и перспективы развития высокоскоростного шлифования // Прогрессивные процессы алмазно-абразивной обработки, инструмент и его рациональная эксплуатация: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара, г. Волжский, 14–16 ноября 1982 г. – М. : НИИмаш, 1982. – С. 32–34.

249. *Корж Н. Я.* Некоторые особенности механизма износа алмазных кругов // Сверхтвердые материалы. – 1980. – № 4. – С. 35–42.

250. *Линенко-Мельников Ю. П., Мишнаевский Л. Л.-мл.* Анализ изменения величины выступления алмазных зерен на работающем шлифовальном круге // Сверхтвердые материалы. – 1989. – № 2. – С. 40–44.

251. *Ахундов Э. А.* Исследование процесса заточки инструментов из маловольфрамовых быстрорежущих сталей кругами из кубического нитрида бора: Автореф. ... канд. техн. наук. – К. : ИСМ АН УССР, 1978. – 24 с.
252. *Петасюк О. У.* О поведении алмазного зерна в связке под действием нагрузки // Исследование и применение сверхтвердых и тугоплавких материалов. – К. : ИСМ АН УССР, 1981. – С. 106–110.
253. *Чеповецкий И. Х., Рыжов Э. В., Ильицкий В. Б.* Основы механики контактного взаимодействия при алмазной обработке // Синтетические алмазы. – Вып. 4. – 1976. – С. 9–15.
254. *Сагарда А. А., Чеповецкий И. Х., Мишинаевский Л. Л.* Алмазно-абразивная обработка деталей машин. – К. : Техніка, 1974. – С. 6–16.
255. *Третьяков И. П.* Основные направления в разработке научных основ оценки качества шлифовального инструмента // Современные проблемы резания инструментами из сверхтвердых материалов. Т. 2. Резание алмазно-абразивными инструментами. – Харьков : ХПИ, 1981. – С. 243–245.
256. *Дослідження температури при шліфуванні.* Кагівада Тадао. «Кикай-но кенкю. Sci. Mach.». – 1987. – 39, № 3. – С. 364–368.
257. *Шейн А. В.* Исследование процесса плоского торцового шлифования инструментальных материалов алмазными кругами: Автореф. ... канд. техн. наук. – Куйбышев : КПИ, 1971. – 31 с.
258. *Худобин Л. В.* Пути совершенствования технологии шлифования. – Саратов : Приволж. кн. изд., 1969. – 213 с.
259. *Влияние теплопроводности абразивного круга на процесс плоского шлифования труднообрабатываемых материалов / В. И. Островский, Р. М. Зильберман, В. И. Муцялко и др.* // Абразивы. – 1969. – Вып. 1. – С. 33–40.
260. *Дрожжин В. И.* Эффективность обработки пластмасс и закономерности физических явлений процесса их резания // Резание и инструмент в технологических системах. – 1996. – Вып. 50. – С. 47–51.
261. *Крагельский И. В., Ямпольский Г. Я.* О механизме абразивного износа // Изв. ВУЗов. Физика. – 1968. – № 11. – С. 81–87.
262. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
263. *Бердник В. В.* Шлифование токопроводящими кругами с наложением электрического поля. – К. : Вища школа, 1984. – 124 с.
264. *Резников А. Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
265. *Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы / В. А. Головачев, Б. И. Петров, В. Г. Филимошин и др.* – М. : Машиностроение, 1969. – 198 с.

266. Гродзинский Э. Я., Исакова Р. Б., Зубатова Л. С. Особенности электрохимических, эрозионных и механических процессов при алмазно-электрохимическом шлифовании // Новое в теории и практике применения синтетических сверхтвердых материалов в народном хозяйстве: Секция 3. Синтетические сверхтвердые материалы в металлообработке. – Киев : УкрНИИНТИ, 1977. – С. 51–54.

267. Золотых Б. Н., Ставицкая Н. Б., Якункин М. М. Влияние импульсных тепловых потоков с высокой плотностью мощности на структуру металлов // Международный симпозиум по электрическим методам обработки: Сб. докл. – М. : Внешторгиздат, 1986. – С. 9–11.

268. Позняк Л. А. Перспективы развития инструментальных сталей // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. – К. : Наук. думка, 1998. – С. 502–518.

269. Лякишев Н. П. Конструкционные и некоторые функциональные материалы // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. – К. : Наук. думка, 1998. – С. 284–296.

270. Ortman R. Deutsche und internationale Normung von Schnellarbeitsstählen // TEW-Techn. Ber. – 1975. – 1, № 2. – P. 18–32.

271. Купалова И. К., Павлова В. И. Теплофизические свойства быстрорежущих сталей // Сб. трудов ВНИИ. – 1972. – № 1. – С. 61–70.

272. Синтетические алмазы в машиностроении / В. Н. Бакуль, Б. И. Гинзбург, А. А. Сагарда и др. – К. : Наук. думка, 1976. – 351 с.

273. Актуальность производства в Украине перспективных порошковых быстрорежущих сталей для обработки высокопрочных, жаропрочных и титановых сплавов / Ю. Ф. Терновой, В. Т. Зубкова, А. И. Панченко и др. // Машиностроение и техносфера ХХІ века : Сб. тр. XVII Межд. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 13–18 сентября 2010 г. В 4-х томах. – Донецк : ДонНТУ. Т. 3. – С. 145–149.

274. Коссович Г. А., Нестеров В. Д. Современные маловольфрамовые быстрорежущие стали // Рациональные технологические процессы механической обработки деталей машин. – М. : МДНТП, 1979. – С. 14–18.

275. Свойства и рациональные области применения новых марок быстрорежущих сталей / Л. А. Позняк, Ю. Н. Кузьменко, Б. Э. Натапов и др. // Новые инструментальные материалы и их применение в металлообрабатывающей промышленности. – Киев, 1977. – С. 61–71.

276. Гуляев А. П., Малинина К. А., Саверина С. М. Инструментальные стали. – М. : Машиностроение, 1975. – 272 с.

277. Флид М. Д., Седов В. С. Повышение эффективности обработки резанием и шлифованием новых быстрорежущих сталей // Высокоэффективные процессы обработки резанием конструкционных материалов. – М. : ВИНТИ, 1986. – С. 142–145.

278. *Кайдалов А. А.* Зарубежные аналоги отечественных марок инструментальных сталей // Инструментальный світ. – № 1. – 2005. – С. 31–32.
279. *Коссович Г. А., Саверина С. М.* Новые инструментальные материалы для режущего инструмента // Новые инструментальные материалы и их применение в металлообрабатывающей промышленности. – Киев, 1977. – С. 53–61.
280. *Исследования и опыт внедрения скоростного резания металлов минералокерамическими инструментами.* – Горький, 1957. – 87 с.
281. *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова.* В 10 томах. – Т. 3. «Резание материалов лезвийными инструментами». – Одесса : ОНПУ, 2003. – 546 с.
282. *Кузьменко Ю. Н., Натанов Б. Э., Гусева В. М.* Малолегированная быстрорежущая сталь А11Р3М3Ф2. – Запорожье : НТО ЧМ, 1976. – 3 с.
283. *Graham W., Nee A.* The grinding of tool steels with a diamond abrasive wheel. – Int. J. Mash. Tool Des. and Res. – 1974. – 14, № 2. – P. 175–185.
284. *Шепелев А. А., Лавриненко В. И., Лещук И. В.* Технологии по шлифованию и заточке режущего инструмента кругами из СТМ (метод. рекоменд.). – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2005. – 47 с.
285. *Балла О. М.* Улучшение использования вольфрамсодержащих материалов в режущем инструменте // Вестник машиностроения. – 1992. – № 1. – С. 44–47.
286. *North B.* Sempre piu in campo i ceramici per gli utensili // Riv. Mess. – 1989. – № 40. – P. 44–49.
287. *Виноградов В. Н., Сорокин Г. М., Колокольников М. Г.* Абразивное изнашивание. – М. : Машиностроение. 1990. – 224 с.
288. *Узунян М. Д., Краснощек Ю. С.* Высокопроизводительное шлифование безвольфрамовых твердых сплавов. – М. : Машиностроение, 1988. – 80 с.
289. *Літошенко Н. В.* Закономірності впливу залишкових термічних мікронапружень та дисперсії розмірів карбідних зерен на деформаційні характеристики твердих сплавів WC–Co : Автореф. ... канд. техн. наук. – К. : ИСМ НАН України, 2002. – 23 с.
290. *Александрова Л. И., Лошак М. Г., Горбачева Т. Б. и др.* Рентгенографическое исследование термообработанных твердых сплавов WC–Co // Порошковая металлургия. – 1986. – № 5. – С. 93–98.
291. *Работягин Ю. Д.* Современные инструментальные материалы и режущий инструмент для эффективной обработки // ИТО: инструмент, технология, оборудование. – 2000. – № 2. – С. 86–88.
292. *Abel Robert.* Die Neven Schneidstoffe // Mod. Fertig. – 1988. – № 7. – P. 22–24.

