

Міністерство освіти і науки України  
Дніпродзержинський державний технічний університет

**О.П. Максименко, В.В. Перемітько, В.М. Самохвал**

# **ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ЗМАЩУВАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ МАШИН**

*Рекомендовано*

*Міністерством освіти і науки України*

Навчальний посібник для студентів  
механічних та металургійних спеціальностей  
вищих навчальних закладів

ДНІПРОПЕТРОВСЬК  
“СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ”

2006

**УДК 621.771:621.892**

Теорія і практика змащування металургійних машин. Навчальний посібник для студентів спеціальності 7.090218 – Механічне обладнання /Максименко О.П., Перемітько В.В., Самохвал В.М. – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2006р. – 172 с.

**Рекомендовано** Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів \_\_\_\_\_ р. (лист № \_\_\_\_\_)

Доведено загальність розповсюдження та техніко-економічну значущість трибологічних процесів, показано ретроспективний розвиток знань в цій галузі. Наведено основні характеристики шорсткості поверхні та сучасні параметри, якими характеризують текстуру поверхонь, та їх зв'язок з експлуатаційними характеристиками вузлів тертя та механізмів. Розглянуто основні закономірності процесів тертя, класифікація, властивості та моделі мастильних речовин, режими змащування. На основі рівняння Рейнольдса розглянуто гідродинамічну та контактну-гідродинамічну теорію змащування. Наведено приклади розрахунків основних параметрів підшипників ковзання та зубчастого зачеплення. Окремі розділи присвячено процесам зношення, системам змащування металургійних машин та сучасним способам відновлення зношених деталей.

Книга буде корисна інженерно-технічним працівникам підприємств, співробітникам науково-дослідних установ і студентам технічних вузів.

**Рецензенти:** *А.М. Должанський* – д-р техн. наук, проф. кафедри проектування Національної металургійної академії;  
*М.Є. Нехаєв* – канд. техн. наук, директор науково-виробничого об'єднання “Днепрофмаш”.

Друкується за рішенням Вченої ради ДДТУ № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ р.  
ISBN \_\_\_\_\_

© Максименко О.П., Перемітько В.В., Самохвал В.М., 2006  
© .”Системні технології”, 2006

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТРИБОЛОГІЇ	6
1.1 Визначення терміну трибологія	6
1.2 Тертя	7
1.3 Зношення	11
1.4 Змащування	12
1.5 Сучасний етап розвитку трибології	16
1.6 Питання для самоконтролю	18
2 КОНТАКТУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ І ПАРАМЕТРИ ШОРСТКОСТІ	20
2.1 Механіка контакту	20
2.2 Параметри шорсткості поверхні	22
2.3 Питання для самоконтролю	34
3 ПРОЦЕСИ ТЕРТЯ	35
3.1 Визначення та класифікація процесів тертя	35
3.2 Механізми тертя	37
3.3 Питання для самоконтролю	39
4 РЕЖИМИ ЗМАЩУВАННЯ	40
4.1 Властивості та класифікація мастильних речовин	40
4.1.1 Загальна класифікація	40
4.1.2 Характеристики властивостей мастильних речовин	41
4.1.3 Мінеральні мастильні речовини	43
4.1.4 Рослинні олії	49
4.1.5 Синтетичні мастила	50
4.1.6 Пластичні мастильні речовини	51
4.1.7 Тверді мастила	54
4.2 Моделі мастильних речовин	55
4.3 Класифікація режимів змащування	64
4.4 Процеси формування межовихних прошарків мастил	68
4.5 Питання для самоконтролю	74
5 ГІДРОДИНАМІЧНА ТЕОРІЯ ЗМАЩУВАННЯ	75
5.1 Математична задача теорії гідродинамічного змащування	75
5.2 Умови надходження мастила в робочу зону. Спрощений вивід рівняння Рейнольдса	80
5.3 Елементи контактної гідродинаміки в дослідженні товщини мастильної плівки	91
5.4 Питання для самоконтролю	95
6 ПРОЦЕСИ ЗНОШУВАННЯ	96
6.1 Види зношення	96

