

## РАЗДЕЛ «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

УДК 621.791.9(75)

ЧЕРЕДНИК Е.А., ст. преподаватель  
ПЕРЕМИТЬКО В.В., к.т.н., доцент  
НОСОВ Д.Г., ст. преподаватель

Днепродзержинский государственный технический университет

### ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА И ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ХОДОВОЙ ЧАСТИ НА ГУСЕНИЧНОМ ХОДУ

Проведено аналіз стану деталей контактної пари коток-ланцюг. Виконано обробку отриманих результатів, на підставі якої сформульовано пропозиції щодо відновлення деталей.

Проведен анализ состояния деталей контактной пары каток-звено. Выполнена обработка полученных результатов, на основании которой сформулированы предложения по восстановлению деталей.

The analysis of the state of contact pair roller – unit (component element). The processing of received results which was formulated on the founding suggestions to details restoration was carried out.

**Введение.** Изнашивание осуществляется в результате взаимодействия рабочего органа машины или конструкции с сопряженной деталью или обрабатываемой средой. Результат процесса изнашивания зависит от трех факторов: состава, структуры и свойств как материала, из которого изготовлены рабочие органы сопряженных деталей или обрабатываемой среды, так и от внешних условий: температуры, давления, агрессивности среды.

Объективную информацию о процессах, происходящих при этом на поверхностях деталей и приводящих к отделению микрообъемов металла, что и составляет элементарный акт изнашивания, можно получить при рассмотрении только во взаимодействии всех этих факторов. Исследование изнашивания рабочей поверхности стали и сплава, без одновременного учета среды и внешних условий, всегда приводит к получению результатов, которые не воспроизводятся в других работах. Примером этому служит большое число не совпадающих, а иногда и противоречивых данных о связи износостойкости с отдельными механическими свойствами, например, с твердостью изнашиваемой поверхности детали.

Многими исследователями выдвигаются с разной степенью аргументированности гипотезы о механизме изнашивания [1], включающие предположение о том, что процесс изнашивания сводится к сумме большого числа элементарных актов царапания, что изнашивание – суть усталостные явления вследствие многократного пластического передеформирования одних и тех же участков рабочей поверхности, что процесс изнашивания происходит за счет истирания оксидной пленки на рабочей поверхности детали, что изнашивание происходит вследствие образования на рабочей поверхности пластически выдавленных канавок, что при изнашивании микрорельеф, структура и прочностные характеристики металла претерпевают необратимые изменения, в результате которых формируется своеобразное остаточное состояние поверхностных слоев после снятия нагрузки.

В любом случае при всех условиях процесс изнашивания осуществляется в соответствии с фундаментальными законами природы, в частности, законом сохранения энергии.

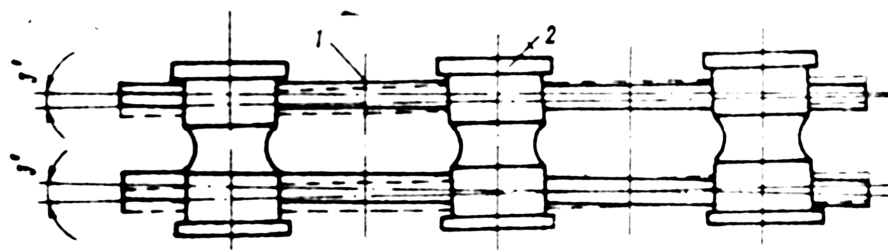
Известно, что все металлы имеют кристаллическое строение. Атомы, расположенные внутри кристалла, окружены большим, чем поверхностные атомы, количеством соседних атомов, с которыми они связаны силами межатомного взаимодействия. Поэтому поверхностные атомы обладают энергией, равной величине нереализованной силе межатомной связи. Поверхность металла обладает повышенной величиной энергии, соответствующей суммарной силе связи всех поверхностных атомов.

Для того, чтобы отделить от монолитной детали некоторый микро- или макрообъем, нужно затратить энергию, по крайней мере, равную, величине энергии, необходимой для образования двух новых поверхностей соответствующей площади.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является определение влияния совокупности факторов на износ сопряженной пары деталей и рекомендации по их восстановлению износостойкой наплавкой.

При эксплуатации бульдозеров имеет место повышенный износ деталей ходовой части. Анализ показал, что основными причинами, которые снижают уровень технического состояния деталей ходовой части бульдозера, являются: недостаточная точность подгонки трущихся пар, перекосы, допущенные при монтаже деталей и возникающие в процессе работы бульдозера.

Конструктивно было предусмотрено, что у бульдозеров этих типов направляющие звенья гусеничного полотна при работе могут иметь перекося до  $3^\circ$  (рис.1). Однако по мере износа опорных катков и звеньев угол перекося увеличивается, в результате чего стойкость деталей ходовой части бульдозеров снижается в 2..8 раз против планируемой.



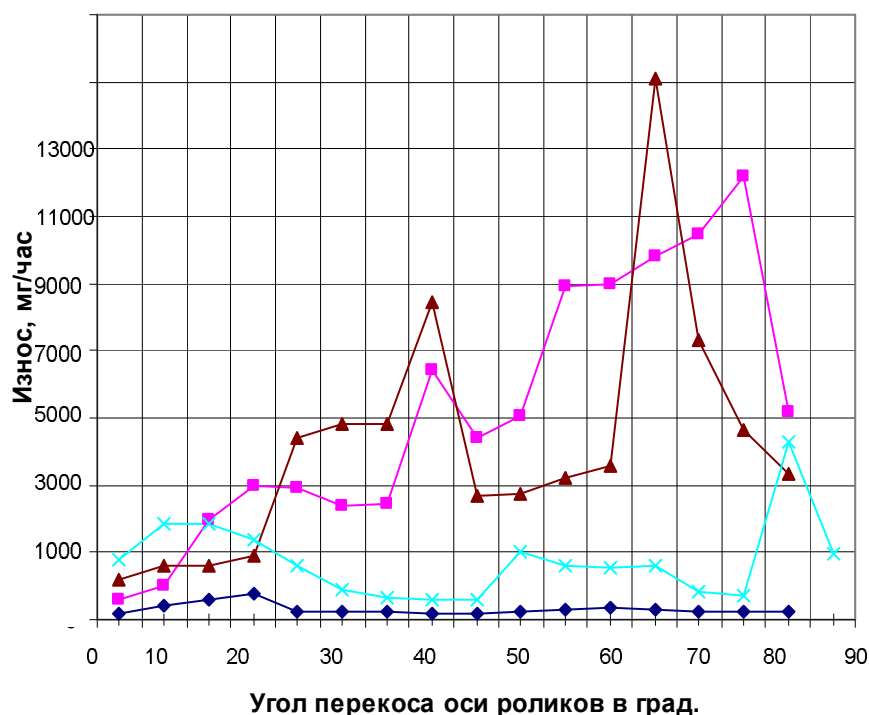
1 – направляющие звеньев гусеничного полотна;  
2 – опорный каток

Рисунок 1 – Схема возможного перекося направляющих звеньев гусеничного полотна

Проведенные испытания серии образцов-роликов с разложением сил, действующих на катящуюся с перекосям оси пару [2], показали, что в очаге износа действуют силы трения качения плюс трения скольжения. Степень износа рабочей поверхности от трения качения и отдельно от трения скольжения в несколько раз ниже, чем при суммарном износе. Результаты испытаний на износ при чистом трении качения показывают, что силе трения качения соответствует определенная величина износа и она относительно невелика. При повороте оси катящегося ролика на угол  $90^\circ$  („заклинивание“) получается чистое трение скольжения. Величина износа при этом в 1,5...2,0 раза больше, чем при чистом качении. При сравнении этих двух видов износа необходимо учитывать, что при „заклинивании“ ролика площадь контакта с течением времени уве-

личивается по сравнению с катящимся роликом. На (рис.2) показана зависимость износа образцов-роликов наплавленных различными материалами, от угла перекоса оси роликов. Как видно на рисунке, при перекосе оси ролика даже на  $3^\circ$  абсолютная величина износа в несколько раз выше суммарного износа от чистого трения качения и чистого трения скольжения отдельно взятых.