293. Крюков В. К., Крюксов Н. В. Роль контактной среды в повышении работоспособности прецизионного инструмента // Резание и инструмент. – 1998. – Вып. 47. – С. 130–131.
294. Попке Г., Дюбнер Л., Эммер Т. Резервы рационализации при нанесении покрытий на инструмент // Резание и инструмент в технологических системах. – 1996. – Вып. 50. – С. 142–149.
295. Табаков В. П., Смирнов М. Ю., Циркин А. В. Разработка многослойных покрытий для условий прерывистого резания // Резание и инструмент в технологических системах. – 2005. – Вып. 69. – С. 301–310.
296. Клячко Л. И. Обзор свойств и способов производства твердых сплавов и направления их совершенствования // Цветные металлы. – 2006. – № 3. – С. 61–67.
297. Смирнов Ф. Ф., Рыжовский И. М. Твердые сплавы для обработки металлов резанием: Каталог и конструкции № 17. – М. : ВНИИТС, 1965. – 168 с.
298. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – К. : Наук. думка, 1984. – 328 с.
299. Муха И. М. Твердые сплавы в мелкосерийном производстве. – К. : Наукова думка, 1981 – 168 с.
300. ГОСТ 3882-74 «Сплавы твердые спеченные. Марки».
301. Лисовский А. Ф. Формирование градиентной структуры в спеченных твердых сплавах (Обзор) // Сверхтвердые материалы. – № 4. – 2010. – С. 36–53.
302. Новиков Н. В., Герасимович А. В., Григорьев Н. М. Аппарат со скрепленными коническими пуансонами для получения максимальных давлений // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 1. – С. 3–7.
303. Клименко С. А., Муковоз Ю. А., Полонский Л. Г. и др. Точение износостойких покрытий. – К. : Техніка, 1997. – 142 с.
304. Нанашиваемые твердосплавные пластины для режущего инструмента: руковод. матер. – Светловодск : Светкермет, 2002. – 20 с.
305. Лисовский А. Ф. Спеченные твердые сплавы : самоорганизация дефектов и концепция формирования структуры // Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение: Матер. Межд. науч.-техн. конф., 4–6 июля 2001 г., г. Киев. – К. : ИСМ НАН Украины, 2001. – С. 129–131.
306. Лисовский А. Ф., Криворотько О. Д. Некоторые особенности применения спеченных твердых сплавов в горнорезущем инструменте // Инструментальный світ. – 1999. – № 6. – С. 7–9.
307. Моделювання термомеханічного стану елементів апарата високого тиску для синтезу алмазів з розвинутою поверхнею / М. В. Новіков, О. І. Боримський, О. О. Лещук та ін. // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 4. – С. 3–15.

308. Дудкин М. Е., Лошак М. Г., Оситинская Т. Д. и др. Теплопроводность и износ твердосплавных режущих элементов после термической обработки // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 2. – С. 35–38.

309. Приведенные справочные материалы по применению продукции АО «Московский комбинат твердых сплавов», представлены официальным представителем комбината на Беларуси предприятием «Реал» // Мир инструмента (Беларусь). – 1995. – № 2. – С. 16–17.

310. Чичварина С. И., Очкасов В. Ф., Чистякова В. А. Физико-механические свойства сплавов WC-Co различного состава и структуры при статических испытаниях // Исследование свойств твердых сплавов и вопросы их применения: Науч. тр. ВНИИТС. – М. : Металлургия, 1989. – С. 52–57.

311. Применение плазменных порошков вольфрама в производстве мелкозернистых твердых сплавов / В. А. Чистякова, М. С. Янговская, А. В. Федоров, В. В. Цветков // Качество и эффективность применения твердых сплавов : Сб. научн. тр. – М. : Металлургия, 1984. – С. 22–25.

312. Емельянова Т. А., Геллер Е. И., Аникеев А. И. и др. Твердые сплавы с ультрамелкозернистой структурой для мелкоразмерного инструмента // Свойства и применение спеченных твердых сплавов: Сб. науч. тр. – М. : ВНИИТС, 1991. – С. 116–122.

313. Иванов С. А., Дутка В. А., Майстренко А. Л. Моделирование процесса интенсивного электроспекания композиционных алмазосодержащих материалов на связке из твердых сплавов WC-Co группы // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия и сварка : Матер. докл. 6-й Межд. конф., Минск, 6–7 апреля 2004. – Минск : БГ НПК ПМ НАНБ, 2004. – С. 255–256.

314. Безвольфрамовые твердые сплавы КТС : Рекламное издание. – К. : ОКТЬ ИПМ АН УССР, 1982. – 4 с.

315. Середа Н. Н., Ковальченко М. С., Цыбань В. А. и др. Физико-механические и усталостные свойства твердых сплавов на основе карбида титана // Порошковая металлургия. – 1985. – № 3. – С. 74–78.

316. Особенности физико-механических и эксплуатационных свойств регенерируемых вольфрамокобальтовых твердых сплавов / М. В. Коровкин, Р. В. Рыбальченко, П. И. Алексеева, Г. В. Зайцева // Качество и эффективность применения твердых сплавов : Сб. науч. тр. – М. : Металлургия, 1984. – С. 36–38.

317. Шульженко А. А., Гаргин В. Г., Бочечка А. А. Алмазный композиционный термостойкий материал (АКТМ) и области его применения // Инструментальный світ. – 2002. – № 1. – С. 8–9.

318. Чистякова В. А., Карасев Г. Ф., Сапронова З. Н. Ультрамелкозернистый твердый сплав для чистовой и получистовой обработки труднообрабатываемых материалов // Исследование свойств твердых сплавов

и вопросы их применения: Науч. тр. ВНИИТС. – М.: Металлургия, 1989. – С. 17–19.

319. *Применение* спеченных твердых сплавов WC–Co типа «КС» для долот нефтяного бурения / Г. В.Линдо, В. А.Чистякова, В. П.Аристов, Б. Т. Аргошашвили // *Качество и эффективность применения твердых сплавов* : Сб. научн. тр. – М. : Металлургия, 1984. – С. 42–46.

320. *Юрчук Н. А., Радченко А. К.* Твердосплавные прокатные шайбы из сплава VK7,5N7,5 // *Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение: Матер. Межд. науч.-техн. конф., 4–6 июля 2001 г., г. Киев.* – К. : ИСМ НАН Украины, 2001. – С. 170–171.