6.2 Мікрозношення (стирання)	99
6.3 Задир (зварювання, схвачування)	101
6.4 Оцінка зношення робочих поверхонь	103
6.5 Питання для самоконтролю	109
7 СИСТЕМИ ЗМАЩУВАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ МАШИН	110
7.1 Класифікація систем змащування	110
7.2 Індивідуальні пристрої для змащування	111
7.3 Системи змащування	115
7.4 Системи подачі технологічних мастил	121
7.5 Питання для самоконтролю	123
8 ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО УСТАТКУВАННЯ	125
8.1 Види та способи відновлення	125
8.2. Технологія наплавлення	133
8.2.1. Легування наплавленого металу	133
8.2.2. Техніка наплавлення	134
8.2.3. Вибір хімічного складу наплавленого металу	136
8.3. Матеріали для наплавлення	142
8.4 Устаткування для наплавлення	150
8.5 Застосування наплавлення	151
8.5.1 Наплавлення тіл обертання	151
8.5.2 Наплавлення плоских деталей	161
8.5.3 Наплавлення деталей складної форми	162
8.6 Питання для самоконтролю	164
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	165
Додаток А	171

## ВСТУП

Тертя є всюдисушою частиною нашого життя. Виконуючи будь-яку роботу ми маємо справу з процесами тертя, навіть коли не помічаємо цього. Вважається, що приблизно 20 % енергії, яку споживає людство, витрачається на подолання тертя. Тому навіть незначне зменшення втрат на тертя дозволяє отримати суттєвий економічний ефект. Саме через це наукові дослідження і технічні розробки в цій сфері є досить актуальними. Але слід пам'ятати, що процеси тертя не завжди є негативним явищем. Без тертя неможливий рух взагалі – людина не зробить і кроку, автомобіль не розгониться а потім не зупиниться. Через це в сучасній техніці ставиться задача забезпечення оптимальних показників тертя для конкретних умов.

Крім втрат енергії процеси тертя супроводжуються зношенням деталей. Збільшення міжремонтних термінів роботи механізмів і забезпечення потрібних технічних параметрів їх роботи також є важливою технічною задачею.

Оптимізація тертя і запобігання зношення вирішуються переважно застосуванням мастильних речовин. Вибір складу мастил, підбір їх властивостей та удосконалення способів їх застосування також є не менш важливою технічною задачею.

В сучасних умовах неможливо вирішення будь-якої з названих задач окремо. Лише системний підхід може забезпечити ефективність роботи механізмів і технологічних процесів. Через взаємозалежність процесів тертя, змащування та зношення їх вивчають комплексно, об'єднавши в єдину науку - "трибологію".

Основною метою викладання дисципліни „Теорія і практика змащування металургійних машин” є надання знань студентам технічних спеціальностей про трибологічні процеси, які відбуваються в механізмах, особливостях дії мастильних речовин та про процеси зношування. Теоретичні знання закріплюються набуттям практичних навичок визначення параметрів тертя, витрат мастил та їх властивостей, інтенсивності зношення.

Інженерам, які займаються розробкою технології, проектуванням або обслуговуванням механізмів необхідні сучасні знання основних трибологічних процесів. Без таких знань рівень кваліфікації спеціалістів не буде відповідати вимогам сьогодення. Саме тому в даному навчальному посібнику викладено в порівняно простій формі основні проблеми трибології для студентів технічних спеціальностей. Крім того, в посібнику наведено основні відомості з відновлення зношених деталей.

# 1 ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТРИБОЛОГІЇ

## 1.1 Визначення терміну трибологія

За загальноприйнятим визначенням,

*Трибологія – наука, що вивчає процеси взаємодії поверхонь при їх взаємному переміщенні.*

Основними з цих процесів вважаються: тертя, зношення та змащування. Саме через взаємозалежність процесів тертя, зношення та змащування, а також через широке розповсюдження та важливість цих процесів для всіх галузей техніки або діяльності, і виникла потреба використання узагальнюючого терміну.