При перекосе оси качения механизм износа изменяется в зависимости от структуры и кристаллической решетки металла. Концентрация напряжений в различных плоскостях кристаллической решетки приводит микрообъемы к усталости, к сдвигу и значительно более быстрому скалыванию их в виде чешуек.



- ▲ – Св-08Г2С под смесью флюсов 75%АН-348 + 25%АНК-18;
- – Св-08Г2С под смесью флюсов 50%АН-348 + 50%АНК-18;
- х – Сталь 45;
- ◆ – Сталь У7

Рисунок 2 – Зависимость износа роликов, наплавленных различными материалами, от угла перекоса оси роликов

**Результаты работы.** Исходя из полученных результатов, были предложены материалы и разработана технология упрочняющей наплавки опорных катков бульдозера [3]. Для получения износостойкого слоя предложена электродуговая наплавка под смесью флюсов 50% АН-348А и 50% АНК-18 проволокой Св-08Г2С диаметром 3,0мм на постоянном токе обратной полярности ( $I_n = 320A$ ;  $U_n = 32...34V$ ; шаг наплавки 6...8мм). Наплавку производили на универсальной специализированной установке УД – 209.

Наплавленный металл имеет феррито-перлитную структуру, переходящую в игольчатый троостит. Твердость наплавленного слоя на поверхности контакта составляет 35...40 HRC. Предложенная твердость наплавленного слоя определялась из усло-

вий износостойкости контртела - звена (табл.1). Зона сплавления трещин и непроваров не имеет, а твердость ее не превышает 28 HRC.

Таблица 1 – Химический состав и твердость деталей бульдозера

Материал	Химический анализ (%)							Твердость (HRC)			Прим.
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Основной металл	Зона сплавления	Наплавляемый металл	
Металл опорного катка Сталь 45	0,41	1,22	0,26	0,038	0,016	0,18	0,09	20			Закал. до 35HRC
Наплавл. металл 25% АНК 75% АН	0,33	1,78	0,64	0,024	0,039	0,23	0,06	20-22	24	27	
Наплавл. металл 50%АНК 50% АН	0,87	2,0	0,44	0,024	0,033	0,56	0,14	24-26	27-28	35-40	
Металл звена полотна Сталь 45	0,43	0,84	0,30	0,03	0,021		0,07	21			Закал. до 30HRC

**Выводы.** 1. Исходя из полученных результатов, были предложены материалы и технология упрочняющей наплавки контактной пары дедалей.

2. Проведенные исследования показали, что главным фактором при перекосе трением качения является перекося осей опорных катков. Градиент твердости контактирующих пар, работающих на износ, не должен превышать 5...7 единиц HRC.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин/ Под редакцией В.С. Попова/ – Запорожье: Изд-во ОАО „Мотор Сич”. – 2000.- 394с.
2. Колода В.А., Чередник Е.А. Машина для испытания на износ. Экспресс-информация ЦНТИ по энергетике и электрификации, 1980.-Вып.8 – С.6-8.
3. Чередник Е.А., Перемитько В.В. Определение оптимального сплава для наплавки сопряженной пары „каток-звено”/ Сборник научных трудов ДГТУ: Юбилейный выпуск. В двух томах. 1999-2000г.г. – Днепропетровск: ДГТУ. – 2000. – С.63-66.

Шымкентский институт  
Международный казахско-турецкий университет им.Х.А.Ясави

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ (ДОЛГОВЕЧНОСТИ) МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

*Разработана новая технология повышения долговечности металлорежущего инструмента, заключающаяся в предварительной электротермоциклической обработке (ЭТЦО) с последующей ионно-плазменной обработкой (ИПО).*

*A new technology of the metal cutting tool has been developed. It involves an item preliminary electric-thermo-cyclic processing with the following ion-plasma processing.*

**Введение.** Зачастую металлорежущие инструменты выходят из строя не из-за поломок, а вследствие износа рабочих (режущих) поверхностей.

Работы, проводимые до настоящего времени по улучшению долговечности инструментальных сталей, как правило, приводили к повышению отдельных свойств материала при ухудшении других. Так, например, с повышением износостойкости и прочности металлообрабатывающих инструментов повышается хрупкость [1].

В связи с этим повышение их износостойкости, теплостойкости и прочности является актуальной проблемой.

Для повышения срока службы металлообрабатывающих инструментов, работающих в условиях адгезионного и диффузионного изнашивания, в последнее время широкое распространение получил метод ионно-плазменной обработки [2]. Данный способ позволяет значительно снизить усилия резания, коэффициент трения и повысить стойкость инструментов в 2-4 раза. Износостойкость при этом обеспечивается карбонитридными покрытиями небольшой толщины (5-10 мкм). Но, как показали промышленные испытания металлообрабатывающих инструментов с нитридтитановыми покрытиями, происходит их отслаивание от основного слоя металла.

**Постановка задачи.** В результате комплексного исследования разработать способ повышения долговечности металлообрабатывающих инструментов и обеспечить высокую адгезию нитридтитанового покрытия с основой.

**Результаты работы.** К основным факторам, определяющим работоспособность рабочей поверхности инструмента с покрытием, относятся:

- структура материала основы;
- сопротивление тепловому удару и деформация покрытий;
- сцепление между покрытием и основой;
- материал покрытия.

Степень сцепляемости покрытия с основным слоем металла зависит от дисперсности структуры поверхностного слоя основного металла.

Чем больше количество мелких зерен, тем выше диффузия нитридтитанового покрытия вглубь основного слоя металла.

С целью измельчения зерен поверхностного слоя металла, а также увеличения степени сцепляемости покрытий с основным слоем металла проводили предварительную электротермоциклическую обработку (ЭТЦО) изделий. В результате исследования определены оптимальные параметры ЭТЦО:

- температура нагрева 820-850°С;
- температура охлаждения 600-650°С;
- количество циклов (нагрев плюс охлаждение) – три;
- закалка в масле с температуры 820-850°С.

После ЭТЦО сверла из стали Р6М5 подвергались ионно-плазменной обработке (ИПО) поверхности изделий на установке ИЭТ – 8И-2 типа «Булат».

Нагрев изделий производился при достижении вакуума  $7 \cdot 10^{-3}$  Па в рабочей камере установки и при подаче высокого напряжения (1200-1300В) на электродуговые испарители (пушки).

Осаждение нитридтитанового покрытия осуществлялось по достижении соответствующей температуры изделий. При этом отключалось высокое напряжение и включалось опорное напряжение 130-150В при непрерывной подаче азота в камеру. Давление в камере находилось в пределах  $3-4 \cdot 10^{-1}$  Па.

Предполагая, что изделия будут работать в ударно-прерывистом режиме, формирование поверхностных слоев производили путем осаждения многослойных покрытий. Для этого в процессе напыления поверхности изделий нитридами титана изменяли давление плазмообразующего газа-азота от  $4 \cdot 10^{-1}$  Па до  $5 \cdot 10^{-3}$  Па [3].