321. *Деформация* твердых сплавов WC–Co при микровдавливании индентора / В. И. Туманов, Л. А. Конюхова, В. Ф. Очкасов, И. П. Рагозин // *Качество и эффективность применения твердых сплавов* : Сб. научн. тр. – М. : Металлургия, 1984. – С. 38–42.

322. *Семилетова Г. Е., Куралина М. В., Баженов Е. М.* и др. Твердый сплав для пуансонов холодного выдавливания // *Свойства и применение спеченных твердых сплавов: Сб. науч. тр.* – М. : ВНИИТС, 1991. – С. 122–126.

323. *Юрчук Н. А.* Применение твердого сплава VN20 в качестве инструментального материала при производстве метизов // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технологии его изготовления и применения: Сб. научн. тр. – Вып. 7.* – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2004. – С. 277–280.

324. *Головин С. А., Спиринов В. И., Петрушин Г. Д.* и др. Демпфирующая способность материалов алмазной буровой коронки // *Сверхтвердые материалы.* – 2003. – № 2. – С. 68–75.

325. *Лисовский А. Ф., Диденко С. И., Грачева Т. Э.* Повышение стойкости твердосплавного инструмента после обработки металлическим расплавом // *Сверхтвердые материалы.* – 1989. – № 5. – С. 47–50.

326. *Мойнова Н. В., Очкасов В. Ф.* Износ безвольфрамовых твердых сплавов при различных условиях истирания // *Современные инструментальные материалы на основе тугоплавких соединений: Сб. научн. трудов.* – М. : Металлургия, 1985. – С. 55–59.

327. *Виноградов А. А.* Температуры при резании сталей инструментами из твердого сплава и сверхтвердых материалов // *Сверхтвердые материалы.* – 1988. – № 4. – С. 58–62.

328. *Гайда А. В.* Влияние температуры плавления припоя на износ инструмента // *Совершенствование конструкций и процессов изготовления режущего и измерительного инструментов и технологической оснастки: Тез. докл. науч.-техн. конф.* – Киров : КПИ, 1988. – С. 4–6.

329. Лавриненко В. И., Федоренко В. Т. Технологические и энергетические аспекты учета и обеспечения структурной организации в рабочем слое шлифовальных кругов из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 4. – С. 89–95.

330. Малышев В. И., Янюшкин Ю. М. Контактные температуры при алмазной правке шлифовальных кругов // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 5. – С. 48–54.

331. Основы алмазного шлифования / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, А. Ф. Раб и др. – К. : Техніка, 1978. – 192 с.

332. Рогов В. В. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей. – К. : Наук. думка, 1985. – 264 с.

333. Чеповецкий И. Х., Бараболя А. В. Силы и температуры при антифрикционном плосковершинном хонинговании // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 1. – С. 57–61.

334. Шепелев А. А., Лавриненко В. И. Особенности массопереноса твердого сплава на режущую поверхность круга при алмазном шлифовании // Резание и инструмент в технологических системах. – 1996. – Вып. 50. – С. 204–206.

335. Швейкин Г. П., Элинсон Д. С., Любимов В. Д. Перспективы применения нового безвольфрамового твердого сплава ЛЦК20 // Прогрессивный твердосплавный режущий инструмент. – Свердловск : Дом техники НТО, 1987. – С. 6–7.

336. О связи между механическими характеристиками и микроструктурой твердых сплавов системы TiC–Ni–Mo / М. Г. Лошак, А. Н. Пилянкевич, Т. А. Шаповал и др. // Сверхтвердые материалы. – 1985. – № 2. – С. 28–26.

337. Емельянов А. Н., Каримов Ю. С. Температуропроводность безвольфрамового сплава СТИМ-3Б // Порошковая металлургия. – 1986. – № 11. – С. 75–79.

338. Меркулов В. Н. Новые инструменты для обработки труднообрабатываемых материалов. – К. : УкрНИИНТИ, 1986. – 52 с.

339. Чмир М. Я., Могильников В. А., Троицкий Н. А. и др. Взаимодействие синтетических алмазов с обрабатываемыми материалами при алмазном и алмазно-электрохимическом шлифовании // Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов : Сб. научн. трудов. – Тула : ТПИ, 1991. – С. 52–59.

340. Исследования поверхности алмазов, образующийся при микрорезании металлов / А. С. Вишневский, В. Г. Делеви, А. Ф. Никитюк и др. // Синтетические алмазы. – 1973. – Вып. 1. – С. 12–15.

341. Методические указания по электрохимическому глубинному алмазному шлифованию сменных многогранных пластин из безвольфра-

мовых твердых сплавов / И. П. Захаренко, В. Ю. Солод, В. И. Лавриненко и др. – К. : ИСМ АН УССР, 1987. – 16 с.

342. *Тугоплавкие материалы в машиностроении: Справочник* / Под ред. А. Т. Туманова и К. И. Портного. – М. : Машиностроение, 1967. – 392 с.

343. *Захаренко И. П., Дегтяренко С. М., Лавриненко В. И.* Влияние методов шлифования на температуру поверхностного слоя // Резание и инструмент. – 1985. – Вып. 34. – С. 121–124.

344. *Войтович Р. Ф.* Окисление карбидов и нитридов. – К. : Наук. думка, 1981. – 192 с.

345. *Самсонов Г. В., Винницкий И. М.* Тугоплавкие соединения. – М. : Металлургия, 1976. – 560 с.

346. *Лосева Н. Р.* Исследование путей повышения качества инструмента из быстрорежущих сталей и экономичности процесса затачивания: Автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.03.01/ТПИ. – Тула, 1980. – 22 с.

347. *Аникин В. Н., Блинков И. В., Верещака А. С.* Высокопрочная градиентная керамика с покрытием // Высокие технологии: развитие и кадровое обеспечение. Материалы XI Межд. науч.-техн. семинара 12–17 сентября 2001 г. – Харьков-Алушта : НТУ «ХПИ», 2001. – С. 3–10.

348. *Геворкян Э. С., Гуцаленко Ю. Г.* Керамика на основе оксида хрома для высокоскоростных режущих инструментов и износостойких деталей машин // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : Тр. 8-й Межд. науч.-техн. конф., 9–10 декабря 2003 г. – Харьков : ХНПК «ФЭД», 2003 г. – С. 134–136.

349. *Белявцев Н. В., Руднев А. В., Узунян М. Д.* Исследование обрабатываемости инструментальной керамики «Бихромит-Р» методом алмазно-искрового шлифования // Резание и инструмент в технологических системах. – 2006. – Вып. 70. – С. 32–37.

350. *Новый режущий материал «БИХРОМИТ»* // Сверхтвердые материалы. – 1996. – № 2. – С. 85.

351. *Лавриненко Л. Н., Лавриненко В. И., Пугач Э. А.* Окисление инструментальной керамики // Известия АН СССР: Неорганические материалы. – 1990. – Т. 26. – № 5. – С. 1079–1081.

352. *Пупань Л. И., Кононенко В. И., Дюбнер Л. Г.* Микроиндентирование как метод прогнозирования обрабатываемости хрупких материалов // Високі технології в машинобудуванні : Зб. наук. пр. НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2002. – Вип. 1(5). – С. 311–316.

353. *Аникин В. Н., Фадеев В. С., Максимов А. А.* и др. Изнашивание и разрушение оксидной керамики при обработке конструкционных материалов // Цветные металлы. – 1989. – № 8. – С. 97–100.