Термін „*трибологія*” – типовий неологізм, утворений від грецьких слів „*трибос*” (тертя) та „*логос*” (наука). Цей термін стали використовувати з 1961 року, починаючи з ряду доповідей у Британському департаменті освіти та науки. З 1966 року термін набув офіційного визнання і широко використовується і в наш час. Проте, прямий переклад – наука про тертя – не відображає зміст цього багатогранного терміну.

У сучасній Британській енциклопедії дається таке визначення :

*„Трибологія – це область науки і техніки, що вивчає взаємодію поверхонь, які переміщуються одна відносно іншої, та практичні питання, що відносяться до такої взаємодії”.*

Германське трибологічне товариство використовує більш детальне визначення:

*„Трибологія – це дисципліна, яка займається науковим дослідженням та технічним застосуванням закономірностей і відомостей, які відносяться до тертя, зношення та змащування”*  
[1].

Колишній редактор міжнародного журналу Wear д-р Саломон стверджував:

*„Трибоніка це спосіб мислення і мистецтво: інтелектуальний підхід до гнучкої кооперації спеціалістів з різних галузей науки та техніки”* [2].

Тертя та зношення – об’єктивно існуючі процеси, які неможливо усунути. Але, застосовуючи мастильні речовини, можна суттєво зменшити як тертя так і зношення, що дозволяє зменшити витрати енергії та подовжити термін роботи машин і механізмів. Тому в сучасній трибології саме процесам змащування приділяється найбільше уваги, хоча всі названі процеси є взаємопов’язаними і їх вивчення можливе лише при використанні системного підходу.

Наприклад, у повній мірі використати переваги одного з перших своїх визначних винаходів – колеса – людство змогло лише після розв’язання

проблеми змащування ступиць коліс – перших підшипників ковзання. Мова йде про колеса транспортних засобів, тому що найпростіше колесо - гончарний круг (датований 4500 роком до н.е., розкопки в м. Ур, Месопотамія), за конструкцією не вимагало значних зусиль і наявності „підшипників” у сучасному розумінні. Колесо запрацювало лише тоді, коли були знайдені такі його конструктивні параметри, які дозволили за рахунок змащування зменшити тертя і зношення до прийняттого рівня. Для перших коліс (месопотамська мозаїка датована 3200 роком до н.е.) [3] прийнятний рівень тертя означав можливість перевезення вантажів на чотириколісному візку, запряженому чотирма кіньми. Недарма китайська мудрість, датована 1637 роком, стверджує: „Одна краплина мастила в підшипнику робить візок, а тисяча краплин – корабель, готовими до використання” [4].

Розглянемо основні етапи розвитку головних складових трибології.

## 1.2 Тертя

Згідно загальноприйнятому визначенню

*"Тертя – сила опору відносному переміщенню між двома тілами, що контактують".*

Перші трактати про тертя приписують Геродоту (484-425 роки до н.е.) [5], який удосконалив підшипники для різних механізмів. Тертя також згадується в роботах Аристотеля. Але більш відомим є помилковий висновок Аристотеля, отриманий ним з експерименту про рівномірний рух тіла під дією постійно діючої на нього сили. Помилка пов'язана саме з тим, що Аристотель не враховував сили тертя [6].

Засновником сучасної трибології вважається Леонардо да Вінчі (Leonardo da Vinci, 1452-1519). Він започаткував різноманітні напрямки досліджень, серед яких тертя, зношення, підшипникові матеріали, прості опори, системи змащування, механізми, гвинтові домкрати, елементи кочення підшипників. У своїх дослідженнях тертя да Вінчі використовував прямокутні зразки з різних матеріалів, переміщуючи їх за допомогою блоків по горизонтальній та похилій поверхнях. В його рукописах присутні також ескізи відкритих підшипників ковзання. Да Вінчі виявив, що зразки, які переміщуються похилою поверхнею, виявляють опір переміщенню не тільки пропорційно своїй вазі, але й куту нахилу поверхні. Головні висновки з його досить загадкових манускриптів [7]:

- тертя прямо пропорційне навантаженню;
- сила тертя не залежить від поверхні контакту;
- для зменшення тертя потрібно використовувати різноманітні матеріали і зменшувати їх шорсткість;
- використання мастильних речовин зменшує тертя.