Напыленный слой с уменьшенной твердостью препятствует выкрашиванию твердого слоя при работе в условиях вибрации и ударных нагрузок, так как более мягкие слои деформируются и допускают тем самым некоторый прогиб твердого слоя.

Время осаждения покрытия колебалось от 30 до 45 мин. при толщине покрытия от 2 до 18 мкм при твердости слоя от 1000 HV до 3200 HV.

Полученные результаты ионно-плазменной обработки изделий приведены в табл.1.

Таблица 1 – Технологические параметры ИПО  
(Сверло из стали Р6М5, время обработки – 30 мин.)

№	Температура нагрева изделий, °С	Высокое напряжение, В	Опорное напряжение, В	Толщина покрытия, мкм	Твердость, HV
1	200	400	60	4,0	1800
2	250	500	70	4,5	1900
3	300	600	90	5,8	2150
4	350	700	120	7,5	2400
5	400	800	150	8,0	3100
6	450	850	200	10,5	3250
7	500	900	200	12,0	2600
8	550	950	220	14,5	2250
9	600	1000	250	16,0	2150

В табл.1 приведено оптимальное время напыления изделий – 30 мин. При времени покрытия менее 30 мин. показатели твердости и износостойкости довольно низки, а при увеличении времени напыления более 30 мин. эти показатели существенно не меняются (эти данные не вошли в табл.1).

Оптимальная температура процесса осаждения нитридтитанового покрытия на поверхность изделий – 400-450°С. Дальнейшее увеличение температуры напыления приводит к снижению твердости и износостойкости покрытия, а также поверхностного слоя основного металла.

Металлографические исследования образцов из стали Р6М5, прошедшие окончательную обработку по заводской технологии (закалка ТВЧ, отпуск 150-200°С), а также рекомендуемую (ЭТЦО плюс ИПО) позволили выявить, что структура поверхност-

ного слоя основного металла (до ИПО) при закалке ТВЧ состоит из крупноигльчатого мартенсита и карбидов. Одноразовый нагрев при высокой скорости приводит к незавершению диффузионных процессов. Образующийся аустенит при нагреве стали неоднороден по содержанию углерода. В процессе закалки в микрообъемах с пониженной концентрацией углерода кристаллы мартенсита образуются раньше и имеют грубую форму. Такая структура приводит к неравномерной твердости и износостойкости поверхностных слоев основного металла.

Структура поверхности стали после предварительной ЭТЦО более дисперсна, и может быть обеспечена в результате:

- перераспределения в аустените различных примесей;
- многократной фазовой рекристаллизации;
- более однородного аустенита по углероду и примесей.

При ЭТЦО происходит термонаклеп, т.е. при неоднократном нагреве и охлаждении разные структурные составляющие сплавы, обладая различными теплопроводностью, теплоемкостью и прочностными свойствами, подвергаются микропластическому деформированию. Термонаклеп ускоряет процесс формирования мелкозернистой структуры в сплаве.

Формированная дисперсная структура при ЭТЦО дополнительно обеспечивает более равномерную твердость и конструктивную прочность изделий, а также способствует повышению степени сцепляемости напыленного слоя с поверхностью детали при последующей ИПО вследствие искусственного увеличения границ зерен на поверхности основного металла.

Результаты влияния известных и новых способов упрочнения металлообрабатывающих инструментов на их физико-механические свойства приведены в табл.2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства изделия, подвергнутого различным режимам поверхностного упрочнения

Инструмент, материал	Поверхностная упрочняющая обработка	Глубина упрочненного слоя, мкм	Физико-механические свойства				
			Твердость	Красностойкость при HRC-58	Адгезионная способность, Н	Износостойкость, мин.	Долговечность, коэфф. повышения стойкости
Сверло Р6М5	1. Закалка ТВЧ + низкотемпературный отпуск	-	58HR C	500	-	23	1,0
	2. Ионно-плазменная обработка (ИПО)	10	1900HV	640	500	46	2,0
	3. ЭТЦО+ИПО	12	3200HV	750	2000	120	4,5

Красностойкость инструмента определялась после нагрева при соответствующей температуре в течение четырех часов путем измерения твердости по Роквеллу при условии HRC 58.

Адгезионную способность выявляли по нагрузке, при которой происходит отслаивание покрытия.

**Выводы:**

1. Предварительная ЭТЦО обеспечивает получение мелкозернистой структуры, повышение прочности, твердости и износостойкости поверхностных слоев изделий. Кроме этого ЭТЦО способствует повышению степени сцепляемости напыленного слоя с основой металла.

2. Последующая ИПО способствует формированию износостойкого нитридтитанового покрытия на поверхности инструмента, которое, обладая высокой теплопроводностью, снижает температуру на рабочей поверхности инструмента при его эксплуатации и, как следствие, уменьшает диффузионное изнашивание, что приводит к повышению долговечности в 3-4 раза.
3. Разработанная технология повышения долговечности металлообрабатывающих инструментов успешно прошла промышленные испытания на Шымкентском механическом заводе и принята к внедрению с существенным экономическим эффектом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С., Табаков В.П., Вахминцев В.П. Твердосплавные инструменты с нитридтитановыми покрытиями // Станки и инструмент, 1976, № 6. – С.18-22.
2. Бродянский А.П. и др. Упрочнение инструмента на установке «Булат». Технология и организация производства. – Киев, Укр НИИНТИ, 1977, № 2. – С.54-55.
3. Исламкулов К.М., Гордиенко Л.К. Повышение износостойкости деталей машин комбинированном методом// Тезисы докладов Всесоюз. научно-техн. симпозиума «Повышение износостойкости и усталостной прочности деталей машин обработкой концентрированными потоками энергии». Москва, 1985, 111с. (Для служебного пользования).

УДК С21 Д1 /45

ИСЛАМКУЛОВ К.М., д.т.н., профессор  
КОЛМЫКПАЕВ Б.К., к.т.н., ст.преподаватель  
СЕЙТКУЛОВ А.Р., к.т.н., и.о. доцента

Шымкентский институт  
Международный казахско-турецкий университет им.Х.А.Ясави

### ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ПРИМЕРЕ ДИСКОВЫХ ПИЛ ХЛОПКООЧИСТИТЕЛЬНЫХ МАШИН

*Приведены результаты исследования плотности дислокации и ее влияние на износостойкость изделий. Разработана технология электротермоциклической обработки дисковых пил хлопкоочистительных машин, которая резко уменьшает их коробления.*

*This article gives the results of the dislocation density investigation and its impact on the items wear resistance. Cotton-cleaner mechanisms disc saw's technology of electrothermocylic processing is worked out, which strongly reduces their warping.*

**Введение.** Ежегодный выпуск джинных и линтерных дисковых пил для хлопкоочистительных машин достигает несколько миллионов штук. Для повышения долговечности, эти изделия подвергаются термической обработке.

Для упрочнения дисковых пил применяют объемную и индукционную закалку. Для изготовления дисковых пил в странах СНГ, производителях хлопко-волокна, используются углеродистые инструментальные стали У8Г и др. с твердостью HRA 67-70 по ГОСТ 5497-80. Несмотря на повышенную твердость, стойкость дисковых пил недостаточна. В связи с этим ежегодно на изготовление дисковых пил расходуются тысячи тонн весьма дорогостоящей стали У8Г. Дальнейшее повышение износостойкости за



счет использования стали более высокой твердости не представляется возможным из-за трудности механической обработки (вырубка дисков, насечка зубьев).

*Актуальной проблемой* является выбор материала и технологии упрочнения для достижения требуемого уровня износостойкости, плоскостности дисковых пил и снижение их стоимости.

**Постановка задачи.** Задача исследования заключается в выявлении степени влияния структурных параметров на износостойкость сталей и в разработке на этой базе новой технологии термообработки дисковых пил.