354. *Трещиностойкость керамики на основе оксидов алюминия и циркония* / Т. И. Горшкова, И. В. Истратова, А. А. Кудинова и др. // Свой-

ства и применение спеченных твердых сплавов: Сб. науч. тр. – М. : ВНИИТС, 1991. – С. 40–47.

355. *Панов А. А.* Режущий инструмент из синтетических сверхтвердых материалов и керамики // Вестник машиностроения. – 1990. – № 1. – С. 54.

356. *Оценка работоспособности и выбор метода испытаний минералокерамики для обработки резанием / В. С. Фадеев, В. Н. Аникин, А. В. Конаков и др.* // Цветные металлы. – 1988. – № 11. – С. 75–77.

357. *Долгов Н. В., Попов С. П.* Влияние электропроводности минералокерамики на режимы электроабразивной обработки // Электрохимическая размерная обработка деталей машин: Тез. докл. VI Всесоюз. науч.-техн. конф. – Тула : Приокск. кн. изд., 1986. – С. 130–131.

358. *Кацура А. А., Семенов А. П.* Высокотемпературное трение окисных керамик на основе корунда. – М. : Наука, 1974. – 120 с.

359. *Пилянкевич А. Н., Мельникова В. А., Кулик А. И.* Механизм структурообразования и дефектность керамики в системе Al_2O_3-TiC // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 5. – С. 17–21.

360. *Примак Л. П., Александрова Л. И.* Влияние алмазной обработки на прочность керамики // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 3. – С. 70–72.

361. *Танович Л.* Механизм шлифования режущей керамики // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования: Сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. – Киев, 2002. – С. 524–529.

362. *Обработка полупроводниковых материалов / Под ред. Н. В. Новикова, А. Бертольди.* – К. : Наук. думка, 1982. – 256 с.

363. *Dow Thomas A., Fawcett Steven C., Scattergood Ronald O.* Ductile regime grinding of brittle materials // NISI/DARPA Workshop Ceram. Bear. Technol., Gaithersburg, Md, Apr. 17–18, 1991. – NISI Spec. Publ. – 1991. – № 824. – P. 169–179.

364. *Шепелев А. А., Пасичный О. О., Лавриненко В. И.* Прецизионная алмазная обработка керамических шаров: показатели качества // Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение: Матер. Межд. научн.-техн. конф. 4–6 июля 2001 г., Киев. – К. : ИСМ НАН Украины, 2001. – С. 178–179.

365. *Ситник О. О., Лавріненко В. І.* Термостійкість різальної кераміки // Техніка в сільському господарстві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. праць КДТУ. – Кіровоград : КДТУ, 1999. – Вип. 5. – С. 23–24.

366. *Сытник А. А., Зленко А. А.* Математическое прогнозирование выбора оптимального состава слоистых режущих пластин по термомехани-

ческой совместимости // Резание и инструмент в технологических системах. – 1999. – Вып. 55. – С. 23–27.

367. *Ситник О. О., Зленко Д. О.* Термомеханічна та термодинамічна сумісність компонентів шаруватого іструментального кермету // Вісник ЖІТІ: Технічні науки. – 2001. – Спецвипуск. – С. 160–164.

368. *Коваленко А. Д.* Термоупругость. – К. : Вища школа, 1975. – 187 с.

369. *Федичкин Г. М., Липецкий Я. Л.* Исследование процессов испарения и окисления при спекании магнитов РЗМ- Co_5 // Сплавы редких металлов с особыми физико-химическими свойствами. – М. : Наука, 1975. – С. 41–44.

370. *Афонин М. Д., Лохматов В. К.* Влияние ГТДВ на обрабатываемость магнитотвердых сплавов // Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов. – Краснодар, 1985. – С. 93–94.

371. *Гавриш А. П.* Финишная алмазно-абразивная обработка магнитных материалов // Прогрессивные процессы шлифования, инструмент и его рациональная эксплуатация: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – М., 1986. – С. 200–202.

372. *Лавриненко В. И., Шепелев А. А., Шкляренко В. В.* Силовые показатели алмазного шлифования магнитотвердых материалов // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 2. – С. 47–50.

373. *Попов С. А., Малевский Н. П., Терещенко Л. М.* Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М. : Машиностроение, 1977. – 263 с.

374. *Кащеев В. Д., Мордехай В. М., Осипов А. Н.* Особенности электрохимической обрабатываемости литых магнитных сплавов // Электрохимическая размерная обработка деталей машин : Тез. докл. VI Всесоюз. науч.-техн. конф. – Тула : Приокское книжн. изд-во, 1986. – С. 34–38.

375. *Лавриненко В. И., Бровченко А. М.* Исследование условий обеспечения бездефектной обработки магнитотвердых сплавов кругами из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 2006. – № 1. – С. 57–64.

376. The use of a floating graphite nozzle for supplying coolant during in-process electrodischarge dressing of metal bond diamond wheels / *K. Suzuki, M. Iwai, S. Ninomiya at al.* // www.diamondatwork.com – 2nd International Industrial Diamond Conference: 19–20 April, 2007, Rome, Italy.

377. Controlling coolant flow with a flexible metal sheet during in-process electrolytic dressing of metal bond diamond wheels / *K. Suzuki, M. Iwai, S. Ninomiya at al.* // www.diamondatwork.com – 2nd International Industrial Diamond Conference: 19–20 April, 2007, Rome, Italy.

378. *Электроэрозионная обработка деталей короткой дугой / Рекламное издание, 05.2007 // www.motorsich.com – 2007.*

379. *Tanaka M., Fukushima K., Ohshita H.* Development of a new metal bond wheel named MB SPARK for the double disk grinding process // www.diamondatwork.com – 2nd International Industrial Diamond Conference: 19–20 April, 2007, Rome, Italy.

380. *Marinescu I.D., Ohmori H., Sachdeva G.* Intelligent Monitoring Of ELID Grinding Process // www.diamondatwork.com – 2nd International Industrial Diamond Conference: 19–20 April, 2007, Rome, Italy.

381. Precise Profile Forming by Combining EDM and Grinding with a Same PCD Tool / *K. Suzuki, S. Sano, W. Pan at al.* // www.diamondatwork.com – 2nd International Industrial Diamond Conference: 19–20 April, 2007, Rome, Italy.

382. A New Application of PCD as a Very Low Wear Electrode Material for EDM / *K. Suzuki, S. Sano, W. Pan at al.* // www.diamondatwork.com – 2nd International Industrial Diamond Conference: 19–20 April, 2007, Rome, Italy.

383. *Бочечка О. О.* Наукові основи спікання композитів на основі алмазу при високому тиску: Автореф. ... докт. техн. наук. – К. : IHM НАН України, 2002. – 35 с.

384. *Jain V. K., Tandon S., Kumar P.* Experimental investigation into electrochemical spark machining // *Trans. ASME. J. Eng. Ind.* – 1990. – 112, № 2. – P. 194–197.

385. *Hanasaki S., Toige M.* Study of the electrolytic grinding mechanism using a single-diamond cutting tool with a wear flat area // *Wear.* – 1990. – 139, № 2. – P. 285–301.

386. *Сирадзе А. М.* Особенности обработки природных алмазов и способ их безабразивной обработки // *Резание и инструмент.* – 1991. – № 46. – С. 93–98.

387. *Kenter I. M.* Einfluss der Prozessparameter auf Materialabtrag beim Schleifen von PKD // *Industrie Diamanten Rundschau.* – 1991. – № 25. – P. 246–252.

388. *Грабченко А. И., Федорович В. А., Кундрак Я.* Методология 3D моделирования процессов в технологии алмазно-композиционных материалов // *Сучасні технології в машинобудуванні : Зб. наук. статей.* – Харків : НТУ «ХП», 2007. – С. 269–287.