Праці да Вінчі, що ґрунтувалися на візуальних спостереженнях, не мали математичних розрахунків. Стиль його праць буде зрозумілим з одного висновку, в якому наводяться числові параметри: для гладких полірованих

поверхонь, які ковзають одна відносно іншої, „кожне фрикційне тіло буде мати опір тертя, що дорівнює одній четвертій його ваги”. Незважаючи на значну практичну цінність, праці да Вінчі були на тривалий час забуті.

Але без точних знань про тертя розвиток науки і техніки був неможливий. Зокрема, значення тертя для механіки підкреслює відкритий Галілеєм (1564-1642) „закон інерції”, за яким якщо, на тіло не діють сили **тертя**, воно буде продовжувати прямолінійний рух з постійною швидкістю.

Через півтора століття після да Вінчі основні закономірності тертя заново відкрив французький фізик Гільом Амонтон (Guillaume Amontons, 1663-1705). У 1699 році він опублікував результати своїх досліджень в галузі тертя. Поштовхом до його досліджень було виробництво оптичних лінз. Тогочасна технологія полірування передбачала використання пружкого стержня, який впирали у стелю, а полірувальний пристрій переміщували по поверхні лінзи, закріпленій на столі. Чим з більшою силою стержень притискував пристрій до лінзи, тим більшу горизонтальну силу потрібно було прикласти для здійснення полірування. На підставі цих спостережень Амонтон запропонував такі „закони” тертя:

1-й закон: **„Сила тертя прямо пропорційна прикладеному навантаженню і для більшості поверхонь становить третину від навантаження”.**

2-й закон: **„Сила тертя не залежить від площі контактування”.**

Крім цього, Амонтон висунув гіпотезу про те, що тертя є результатом взаємного проникнення двох поверхонь. Фактично це правильна гіпотеза про шорсткість поверхні. Вона дозволяла пояснити різницю між тертям спокою (статичним) та кінематичним тертям, але одночасно викликала інші протиріччя.

Майже одночасно з Амонтоном закономірності тертя кочення вивчав видатний англійський вчений Роберт Гук (Robert Hooke, 1635 – 1703). Результати його дослідів, що опубліковані 1680 року, не мали істотного впливу на розвиток науки про тертя.

Видатний математик Ейлер (Leonhard Euler (1707-1783) в своїй праці стосовно тертя (1748) писав [ 7 ]: ”Кожен погодиться, що тертя залежить від навантаження, а не від ширини або форми поверхні. Можна було б думати, що раз тертя викликається нерівностями, то чим більша поверхня , тим більше буде тертя через збільшення кількості нерівностей, але це не так”. Ейлер першим з учених здійснив досить точний математичний аналіз руху тіл по похилій площині з урахуванням кута нахилу нерівностей, довів, що „кінематичне тертя значно менше за статичне”.



У 1775 році Ейлер отримав класичне рівняння для співвідношення сил на кабестані (пристрій в текстильній промисловості, в якому прядильна нитка ковзає поверхнею направного ролика з високою швидкістю) [ 6 ]

$$T = T_0 e^{\mu\theta},$$

де  $T_0$ ,  $T$  - натяжіння нитки до та після кабестану;

$\mu$  - коефіцієнт тертя;

$\theta$  - кут обхвату циліндричної направної.

Проте, в цілому роботи Ейлера мало що добавили до результатів робіт Амонтона та інших французьких вчених, які розвивали концепцію поверхневої шорсткості.

Наступний етап розвитку науки про тертя пов'язаний з ім'ям французького вченого Шарля Огюстена Кулона (Charles-Augustin Coulomb, 1736-1806). Як військовий інженер, він мав справу з проявами тертя в шківах, блоках, при спуску кораблів по сліпах. Використовуючи наукові методи (огляд літератури, дослідна установка) він вивчав вплив на тертя таких факторів:

- природи взаємодіючих матеріалів та їх поверхневих покриттів (мастил);
- розмірів контактної поверхні;
- нормального тиску (навантаження);
- тривалості контактування поверхні.