Одним из важнейших факторов, определяющих износостойкость сталей, является их структурное и субструктурное состояние.

Известно, что повышение дефектности (дислокации) кристаллической решетки металла приводит к увеличению износостойкости. Влияние тонкой структуры сплава на износостойкость стали столь значительно, что с увеличением плотности дислокаций дополнительной термической обработкой почти вдвое увеличивается абразивная износостойкость поверхностей стальных изделий [1,2].

После закалки и низкого отпуска углеродистые доэвтектоидные и эвтектоидные стали, так же как и низколегированные, имеют однофазную мартенситную структуру (количество остаточного аустенита незначительно, если температура под закалку не превышает обычно принятого значения). Меняющиеся структурные параметры при этом – плотность дислокаций и количество углерода в решетке мартенсита.

**Результаты работы.** Для исследований использовали стали марок 65Г, У8Г. Термическую обработку осуществляли таким образом, чтобы при изменении плотности дислокаций каждой стали обеспечивать относительно стабильный уровень других структурных параметров. В данном случае следовало бы создать структуры, когда внутри каждой марки стали размер аустенитного зерна примерно одинаковый и одинаково количество остаточного аустенита при различной плотности дислокаций. Для этого воспользовались эффектами наследования элементов субструктуры при фазовой рекристаллизации предварительно нагретой стали.

Заготовки образцов изучаемых сталей проходили предварительную нормализацию от различных температур нагрева, начиная от обычно принятой для данной марки стали до 1260 °С. В процессе проведения нормализации наблюдается экстремальная температура предварительного нагрева, когда после охлаждения на воздухе образуется повышенный уровень дефектности кристаллического строения. Это объясняется тем, что в районе температур нагрева 1100-1150°С происходит диссоциация и растворение в аустените имеющихся тугоплавких примесных фаз (азот и кислородсодержащие). В начале растворения этих фаз аустенит имеет микрохимическую неоднородность. Поэтому при охлаждении в процессе  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения наблюдаются микроучастки с разным периодом решетки. Это ведет к росту плотности дислокаций при  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращении. Дальнейшее повышение температуры нагрева способствует гомогенизации и поэтому при охлаждении уже формируется структура с пониженной плотностью дислокаций в  $\alpha$ -фазе железа.

Последующая фазовая рекристаллизация с нагревом для закалки всех образцов до температур  $A_{C3}+30 \div 50^\circ\text{C}$ , а для стали У8 –  $A_{C1}+30 \div 50^\circ\text{C}$ , проходит в условиях наследования элементов исходной субструктуры, а охлаждение (закалка) приводит к формированию максимума дефектности кристаллического строения в зависимости от температуры предварительной нормализации. Таким образом, после повторного нагрева и закалки удастся получить структуру мартенсита с различной плотностью дислокаций в зависимости от температуры предварительной нормализации, но примерно оди-

наковым размером аустенитного зерна и одинаковым количеством остаточного аустенита (для каждой марки стали отдельно).

Результаты структурных исследований и испытаний на изнашивание приведены в табл.1 и на рис.1.

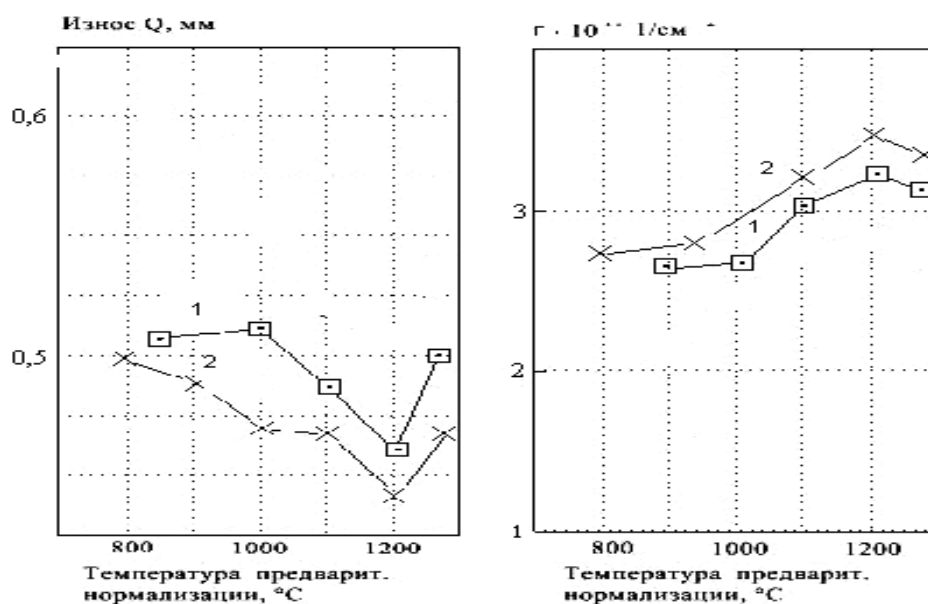
Таблица 1 – Влияние температуры предварительной нормализации на параметры структуры и величину износа после повторной закалки от температуры  $A_{C3}+30\div 50^{\circ}C$  (для У8:  $A_{C1}+30\div 50^{\circ}C$ ) и отпуска  $200^{\circ}C$

Температура предварительной нормализации, °С	Плотность дислокаций $\rho, \cdot 10^{11} 1/cm^2$		Средний диаметр $\alpha_{уст}$ зерна $d, мм$	Твердость, HRC	Величина износа Q, мм	
1	2		3	4	5	
Сталь 65Г	%				%	
850	2.7	100	0.018	56	0.41	100
1000	2.7	100	0.022	56	0.41	100
1100	3.02	112	0.022	56	0.39	95
1200	3.25	129	0.019	56	0.37	92
1260	2.92	108	0.019	56	0.40	97
Сталь У8Г	%				%	
800	2.736	100	0.015	58	0.40	100
900	2.866	104	0.016	58	0.39	97
1000	-	-	0.016	58	0.37	92
1100	3.180	116	0.015	58	0.37	92
1200	3.608	132	0.014	58	0.34	85
1260	3.273	119	0.015	57	0.37	92

Как видно из приведенных данных, размеры аустенитного зерна внутри каждой марки стали отличаются незначительно. Количество остаточного аустенита не превышало 5-6%. Из представленных результатов видно, что во всех случаях наблюдается уменьшение величины износа с ростом значений плотности дислокаций.

Рост плотности дислокаций за счет наследования элементов субструктуры при фазовой перекристаллизации достигает в среднем около 30%. При этом величина износа уменьшается на 15-20% (по сравнению со сталью, закаленной по обычной технологии, т.е. исходно нормализованной с  $800-870^{\circ}C$  после закалки и низкого отпуска). Эти изменения наблюдаются при одной и той же (для каждой стали) твердости. Разный уровень плотности дислокаций и соответственно разный уровень величины износа у различных сталей объясняется различным содержанием углерода в твердом растворе (мартенсите) и большим фазовым наклепом при мартенситном превращении высокоуглеродистой стали (рис.1).

Как видно из табл.1, наилучшей износостойкостью обладает сталь У8Г после закалки и низкого отпуска. Могут быть использованы стали с меньшим содержанием углерода, если применять термическую обработку с двойной фазовой перекристаллизацией. Существуют другие специальные способы закалки, способствующие созданию в стали максимального уровня дефектности кристаллического строения.