389. Development of New Electrical Method with Electrically Conductive Diamond Cutting Edge Grinding Wheel / *K.Suzuki, M.Iwai, S.Ninomiya at al.* // www.diamondatwork.com – 1st International Industrial Diamond Conference, 20–21 oct. 2005, Barcelona, Spain.

390. *Седыкин Ф. В.* Размерная электрохимическая обработка деталей машин. - М.: Машиностроение, 1976. – 302 с.

391. Гродзинский Э. Я., Зубатова Л. С., Маконовицкая А. Т. Новые электролиты для электрохимических шлифовальных станков // Новые виды механической и электрохимической обработки. – М : НИИМаш, 1974. – С. 76–80.

392. Чеченя В. Н., Мороз И. И., Коминар С. И. Контроль эффективной электропроводности электролита // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1978. – Вып. 5. – С. 3–4.

393. Электропроводность среды при абразивно-электрохимическом шлифовании / Э. Я. Гродзинский, Л. С. Зубатова, Р. Б. Исакова и др. // Электрофизич. и электрохимич. методы обработки. – 1977. – № 6. – С. 3–6.

394. Львов В. Н., Сафронов В. Г. Электроалмазная обработка металлов и сплавов. Обзор. – М. : НИИМаш, 1978. – 67 с.

395. Румянцев Е. М., Волков В. И., Крестов Г. А. Роль поверхностных пленок в процессах высокоскоростного анодного растворения металлов и сплавов // Изв. ВУЗов: Химия и химическая технология. – 1983. – Т. 26, Вып. 10. – С. 1193–1200.

396. Румянцев Е. М. Взаимосвязь формы поляризационной кривой и электрофизических характеристик поверхностных пленок при ЭХО (на примере титана) // Электрохимическая размерная обработка деталей машин. – Тула : ТулПИ, 1986. – С. 67–71.

397. Дамаскин Б. Б. Петрий О. А. Введение в электрохимическую кинетику. – М. : Высшая школа, 1975. – 416 с.

398. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поли-кристаллов. – М. : Физматгиз, 1961. – 863 с.

399. Сурду Н. В. Влияние наводораживания обрабатываемой поверхности на эффективность шлифования // Вісник Інженерної академії України. – № 3. – Ч. 1. – 2001. – С. 497–499.

400. Лавриненко В. И. Катодные пленки при электрохимическом шлифовании кругами из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 1996. – № 2. – С. 56–61.

401. Рыжов Э. В., Беззубенко Н. К., Серова Н. Н. Состояние поверхности металлических связок круга при алмазно-искровом шлифовании // Сверхтвердые материалы. – 1996. – № 1. – С. 58–62.

402. Рыжов Э. В., Серова Н. Н., Беззубенко Н. К. Качество поверхности при алмазно-искровом шлифовании // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 6. – С. 53–59.

403. Матюха П. Г., Кононов А. Е. Исследование параметров рельефа круга при алмазно-искровом шлифовании // Современные проблемы резания инструментами из сверхтвердых материалов. Том 2. Резание алмазно-абразивными инструментами. – Харьков : ХПИ, 1981. – С. 149–152.

404. *Балкевич В. Л.* Техническая керамика. – М. :Стройиздат, 1984. – 256 с.
405. *Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л.* Физические свойства металлов и сплавов. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
406. *Орешкин П. Т.* Физика полупроводников и диэлектриков. – М. : Высшая школа, 1977. – 350 с.
407. *Керметы / П. С. Кислый, Н. И. Боднарук, М. С. Боровикова и др.* – К. : Наук. думка, 1985. – 272 с.
408. *Скороход В. В.* Об электропроводности дисперсных смесей проводников с непроводниками // Инженерно-физический журнал. – 1959. – № 8. – С. 51–58.
409. *Лавриненко В. И., Селезнева Н. П., Зленко А. А.* Оценка электросопротивления режущей керамики и ее электроалмазное шлифование // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 4. – С. 49–53.
410. *Агте К., Колерман Р., Хеймел Э.* Минералокерамические режущие инструменты. – М. : Машгиз, 1962. – 191 с.
411. *Кончиц В. В., Мешков В. В., Мышкин Н. К.* Триботехника электрических контактов. – Минск : Наука и техника, 1986. – 256 с.
412. *Лавриненко В. И., Дегтяренко С. М., Шклярченко В. В.* Особенности электрической правки шлифовальных кругов из СТМ // Электронная обработка материалов. – 1994. – № 6. – С. 54–55.
413. *Дослідження впливу плазмової обробки на різальну поверхню шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів / В. І. Лавріненко, В. О. Скрыбін, В. В. Смоквина та ін.* // Сверхтвердые материалы. – 2010. – № 5. – С. 81–87.
414. *Федорченко И. М., Пугина Л. И.* Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – Киев : Наук. думка, 1980. – 404 с.
415. *Зозуля В. Д.* Эксплуатационные свойства порошковых подшипников. – Киев : Наук. думка, 1989. – 210 с.
416. *Тишин О. И., Шаповалов В. И., Еременко Н. Д.* Теплопроводность анизотропного пористого материала на металлической основе / Днепропетров. металлург. ин-т. – Днепропетровск, 1988. – 14 с. – Деп. в УкрНИИНТИ.
417. *Лавриненко В. И., Высоцкий А. С., Еременко Н. Д.* Шлифование литого пористого белого чугуна кругами из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 1990. – № 5. – С. 61–66.
418. *Заболотный Л. В., Мамыкин Э. Т.* Влияние состояния поверхности на предельное давление схватывания металлокерамических антифрикционных материалов // Повышение износостойкости антифрикционных материалов: Тез. докл. – Киев : Ин-т пробл. Материаловедения АН УССР, 1976. – Т. 3. – С. 43–48.

419. *Баканин Г. Н., Любченко А. П., Можаров М. В.* Влияние шероховатости поверхности трения на износостойкость // Пробл. трения и изнашивания. – 1984. – № 5. – С. 85–88.

420. *Белов В. С.* Пористые материалы в машиностроении. – М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.

421. *Гордиенко П. Л., Гордиенко С. Л.* О влиянии электрического тока на износ при трении металлических тел // Вестник машиностроения. – 1952. – № 7. – С. 23–25.

422. *Дубинин А. Д.* Энергетика трения и износа деталей машин. – М. : Машгиз, 1963 – 137 с.

423. *Коробов Ю. М.* Влияние термоэлектрических явлений, возникающих при резании, на износ инструмента // Станки и инструменты. – 1968. – №3. – С. 25–26.

424. *Якунин Г. И., Мирбабаев В. А., Абрамян Я. П.* Повышение стойкости твердосплавных резцов при введении в зону резания электрического тока и газообразного кислорода // Известия АН УзбССР. Серия технических наук. – 1965. – № 6. – С. 19–21.

425. *Коробов Ю. М.* Влияние электрического тока на процесс резания металлов // Труды ЛПИ – 1965. – № 250. – С. 86–88.

426. *Аваков А. А., Рыжкин А. А.* Повышение стойкости спиральных сверл методом термоэлектрической компенсации // Станки и инструмент. – 1965. – № 12 – С. 14–16.

427. *Бобровский В. А.* Влияние термоэлектрических токов на износ инструмента при резании металлов // Электрические явления при трении и резании металлов. Под ред. М. М. Хрущева, В. А. Бобровского. – М. : Наука, 1969. – С. 7–26.

428. *Axer H.* Zur Physik des Werkzeugverschleiß. Fertigungs Technik und moderne Werkzeugmaschinen // 7. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, 1954. – Essen. – 1954. – S. 56–57.

429. *Axer H.* Beitrag zur Erforschung der Verschleißursachen an spannenden Werkzeugen // Industrie-Anzeiger, 7 Juni 1955. – Essen. – 1955. – S. 610–614.

430. *Opitz H.* Das Temperaturfeld am Drehmeißel und die Reaktionen in der Kontaktzone // Mikrotechnik. – № 4, Band VIII. – 1954. – S. 34–35.

431. *Васильев С. В.* ТермоЭДС при резании как характеристика качества твердосплавных пластинок // Станки и инструменты – 1976. – № 5. – С. 27–28.

432. *Палей С. М.* Контроль состояния режущего инструмента по ЭДС резания // Станки и инструменты. – 1996. – № 10. – С. 21–25.

433. *Матвеев А. Н.* Электричество и магнетизм. – М. : Высшая школа, 1983. – 463 с.

434. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Курс теоретической физики: В 10 т., Т. 3. Электростатика. – М. : Физматлит, 2002. – 224 с.
435. Лёб Л. Статическая электризация. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
436. Чеботарев Ю. В., Фокина Я. В. Классификация электромагнитных явлений в триботехнике // Вестник ДГТУ. – 2006. – Т. 6. – № 1(28). – С. 78–81.
437. Постников С. Н. Электрические явления при трении и резании. – Горький : Волго-Вятское кн. изд-во, 1975. – 280 с.
438. Коробов Ю. М., Прейс К. А. Электромеханический износ при трении и резании металлов. – К. : Техніка, 1976. – 200 с.
439. Бобровский В. А. Электродиффузионный износ инструмента. – М. : Машиностроение, 1970. – 202 с.
440. Кащеев В. Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. – М. : Машиностроение, 1978. – 213 с.
441. Постников С. Н., Янишина А. Н. Инверсия термоэлектродвижущей силы при трении металлов // Труды Горьковского политехнического института. – 1968. – Вып. 4. – С. 917–924.
442. Васильев С. В. ЭДС и электрическая проводимость в зоне резания // Станки и инструмент. – 1979. – № 8. – С. 30–31.
443. Еремеев В. В. Исследование и разработка метода автоматизированного назначения режимов обработки для токарных станков с ЧПУ на основе измерения термоЭДС зоны резания // Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. – Волгоград, 1999.
444. Дубров Ю. С., Николаева Г. С. Электроэрозионный износ режущих инструментов и влияние электрических явлений на частоту обработанной поверхности // Электрические явления при трении и резании металлов. Под ред. М. М. Хрущова, В. А. Бобровского. – М. : Наука, 1969. – С. 56–69.
445. Бородай К. В., Феник Л. Н., Матвиенко А. В. Проблема электро-механического износа инструмента при резании металлов в современных исследованиях // Донецк : ДонНТУ. – 2006. – С. 42–46.
446. Васильев С. В. ЭДС и температура резания // Станки и инструмент. – 1980. – № 10. – С. 20–22.
447. Плотников А. Л. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования на основе оперативной информации о свойствах инструмента и детали // Диссертация на соискание степени доктора технических наук. – Саратов, 2001.
448. Бобровский В. А. Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел. – М. : Наука, 1973. – 147 с.

449. *Аваков А. А., Дубров Ю. С., Николаева Г. С.* Исследование эффекта повышения износостойкости твердосплавных режущих пластинок // Известия ВУЗов. – 1965 – № 3. – С. 55–58.

450. *Дубров В. С.* Исследование эффекта повышения износостойкости твердосплавных режущих пластинок // Изв. ВУЗов. – 1967. – № 3. – С. 43–46.

451. Патент 2496629 России, В23 Q17/09. Способ контроля состояния режущих кромок сборных многолезвийных инструментов / А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, А. Ю. Горелова.

452. Патент 2239522 России, В23В1. Способ определения допустимой скорости резания при механической обработке детали твёрдосплавным инструментом / А. Л. Плотников, А. О. Таубе.

453. Патент 2430812 России, G01K7/02, В23В1. Термоэлектрический способ определения нагрева рабочих поверхностей режущего инструмента / Т. И. Ногачева, Ю. А. Бокурова, С. Ф. Кондорф.

454. Патент 2492968 России, В23В25/06. Способ определения параметра шероховатости на токарных станках с ЧПУ при получистовой и чистовой обработке металла твердосплавным инструментом / А. С. Сергеев, А. Л. Плотников, Н. Г. Зайцева.

455. *Рыжкин А. А.* Влияние электрического тока на износ при резании // Электрические явления при трении и резании металлов. Под ред. М. М. Хрущова, В. А. Бобровского. – М. : Наука, 1969. – С. 70–82.

456. *Дубинин А. Д.* Трение и износ в деталях машин. – М. : Машгиз, 1952. – 121 с.

457. *Коробов Ю. М.* Исследование процесса чистового точения и сопровождающих его термоэлектрических явлений // Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. – Ленинград, 1965.

458. *Епифанов Г. И., Плетнева И. Л., Ребиндер П. А.* О механизме действия активных сред при резании металлов // Докл. АН СССР, Новая серия. – № 3. – 1952. – С. 56–62.

459. *Бобровский В. А., Соловьев Ю. А.* Борьба с влиянием термотоков на износ фрез // Электрические явления при трении и резании металлов. Под ред. М. М. Хрущова, В. А. Бобровского. – М. : Наука, 1969. – С. 97–107.

460. *Галей М. Т.* Экспериментально-теоретические работы по изучению некоторых явлений при резании и трении металлов // Электрические явления при трении и резании металлов. Под ред. М. М. Хрущова, В. А. Бобровского. – М. : Наука, 1969. – С. 27–34.

461. *Лысов Б. Н.* Исследование электрических явлений, сопровождающих процесс шлифования, и пути их использования // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Челябинск, 1972.

462. А.с. СССР № 211350, В24В01/04. Способ определения величины съема припуска / Б. Н. Лысов, А. Д. Шереметьев.

463. Шор Г. И., Ланин В. П. О проявлении электрического поля в процессе применения смазочных масел // Электрические явления при трении и резании металлов. Под ред. М. М. Хрущева, В. А. Бобровского. – М. : Наука, 1969. – С. 108–115.

464. Hughes F., Notter. A. // Indust. Diamond Rev. – 1966. – 26, № 307. – P. 312.

465. Лавріненко В. І., Ситник Б. В., Девицький О. А. Дослідження зміни напруженості електростатичного поля при шліфуванні // Високі технології в машинобудуванні. Зб. наук. праць НТУ «ХП», – Харків : НТУ «ХП», 2008. – С. 215–220.

466. Девицький О. А. Електризація при шліфуванні та фактори, що визначають її виникнення // Тези доповіді до IV конференції молодих вчених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування». – К. : ІНМ НАНУ, 2008. – С. 11–14.

467. Методичні рекомендації по процесам абразивної обробки кругами з НТМ з додатковим електрофізичним впливом на контактні поверхні / В. І. Лавріненко, В. О. Скрябін, О. А. Девицький та ін. – К. : ІНМ ім. В. М. Бакуля НАНУ, 2011. – 36 с.

468. Лавріненко В. І., Девицький О. А., Ситник Б. В. Електричні явища в процесах механічної обробки, їх взаємозв'язок з продуктивністю та енергоємністю оброблювання та способи ефективного застосування цих явищ // Прогресивні технології і системи машинобудування. Міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк : ДНТУ. – 2009. – Вип. 38. – С. 122–126.

469. Електричні явища при абразивній обробці кругами зі скло покриттям та модифікаційними домішками / В. І. Лавріненко, О. А. Девицький, Б. В. Ситник та ін. // Тези доповіді до 9-ї Міжн. наук.-практ. конф. «Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика» (21–25 вересня 2009 р., Крим, м. Ялта). – К. : АТМУ, 2009 – С.100–103.