1 – сталь 65Г, 2 – сталь У8

Рисунок 1 – Изменение величины износа и плотности дислокаций сталей после предварительной нормализации с различных температур и последующего нагрева до температуры закалки  $A_{C3}+30\div 50^{\circ}C$  (для стали У8Г:  $A_{C1}+30\div 50^{\circ}C$ ) и низкого отпуска

Экспериментально было установлено, что плотность дислокаций при использовании специальных способов закалки получается выше (табл.2).

Таблица 2 – Значения плотности дислокаций сталей после различных режимов термообработки

Сталь, химическ. состав	Режим термообработки			
	Печной нагрев, закалка, отпуск 200°C	Закалка с двойной фазовой перекристаллизацией, отпуск 200°C	Индукционная импульсная закалка, отпуск 200°C	Электроциклическая закалка, отпуск 200°C
	Плотность дислокаций $\rho \cdot 10^{11} \text{ 1/cm}^2$			
У8 C=0.37%	2.45	3.1	3,26	3,65
65Г C=0.63% Mn=1.0%	2.60	3.25	3,48	3,75

Если обычная печная закалка стали 65Г создает плотность дислокаций в мартенситной структуре  $\rho \approx 2.60 \cdot 10^{11} \text{ 1/cm}^2$ , то закалка с двойной фазовой перекристаллизацией –  $\rho \approx 3.25 \cdot 10^{11} \text{ 1/cm}^2$ , импульсная индукционная –  $\rho \approx 3,48 \cdot 10^{11} \text{ 1/cm}^2$ , а электроциклическая –  $\rho \approx 3.75 \cdot 10^{11} \text{ 1/cm}^2$ . Из перечисленного видно, что два последних способа имеют преимущества. О целесообразности их применения можно судить только после специальных опытов, т.к. литературные данные не позволяют получить достаточно ясную информацию о преимуществах циклической и индукционной закалки для повышении износостойкости [3].

Для проведения опытов подготавливали специальные образцы из листовой стали 65Г толщиной 1 мм. Сечение образцов обеспечивало возможность достаточно быстрого нагрева в индукторе до закалочной температуры и было соизмеримо с сечением джинных и линтерных дисковых пил, а также давало возможность реализации электроциклической закалки.

Разработан способ электротермоциклических обработок (ЭТЦО) дисковых пил, который включает в себя следующие операции:

- предварительный электронагрев до температур 350-400°C, выдержка с целью уменьшения внутренних напряжений в теле изделий, возникающих в результате холодной штамповки и температурных напряжений в процессе последующего электротермоциклирования;
- 3-4<sup>x</sup> кратное электротермоциклирование выше критической точки  $A_{C3}$  и охлаждение ниже  $A_{C3}$  на 30-50 °С. ЭТЦО проводили с целью измельчения структуры аустенита и искусственного увеличения границ зерен;
- закалка в масле после ЭТЦО для получения структуры мелкоигльчатого мартенсита;
- отпуск после закалки при температуре 250-300°C с целью снятия структурных напряжений, возникающих в результате закалки и получения мелкодисперсного бейнита.

Была проведена термообработка пильных дисков хлопкоочистительных машин в количестве 200 штук. Пилы набирали в пакеты по 10, 20, 50 штук и закачивались в зажатом фальш-диском состоянии. Во всех случаях (после ЭТЦО и отпуска в зажатом состоянии) неплоскостность пил не превышала установленные нормы.

Наши исследования показали, что при ЭТЦО с предварительным нагревом можно избежать коробления, превышающего допустимые размеры.

Поиски способов устранения коробления пил в процессе ЭТЦО привели к необходимости изготовления специальной оснастки и разработки технологии термического упрочнения.

Для осуществления ЭТЦО были изготовлены специальная оснастка, индуктор, центрирующий узел, спрейер. Для индукционного нагрева использовали установку ЛЗ107 с частотой тока 45 килогерц. Температурное поле, возникающее при нагреве и охлаждении пилы, определяли путем замера температур в различных точках пилы приваренными хромель-алюмелевыми термопарами толщиной 0.1–0.5 мм. Автоматическая запись (или измерение) производилась осциллографом или прибором КСП-4 с временем пробега всей шкалы за 1.5 сек.

Уменьшение коробления возможно за счет снижения внутренних термических и структурных напряжений. Это достигается за счет снижения температурного перепада по сечению (или зонам) в процессе предварительного нагрева и ЭТЦО.

Так как в процессе фазовых превращений происходит резкое снижение сопротивления пластическому деформированию, то избежать коробления при закалке изделий типа джинных и линтерных пил можно только фиксацией их формы. Следовательно, предварительный нагрев изделий до температуры 400-450°C и фиксация формы в прижимных дисках с отверстиями позволит в процессе отпуска закаленной пилы провести релаксацию внутренних структурных напряжений без потери плоскостности.

#### **Выводы.**

1. Рост плотности дислокации приводит к повышению износостойкости изделия. Наиболее высокая плотность дислокации наблюдается у стали 65Г, подвергнутой электротермоциклической обработке.
2. Разработана специальная оснастка и технология бездеформационной закалки дисковых пил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяченко С.С. Наследственность при фазовых превращениях: механизм явления и влияние на свойства // МиТОМ. – 2000. – №4. – С.14-19.
2. Шамахсудов С.М. Влияние структурной наследственности на абразивную износостойкость стали. Сб. Термическая обработка и свойства металлов. Ташкент, ТашПИ, 1976. – С.27-37.
3. Исламкулов К.М., Колмыкпаев Б.К. Исследование износостойкости дисковых пил, подвергнутые различным методам упрочнения// Вестник МКТУ им.Х.А.Ясави. – 2006. – № 3. – С.3-7.

УДК 621.893

ИВЧЕНКО П.С., к. т. н., доцент  
ВОЛОШИН Р.В., аспирант

Днепродзержинский государственный технический университет

**ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ БАБИТОВ  
НА СТАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ**

*Дефіцит і висока вартість антифрикційних сплавів (бабітів) стали причиною пошуку технології ефективної технологічної схеми, при якій використання менш дорогих матеріалів не вплине на якість продукції, зокрема на якість виготовлення підшипників ковзання.*

*Дефицит и высокая стоимость антифрикционных сплавов (баббитов) явились причиной поиска технологии эффективной технологической схемы, при которой использование менее дорогостоящих материалов не повлияет на качество продукции, в частности на качество изготовления подшипников скольжения.*

*Deficiency and high cost of antifrictional alloys of babbit were the reason Search of technology of the effective technological plan, at which useLess expensive materials will not influence quality of production, in particular on Quality of manufacturing of bearings of sliding.*

**Введение.** *Актуальность проблемы.* В современных условиях создания конкурентоспособной продукции, экономия цветных металлов стала одним из основных факторов ресурсосберегающих технологий. Так как цветные металлы являются дорогостоящими и дефицитными материалами, то нашей основной задачей стал фактор технологического сбережения этих материалов.

В настоящее время в промышленности для подшипников скольжения и трущихся деталей используются биметаллические покрытия, содержащие в себе дорогостоящие металлы (сурьму, медь). Мы заменили эти материалы на менее дорогостоящие, эта замена не повлияла на качество продукции.

**Постановка задачи.** *Цель работы.* В целях экономии оловянистой бронзы для подшипников скольжения в настоящее время используют биметаллические покрытия (сталь- баббит). Баббит – это антифрикционный сплав, применяемый для подшипников скольжения трущихся деталей машин. Высокие антифрикционные свойства баббитов связаны с их особой структурой и наличием твердых кристаллов в мягкой основе (рис.1). Главными компонентами в оловянистых баббитах являются сурьма и медь.

Прямая наплавка баббита на сталь не применяется в связи с образованием на границе контакта интерметаллидных хрупких соединений типа FeSn. Поэтому для сцепления баббита со сталью последнюю покрывают слоем припоя типа ПОС-40, на который и наносится слой баббита.