470. Кухаренко С. А., Лавріненко В. І., Девицький О. А. и др. Эксплуатационные свойства стеклопокрытий для порошков СВН // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К. : ИСМ НАНУ. – 2010. – Вып. 13. – С. 465–470.

471. Вплив функціональних домішок у робочому шарі кругів з НТМ та покриттів зерен на процеси електризації при шліфуванні / В. І. Лавріненко, О. А. Девицький, Б. В. Ситник та ін. // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць ЖДТУ. – Житомир : ЖДТУ – 2010. – Вип. 9. – С. 92–97.

472. *Композити на основі мікропорошків КНБ, структурованих вуглецевою зв'язкою, як функціональні елементи в структурі робочого шару алмазно-абразивного інструмента. Повідомлення 2. Композити як опорні елементи* / В. І. Лавріненко, Б. В. Ситник, О. О. Бочечка та ін. // *Сверхтвердые материалы*. – 2014. – № 5. – С. 53–60.

473. *Инструменты и технологии, разработанные ИСМ им. В. М. Бакуля НАН Украины в 2011 г.* / Н. В. Новиков, Л. Ф. Головкин, С. А. Клименко и др. // *Інструментальний світ*. – 2012. – № 1(53). – С. 4–7.

474. *Исследование возможностей эффективного использования минеральных зернистых концентратов в качестве опорных элементов в рабочем слое алмазных кругов* / В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод, Б. В. Сытник и др. // *Сверхтвердые материалы*. – 2012. – № 1. – С. 75–83.

475. *Особенности термоЕРС при обработке кругами з НТМ* / В. І. Лавріненко, О. А. Девіцький, С. А. Кухаренко та ін. // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.* – К. : ИСМ НАНУ. – 2011. – Вып. 14. – С. 529–533.

476. *Лавріненко В. І., Девіцький О. А., Пасічний О. О.* Вплив характеристик робочого шару кругів з надтвердих матеріалів на термоЕРС при шліфуванні // *Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки»*. – Житомир : ЖДТУ. – 2011. – № 3(58). – С. 67–71.

477. *К вопросу об изменении фрикционных свойств алмазно-абразивного инструмента в процессе обработки* / В. И. Лавриненко, Б. В. Сытник, В. А. Скрябин и др. // *Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжн. зб. наук. праць*. – Донецьк : ДонНТУ. – Вип. 36. – 2008. – С. 89–93.

478. *Девіцький О. А., Смоквина В. В.* Вплив твердого змащення на електричні явища при обробленні кругами з НТМ // *Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування: Тези доповідей VI конф. молодих вчених та спеціалістів, 29–31 травня 2012 р., м. Київ*. – К. : ІНМ ім. В. М. Бакуля НАНУ. – 2012. – С. 24–25.

479. *Смоквина В. В., Девіцький О. А.* Застосування твердих мастил в процесах шліфування кругами з НТМ // *Тези доповіді до 12-ї Всеукр. молодіжн. наук.-техн. конф. «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво»*. – К. : НТУУ «КПІ» – 2012. – С. 108–110.

480. *Шматов В. Е.* Исследование процесса торцового шлифования быстрорежущих сталей кругами из синтетических алмазов и кубонита в различных средах : Автореф. ... канд. техн. наук. – Горький : ГПИ, 1970. – 22 с.

481. *Смазочно-охлаждающие* технологические средства для обработки металлов резанием : справочник / Под ред. С. Г. Энтелиса, Э. М. Берлинера. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.

482. *Клушин М. И.* Смазочно-охлаждающе-моющее действие внешней среды при заточке режущего инструмента кругами из синтетических алмазов // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. Ч. 2. – К. : Наук. думка, 1977. – С. 48–54.

483. *Барсегянц Р. О., Даен Э. Д.* К вопросу об оценке охлаждающего действия жидких и газовых сред // Вопросы теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки металлов резанием. Сборник 1. – Горький : ГПИ, 1975. – С. 21–26.

484. *Киселев Е. С., Ковальногов В. Н.* Реализация потенциала функциональных действий СОЖ при механической обработке на основе рационального применения ультразвука // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 112–116.

485. *Артамонов Б. А., Волков Ю. С.* Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки. Часть 1. Модель электрохимической обработки. – М. : ВНИИПИ, 1991. – 170 с.

486. *Penker H. J.* Liquidi refrige e da taglio per lavori di rettifica // Rass. Mess. – 1977. – 11, № 2. – P. 41.

487. *Справочник* металлиста. В 5-ти т. / Т. 2. Под ред. А. Г. Рохштадта и В. А. Брострема. – М. : Машиностроение, 1976. – 720 с.

488. *Muller Jurgen.* Profil festlegen Beurteilungskriterien fur die Quealital wessernischbarer Kuhlschmierstoffe // Maschinenmarrkt. – 1987. – 93, № 31. – P. 44–45.

489. *Рабинович З. Я.* Краткий химический справочник. – Ленинград : Химия, 1978. – 392 с.

490. *Рогов В. В., Ананасенко В. Е., Михновская А. Н.* Кинетика химического взаимодействия стекла с технологической средой в процессе полирования // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 4. – С. 53–55.

491. *Вредные вещества* в промышленности: Справочник для химиков, инженеров и врачей. Т. III. Неорганические и элементоорганические соединения. – Л. : Химия, 1977. – 608 с.

492. *Носенко В. А.* Повышение эффективности шлифования адгезивно-активных металлов кругами с наполнителями // Современные проблемы механики и физико-химии процессов резания, абразивной обработки и поверхностного пластического деформирования: Матер. Межд. науч.-техн. конф., 14–16 мая 2002 г., г. Киев. – К : АТМ Украины, 2002. – С. 136–138.

493. *Якимов А. А., Уминский С. М., Дмитриева С. Ю.* Влияние импрегнирования кругов на их режущую способность // Авиационно-

космическая техника и технология. Тр. Госуд. Аэрокосмического ун. «ХАИ». Вып. 14. – Харьков : ГАУ «ХАИ», 2000. – С. 254–258.

494. *Бударин А. М.* Исследование эффективности некоторых технологических средств при шлифовании деталей из высоколегированных и легированных сталей : Автореф. ... канд. техн. наук. – Саратов : СПИ, 1970. – 26 с.

495. *Латышев В. Н., Наумов А. Г.* Об эффективности использования кислорода в процессе резания // Резание и инструмент в технологических системах. – 2001. – Вып. 60. – С. 121–127.

496. *Корчак С. Н., Шамин В. Ю.* Физико-химическое взаимодействие СОЖ на производительность шлифования // Вопросы теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки металлов резанием: Сборник 2. – Горький : ГПИ, 1975. – С. 50–53.

497. *Кубасов П. У., Кутуев И. Ф., Бухановский В. Г.* и др. Влияние смазочных свойств СОЖ на процесс шлифования // Вопросы теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки металлов резанием: Сборник 2. – Горький : ГПИ, 1975. – С. 54–59.

498. *Рутман П. А., Львов В. Н., Сафронов В. Г.* Исследования механизма действия маловязких углеводородных жидкостей при хонинговании // Вопросы теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки металлов резанием. Сборник 1. – Горький : ГПИ, 1975. – С. 175–181.

499. *Крешков А. П., Ярославцев А. А.* Курс аналитической химии. Кн. 1. Качественный анализ. – М. : Химия, 1968. – 496 с.

500. *Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов* // М. В. Щербак, М. А. Толстая, А. П. Анисимов, В. Х. Постановов – М. : Машиностроение, 1981. – 263 с.

501. *Худобин Л. В., Глузман А. Л., Полянсков Ю. В.* Применение смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании кругами из сверхтвердых материалов // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. Ч. 1. – К. : Наук. думка, 1977. – С. 155–160.

502. *Громыко Г. Д.* Влияние химически активной среды на процессы деформации металлов при обработке резанием // Вопросы теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки металлов резанием: Сборник 2. – Горький : ГПИ, 1975. – С. 10–16.

503. *Billets Stephen.* Determination of dietanol-n-mitrosamine in synthetic cutting fluids // J. Environ. Patrol. And Toxicol. – 1979. – 2, №5. – P. 349–350.

504. *Каталог* фирмы «Лейбольд А.Г» (ФРН) «Спектр производства». – 1990. – 130 с.

505. Effect of solid lubrications in gigh speed intermittent metal cutting / *Kunio Uehara, Shinji Kumagai, Mitsuru Sakurai, Hideo Takeshita* // Proc. Int. Conf. Prod. Eng., Tokyo, 1974, Part 1, Tokyo, 1974. – P. 566–571.

506. *Островский В. И.* Импрегнированный абразивный инструмент: Обзор. НИИмаш, 1980. – № 72. – 19 с.

507. *Ларшин В. П., Гречиха А. М., Якимов А. В.* Твердые технологические смазки для абразивного инструмента // Инструментальный світ. – № 2. – 2002. – С. 33–34.

508. *Puthanangady T.* Recept Grinding Process Developments in the Optical Fiber Communication Industry // Gohram conferences : Precision Grinding & Finishing in the Global Economy – 2001, Chicago, October, 1–3, 2001.

509. *Козловский Н. С., Виноградов А. Н.* Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения. – М. : Машиностроение, 1979. – 224 с.

510. *Зубарь В. П., Тимчук А. Г., Перепелица Б. А.* Особенности формирования качества обработанной поверхности при лезвийной обработке закаленных сталей резцами из нитрида бора // Резание и инструмент в технологических системах. – 1999. – Вып. 55. – С. 121–122.

511. *Чеповецкий И. Х.* Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. – К. : Наук. думка, 1978. – 238 с.

512. *Технология* обработки абразивным и алмазным инструментом: Учебник для машиностроит. техникумов / З. И. Кремьен, Г. И. Буторин, В. М. Коломазин и др. Под общ. ред. З. И. Кремья. – Л. : Машиностроение, 1989. – 207 с.

513. *Суслов А. Г.* Расчет параметров шероховатости поверхности деталей машин при обработке резцами // Повышение эксплуатационных свойств деталей машин технологическими методами. – Иркутск : ИПИ, 1980. – С. 46–52.

514. *Суслов А. Г., Горленко А. О., Петрешин Д. И.* и др. Технологическое управление качеством поверхности деталей машин // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць. Серія Г. – К. : ІНМ НАН України, 2003. – С. 20–27.

515. *Рыжов Э. В., Корж Н. Я.* Влияние технологических факторов на параметры шероховатости поверхности при шлифовании кругами из сверхтвердых материалов // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. – Рига, 1985. – С. 5–10.

516. *Демкин Н. Б., Рыжов Э. В.* Качество поверхности и контакт деталей машин. – М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.

517. *Рыжов Э. В., Ляшко В. А., Потемкин М. М.* Исследование структуры взаимосвязей между параметрами шероховатости поверхностей,

полученных алмазным шлифованием // Сверхтвердые материалы. – 1995. – № 2. – С. 76–78.

518. *Любимов В. Г.* Шлифование пластмасс новым абразивным инструментом. – Львів : Вища школа, 1979. – 159 с.

519. *Алмазная обработка технической керамики / Д. Б. Ваксер, В. А. Иванов, Н. В. Никитков, В. Б. Рабинович.* – Л. : Машиностроение, 1976. – 160 с.

520. *Щипанов В. В.* Влияние качества заточки инструмента из быстрорежущих сталей на его стойкость // Станки и инструменты. – 1979. – № 11. – С. 23–24.

521. *Лавриненко В. И.* Особенности формирования микронеровностей на обработанной поверхности при торцовом шлифовании кругами из СТМ с учетом сочетания различных абразивов в рабочем слое круга // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин : Зб. наук. праць (серія «Г») / НАН України. ІНМ ім. В. М. Бакуля. – Київ, 2009. – С. 47–55.

522. *Захаренко И. П., Лавриненко В. И., Савченко Ю. Я.* Качество поверхности инструмента из быстрорежущих сталей после электролитического шлифования кругами из КНБ // Вестник машиностроения. – 1981. – № 9. – С. 55–57.

523. *Лубяной И. И., Захаренко И. П., Лавриненко В. И.* и др. Влияние глубинной кубонитоэлектролитической заточки инструмента на прочность режущего лезвия // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1989. – Вып. 6. – С. 6–8.

524. *Гаджиев А. М.* Исследование процесса глубинной заточки инструмента из быстрорежущей стали кругами из кубического нитрида бора: Автореф. ... канд. техн. наук. – Баку : АПИ, 1976. – 24 с.

525. *Хаев Л. Г.* Исследование упрочнения твердосплавных токарных резцов дробью: Автореф. ... канд. техн. наук. – К. : ИСМ АН УССР, 1977. – 24 с.

526. *Лавриненко В. И.* Шероховатость обработанной поверхности: закономерности формирования и взаимосвязь ее параметров при обработке инструментом из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 2003. – № 2. – С. 58–67.

527. *Филатов Ю. Д.* Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 5. – С. 61–65.

528. *Лавриненко В. И., Проць Л. А.* Вплив кристалографічної орієнтації монокристалів парателуриту та тетраборату літію, отриманих методом витягування з розплаву, на микрорельєф поверхонь при механічній обробці // Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 2. – С. 52–59.

529. *Рентгеноструктурные* исследования изменений напряженного состояния поверхностных слоев стали при различных видах ее механической обработки / С. К. Аврамчук, В. М. Волкогон, Д. А. Котляр и др. // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Матер. 11-го Межд. науч.-техн. семинара, 21–25.02.2011 г., г. Свалява. – К. : АТМ Украины, 2011. – С.4–5.

530. *Сипайлов В. А.* Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М. : Машиностроение, 1978. – 167 с.

531. *Бураковски Т.* Инженерия поверхности металлов: состояние и перспективы развития // Научно-технический прогресс в машиностроении. – М. : Машиностроение. – 1990. – Вып. 20. – 93 с.

532. *Термические* напряжения в твердом сплаве WC–Co после спекания / В. А. Подорога, В. П. Кебко, М. Г. Лошак, Л. И. Александрова // Проблемы прочности. – 1990. – № 12. – С. 87–93.

533. *Neumann W., Hallen A.* Changes in thermal diffusivity during heating of PM powder compacts // Proc. 20th Int. Conduct. Confer on Therm. Conduct. – V. 20. – Blackburg (USA). – 1987. – P. 19–24.

Наукове видання

ЛАВРІНЕНКО Валерій Іванович

СОЛОД Володимир Юрійович

**ІНСТРУМЕНТИ З НАДТВЕРДИХ
МАТЕРІАЛІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ АБРАЗИВНОЇ
ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ**

Монографія

(мова російська)

Підписано до друку 26.09.2016 р. Формат 60×84 1/16

Папір друк. Друк – різнограф. Ум-друк. арк. 30,75.

Тираж – 300. Зам. № 96/16.

Видавець і виготовлювач

Дніпродзержинський державний технічний університет
51918, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавництв серія ДК № 1944
від 16.09.2004 р.