В данной работе применялись баббиты Б 83 и Б 16, химический состав которых приведен в табл.1, физические свойства – в табл.2, механические свойства – в табл.3.

Таблица 1 – Химический состав оловяносвинцовых баббитов по ГОСТ 1320-41 и 1209-41

	Химический состав, %								
	Sb	Cu	Pb	Sn	Примесей не больше, %				
					Fe	As	Zn	Pb	Всего
Б83	10-12	5,5-6,5	-	Ост.	0,1	0,1	0,03	0,35	0,55
Б16	15-17	1,5-2,0	Ост.	15-17	0,1	0,3	0,15	-	0,60

Таблица 2 – Физические свойства баббитов [1]

Марка баббита	Температура кристаллизации, °С		Удельный вес	Коэффициент линейного расширения	Теплопроводность
	Начало	Конец			
Б 83	370	240	7,38	0,22	0,08
Б 16	410	240	9,29	0,24	0,06

Таблица 3 – Механические свойства баббитов [1]

Марка баббита	Предел прочности на растяжение, Н/мм <sup>2</sup>	Предел прочности на сжатие, Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Относительное сжатие, %
Б 83	90	115	82	6,0	38,0
Б 16	78	123	86	0,2	14,7

Анализ характера повреждения баббитового слоя (сколы, отрыв баббитового слоя от основы, локальное разрушение на общей баббитовой поверхности) приводит к мысли об использовании новых технологических процессов, позволяющих повысить механическую прочность соединения баббитового слоя со сталью.

**Результаты работы.** Механическая прочность паяного соединения зависит от следующих факторов:

- 1) от собственной прочности припоя в шве;
- 2) от прочности связи припоя с металлом основы;
- 3) от прочности интерметаллических соединений, образующихся на границе между припоем и металлом основы;
- 4) от прочности металла основы в зоне пайки после физико-химического воздействия на него расплавленного припоя и повышенной температуры.

Прочность припоя в шве определяется его химическим составом. Однако механическая прочность припоя в шве отличается от прочности «чистого» припоя, т.к. в процессе пайки металл основы частично растворяется в припое, меняя его химический состав и, следовательно, его механические свойства. [2] Прочность связи слоя припоя с металлом основы определяется характером физико-химических процессов, протекаю-

щих при пайке. Монолитность металла, являющаяся показателем совместимости входящих в него атомов, определяется силами связи взаимодействующих в нем элементарных частиц. Взаимодействие проявляется, когда частицы сближены на расстояние, соизмеримое с периодом кристаллической решетки.

В процессе пайки сближение разнородных металлов, находящихся в разном фазовом состоянии, обеспечивается за счет удаления с поверхности твердого и жидкого металлов оксидных и других пленок, мерами предупреждения взаимодействия с окружающей средой, повышением энергетического состояния системы взаимодействующих веществ. Из квантовой механики известно, что связи между атомами в кристаллической решетке образуют электроны [1, 2]. Активность электронов атомов расплава образовывать соединения с электронами атомов подложки зависит от атомного радиуса, определяемого как расстояние от центра ядра атома до внешней электронной оболочки и величины энергии, необходимой для отрыва электрона от атома.

С увеличением атомного радиуса снижается энергия ядра с внешними электронами, и соответственно повышается способность атомов к взаимодействию. При образовании связей между атомами подложки и атомами расплава припоя происходит обмен электронами, активность которого зависит от энергии связи внешних электронов с атомами ядра.

Интерметаллические соединения, образующиеся на границе раздела между металлом основы и припоя в результате их взаимодействия, обладают достаточной механической прочностью, однако они же отличаются и повышенной хрупкостью. По этой причине паяные свинцовооловянистым припоем образцы разрушаются по более хрупким интерметаллическим соединениям олова с железом (FeSn).

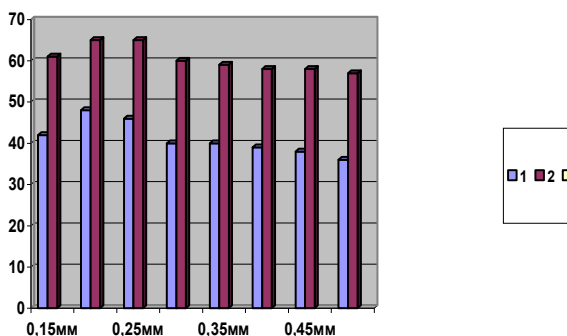
Основываясь на вышеизложенном, видно, что для повышения прочности сцепления баббита со стальной основой применяемое соединение сталь - оловяно-свинцовый припой - баббит не обеспечивает необходимых эксплуатационных характеристик. По данным работы [3], оценивая взаимодействие стали с оловом, свинцом, медью и цинком, видно, что наиболее благоприятное взаимодействие у стали с медью, т.к. они образуют неограниченные твердые растворы.

Поэтому было предложено создать новое соединение сталь - латунь-оловяно-свинцовый припой - баббит. Оптимальным вариантом было принято использовать латунь марки Л 62. Ее химический состав и механические свойства приведены в табл.4.

Таблица 4 – Химический состав и механические свойства латуни Л 62

Марка припоя	Содержание элементов, %				Температура, °С		Предел прочности, Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %
	Cu	Pb	Fe	Zn	солидус	ликвидус		
Л 62	60,5-63,5	≤0.08	≤ 0.15	Ост.	900,0	905,0	32,8	35,5

Изготовили 20 образцов и для контроля использовали применяющуюся технологию нанесения припоя с разной толщиной покрытия от 0,15 до 0,50 мм. Для определения стойкости сцепления через слой латуни изготовили еще 20 образцов. На основу ст.35 наплавляли слой латуни Л62 толщиной 0,2-0,25 мм, а на неё наплавляли слой припоя ПОС-40 толщиной от 0,15 до 0,50 мм. После наплавки баббитом из всех образцов механическим способом изготовили по 2 образца цилиндрической формы для механических испытаний по ГОСТ 1497-73. Результаты механических испытаний представлены на рис.1.



1 – система сталь - припой ПОС-40 - баббит

2 – система сталь - латунь Л 62 - припой ПОС-40 - баббит

Рисунок 1 – Прочность образцов в зависимости от толщины слоя припоя ПОС-40(Н/мм<sup>2</sup>)

Анализ представленных результатов показал, что прочность соединения системы сталь - латунь - припой ПОС-40 - баббит примерно в 1,5 раза выше прочности образцов системы сталь - припой ПОС-40 - баббит.

#### Выводы.

1. Установлена зависимость прочности сцепления баббита со стальной основой при изменении толщины слоя припоя ПОС-40 и физико-химической совместимости материалов.
2. Установлено, что прочностные свойства системы сталь - латунь - припой ПОС-40 - баббит Б-16 в 1,4-1,5 раза выше прочностных свойств системы сталь - припой ПОС-40 - баббит Б-16.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лакедемский А.В. ,Хряпин В.Е. Справочник паяльщика. – М: Машиностроение, 1967. – 305с.
2. Лоцманов С.Н. ,Петрунин И.Е. Пайка металлов. – М: Машиностроение, 1966. – 287с.
3. Руководство по пайке металлов мягкими припоями. М.Оборонгиз 1963. – 193с.

УДК 628.32:004

АВЕРЬЯНОВ В.С., аспирант

Днепродзержинский государственный технический университет

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СПЛОШНОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В СВОБОДНОЙ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУЕ

*Представлено схему незатопленого вільного струменя рідини і технологічну схему безкамерного фільтрування водних технологічних середовищ. Отримано математичну залежність, яка дозволяє визначити довжину ділянки суцільного потоку рідини у відкритому середовищі, де доцільно розмістити фільтрувальну перегородку в пристроях для очищення рідини від механічних домішок.*



Представлена схема незатопленной свободной струи жидкости и технологическая схема бескамерного фильтрования водных технологических сред. Получена математическая зависимость, позволяющая определить длину участка сплошности потока жидкости в открытой среде, где целесообразно разместить фильтровальную перегородку в устройствах для очистки жидкости от механических примесей.

The chart of the unfolded free stream of liquid and technological chart of tubeless filtration of water technological environments is presented. Got mathematical dependence, allowing to define length of area of continuous stream of liquid in the opened environment, where it is expedient to place a filtration partition in devices for cleaning of liquid from mechanical admixtures.

**Введение.** В бескамерных фильтровальных установках [1] используется энергия свободной струи жидкости. Для этого применяются всевозможные конструкции форсунок, сопел и насадок.

Незатопленной свободной струей жидкости называется струя жидкости, окруженная газовой средой, в частности воздушной средой.

**Постановка задачи.** Рассмотрим водную струю жидкости круглого поперечного сечения, движущуюся в воздушном пространстве.

Проведенные исследования показывают, что в общем случае струя жидкости может иметь три характерные части: компактную, частично раздробленную и распыленную (рис.1).

В пределах компактной части еще сохраняется цилиндрическая форма струи жидкости, причем сплошность движения жидкости оказывается не нарушенной.

В пределах частично раздробленной части струи жидкости сплошность потока нарушается, причем струя жидкости постепенно расширяется.

Наконец, в пределах распыленной части струи происходит окончательный распад потока жидкости на отдельные капли.

Разрушение компактности струи жидкости на протяжении второго и третьего участков объясняется ее аэрацией. Аэрация струи жидкости обуславливается совместным смешением между воздушной и водной средами. Поэтому необходимо определить длину компактной части струи жидкости, где целесообразно устанавливать фильтровальную перегородку в устройствах для очистки жидкости от механических примесей.

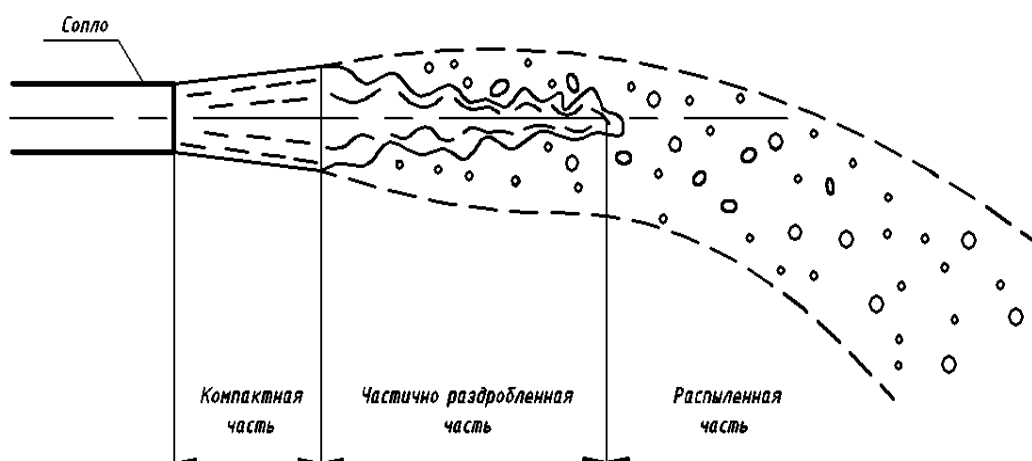
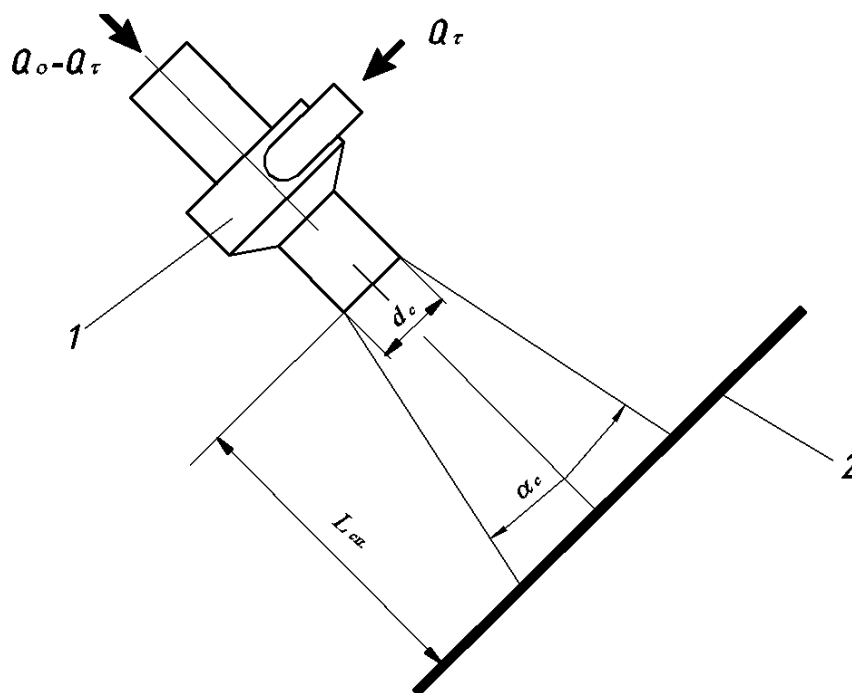


Рисунок 1 – Схема незатопленной свободной струи жидкости

**Результаты работы.** Длина компактной части струи жидкости  $L_{спл}$  оказывает влияние на геометрические параметры сопловой группы – на расстояние  $L$  от среза со-

пла до плоскости фильтровальной перегородки. Величина компактной части струи жидкости зависит от расхода загрязненной жидкости через сопло (рис.2)  $Q_0$ ; от отношения расходов жидкости через тангенциально врезанный патрубок и через сопло  $Q_T/Q_0$ ; от диаметра сопла  $d_c$  и от угла  $\alpha_c$  раскрытия струи жидкости.



1 – сопло с тангенциально врезанным патрубком;  
2 – фильтровальная перегородка

Рисунок 2 – Технологическая схема процесса фильтрации жидкости

Для построения математической модели зависимости длины компактной части струи жидкости от приведенных выше факторов в виде полинома первого порядка применялись методы планирования эксперимента, а именно, полный факторный эксперимент. Уровни варьирования факторов представлены в табл.1.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

Факторы	Обозначение факторов	$x_1^*=1,414$	$x_1 = -1$	$x_1 = 0$	$x_1 = 1$	$x_1^*=1,414$
Общий расход жидкости, $Q_0, \text{ м}^3/\text{с}$	$x_1$	0,50	0,60	0,85	1,1	1,2
Диаметр сопла $d_c \cdot 10^3, \text{ м}$	$x_2$	16	17	20	23	24
Отношение расходов жидкости $Q_T/Q_0$	$x_3$	0,12	0,17	0,3	0,43	0,48
Угол раскрытия струи $\alpha_c, \text{ град}$	$x_4$	16	20	30	40	44

Для упрощения записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных масштабы по осям выбираются так, чтобы верхний уровень варьирования соответствовал +1, нижний -1, а основной уровень варьирования равнялся нулю. Для фак-

торов с непрерывной областью определения это возможно осуществить с помощью преобразования:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{I_j}, \quad (1)$$

где  $x_j$  – кодированное значение фактора;

$\tilde{x}_j$  – натуральное значение фактора;

$\tilde{x}_{j0}$  – натуральное значение основного уровня;

$I_j$  – интервал варьирования;

$j$  – номер фактора.

С помощью формулы преобразования запишем матрицу плана и полученные результаты эксперимента (табл.2.).

Таблица 2 – Матрица плана и результаты эксперимента

№ п/п	Кодированные значения факторов в эксперименте															L <sub>спл.</sub> мм	
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>		x <sub>0</sub>
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	63
2	-1	1	1	0	-1	-1	0	+1	0	0	-1	0	0	0	0	1	42
3	1	1	-1	-1,414	1	-1	-1,414	-1	-1,414	1,414	-1	-1,414	1,414	1,414	1,414	1	152
4	-1	1	-1	-1,41	-1	1	1,414	-1	-1,414	1,414	1	1,414	-1,414	1,414	-1,414	1	200
5	1	-1	1	0	-1	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	1	70
6	-1	-1	1	0	1	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	1	60
7	1	-1	-1	0	-1	-1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	90
8	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	130
9	1,414	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	70
10	-1,414	0	0	-1	0	0	1,414	0	0	0	0	0	0	0	0	1	108
11	0	0	1,414	1	0	0	0	0	0	1,414	0	0	0	0	0	1	68
12	0	0	-1,414	-1	0	0	0	0	0	1,414	0	0	0	0	0	1	148
13	0	1,414	0	-1	0	0	0	0	-1,414	0	0	0	0	0	0	1	70
14	0	-1,414	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	90
15	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	80
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	60

Экспериментальные исследования проводились с помощью искровой фотографии. Величину длины компактной части струи жидкости измеряли на соответствующих технологических режимах работы установки. В результате обработки экспериментальных данных были получены оценки влияния факторов и взаимодействий факторов на исследуемый параметр L<sub>спл.</sub>

Для движения к точке оптимума использовалась математическая модель вида:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k),$$

где  $x_1, \dots, x_k$  – факторы зависимостей.

В данном случае математическая модель для полного четырехфакторного эксперимента с эффектом взаимодействия четвертого порядка имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{124} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{134} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{234} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{1234} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (2)$$

Целью проведения исследований является определение по результатам эксперимента значения неизвестных коэффициентов рассматриваемой модели. До сих пор, говоря о модели, мы не останавливались на важном вопросе о статистической оценке ее коэффициентов. Теперь необходимо сделать ряд замечаний по этому поводу. Можно утверждать, что эксперимент проводился для проверки гипотезы о том, что линейная модель  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$  адекватна. Эксперимент, содержащий конечное число опытов, позволяет только получить выборочные оценки для коэффициентов уравнения (2). Их точность и надежность зависят от свойств выборки и нуждаются в статистической проверке.

Коэффициенты можно вычислить по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_i}{N}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (3)$$

где  $N$  – количество опытов.

Для подсчета коэффициента  $b_1$  используется вектор-столбец  $x_1$ , а для  $b_2$  – столбец  $x_2$ . Остается неясным, как найти  $b_0$ . Если наше уравнение (2) справедливо, то оно верно и для средних арифметических значений переменных. Но в силу свойства симметрии  $\tilde{x}_1 = \tilde{x}_2 = 0$ ,  $\tilde{y} = b_0$ . Следовательно,  $b_0$  есть среднее арифметическое значение параметра оптимизации.

Коэффициенты линейной модели (2) имеют следующие величины:

$$\begin{array}{llll} b_0 = 62,6; & b_4 = -28; & b_{23} = 2,75; & b_{124} = -3,68; \\ b_1 = 3,66; & b_{12} = -1,75; & b_{24} = -4,67; & b_{134} = -1,44; \\ b_2 = -12,23; & b_{13} = -0,75; & b_{34} = 31,7; & b_{234} = 8,2; \\ b_3 = -5,85; & b_{14} = 14,6; & b_{123} = 0,625; & b_{1234} = 3,71. \end{array}$$

Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор. Если коэффициент имеет знак плюс, то с увеличением величины фактора параметр оптимизации увеличивается. Величина коэффициента соответствует вкладу данного фактора в величину параметра оптимизации при переходе фактора с нулевого уровня на верхний или нижний.

Подставив найденные коэффициенты в уравнение (2), получим следующее соотношение:

$$y = 62,6 + 3,66 \cdot \tilde{x}_1 - 12,23 \cdot \tilde{x}_2 - 5,85 \cdot \tilde{x}_3 - 24 \cdot \tilde{x}_4 - 1,75 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2 - 0,75 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_3 + 14,6 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_4 + 2,75 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_3 - 4,67 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_4 + 31,7 \cdot \tilde{x}_3 \cdot \tilde{x}_4 + 0,625 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_3 - 3,68 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_4 - 1,44 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_3 \cdot \tilde{x}_4 + 8,2 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_3 \cdot \tilde{x}_4 + 3,71 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_3 \cdot \tilde{x}_4. \quad (4)$$

В уравнении (4) переменные значения  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$ ,  $\tilde{x}_3$ ,  $\tilde{x}_4$  представляют собой кодированные величины. Для удобства вычисления кодированные величины заменяем натуральными:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_1 &= \frac{G - 0,85}{0,25} = 4 \cdot G - 3,4; \\ \tilde{x}_2 &= \frac{d - 0,02}{0,003} = 333 \cdot d - 6,67; \\ \tilde{x}_3 &= \frac{G_T / G - 0,3}{0,13} = 7,69 \cdot G_T / G - 2,31; \\ \tilde{x}_4 &= \frac{\alpha - 30}{10} = 0,1 \cdot \alpha - 3,\end{aligned}\tag{5}$$

где  $G$  – общий расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;

$d_c$  – диаметр сопла, м;

$G_T / G$  – отношение расходов жидкости;

$\alpha_c$  – угол раскрытия струи, град.

Подставив выражения (5) в уравнение (4), получим математическую зависимость для определения длины компактной части струи жидкости от вышеприведенных факторов:

$$\begin{aligned}L_{\text{снл}} \cdot 10^{-3} &= 957 - 1078 \cdot G - 20600 \cdot d_c - 1582 \cdot G_T / G - 28,3 \cdot \alpha_c + 44697 \cdot G \cdot d_c + \\ &+ 2262 \cdot G \cdot G_T / G + 39,7 \cdot G \cdot \alpha_c + 35505 \cdot d_c \cdot G_T / G + 600 \cdot d_c \cdot \alpha_c + 50,6 \cdot G_T / G \cdot \\ &\cdot \alpha_c - 107607 \cdot G \cdot d_c \cdot G_T / G - 1632 \cdot G \cdot d_c \cdot \alpha_c - 80,6 \cdot G \cdot G_T / G \cdot \alpha_c - 1131 \cdot d_c \cdot \\ &\cdot G_T / G \cdot \alpha_c + 3800 \cdot G \cdot d_c \cdot G_T / G \cdot \alpha_c.\end{aligned}$$

**Выводы.** Полученная математическая зависимость позволяет определить длину участка сплошности потока жидкости в открытой среде, где целесообразно разместить фильтровальную перегородку в устройствах для очистки жидкости от механических примесей [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коробочка А.Н., Тихонцов А.М., Брылев Е.А. Очистка технологических сред при обработке металлов резанием. – Воронеж: Изд-во ВГУ. – 1992. – 128с.
2. Адлер Ю.П., Маркова Ю.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Изд. 2-е перер. и доп., Наука: М., 1986г. – 325с.
3. Ч.Хикс. Основные принципы планирования эксперимента. М., Наука 1987г. – 216с.