Для проведення дослідів було розроблено перший „трибометр” – прилад, що складався з масивного столу значних розмірів, і рухомого блоку шириною 460 мм, який переміщували канатом, пропущеним через блок діаметром 300 мм. На нижній стороні рухомого блоку цвяхами закріплювали смуги різної ширини і з різних матеріалів та навантажували блок вантажами різної маси [8]. На відміну від Амонтона, Кулон проводив досліди з ретельно очищеними зразками, але отримав приблизно однакові результати.

У своїй роботі, представленій 1781 року, Кулон запропонував своє трактування сил тертя у формі „законів”:

1. сили тертя прямо пропорційні навантаженню, яке є силою, що діє по нормалі до поверхні ковзання;
2. сили тертя для сталого навантаження не залежать від площі контактування;
3. **сили тертя не залежать від швидкості ковзання;**
4. сили тертя залежать від природи контактуючих матеріалів.

Перші два закони повторюють закони да Вінчі та Амонтона. До речі, Кулон був знайомий з роботами Амонтона і наводить його результати у вступі до своєї роботи. Третій закон Кулона є найбільш відомим, і найбільш суперечливим. Кулон розумів обмеженість цього ”закону”, тому що навіть у його дослідах для деяких матеріалів спостерігалось підвищення тертя з зростанням швидкості, а для інших матеріалів навпаки, тертя зменшувалось.

У поясненнях до результатів досліджень Кулон трактував тертя як результат взаємного проникнення, зачеплення нерівностей взаємодіючих поверхонь. Він запропонував двочленну формулу для визначення сили тертя у вигляді

$$F = A + \frac{P}{\mu},$$

де  $\mu$  - стала, яка дорівнює оберненому значенню коефіцієнта тертя;

$A$  - складова, яка визначається когезією або адгезією взаємодіючих матеріалів;

$\frac{P}{\mu}$  - складова, яка визначається деформацією нерівностей;

$P$  - навантаження.

Кулон відзначав незначний вплив першої складової, але зберіг її у формулі. Основною складовою сил кінематичного тертя він вважав деформацію нерівностей поверхні взаємодіючих тіл.

Таким чином, основний вклад Кулона в розвиток науки про тертя зводиться до таких положень: впровадження наукових методів, включно з створенням експериментальних установок; введення поняття коефіцієнта тертя, в тому числі статичного і кінематичного; запропонував двочленну формулу для визначення сил тертя; виявив вплив адгезії та когезії.

Роботи Кулона були виконані на початку промислової революції. По мірі розвитку техніки накопичувались факти, які заперечували один одного. Найбільше протиріч виникало відносно залежності коефіцієнта тертя від швидкості та тиску. Зокрема, третій закон Кулона не підтверджувався в багатьох випадках, тому робились неодноразові спроби уточнити його. Так, в період з 1831 по 1834 роки Артур Морін (Arthur Jules Morin, 1795-1880) здійснив серію експериментів (загальна кількість становила 631) для значної кількості різних матеріалів та умов. У заключному звіті він зробив висновок, що сухе тертя не залежить від швидкості. Але сам Морін чітко обмежував застосування своїх висновків лише сухим тертям. У 1879 році він зазначав:

*„ Результати, отримані з моїх експериментів, по відношенню до зв'язку між тиском, поверхнею та швидкістю, з одного боку, і тертям ковзанн, з іншого, я завжди розглядав не як математичні закони, а як наближення до істини в межах даних самих експериментів ” [7].*

Привертає до себе увагу перехід від „законів” до моделей фізичних явищ.

Приблизно в той самий період досліди Хірна доводили, що при наявності розділяючого середовища тертя в підшипнику прямо пропорційне швидкості. Стосовно тиску були накопичені практичні дані, згідно яких в

одних випадках коефіцієнт тертя зростає з збільшенням тиску, а в інших – навпаки, зменшувався.

Отже, в останній чверті 19 сторіччя потреби промисловості вимагали більш ґрунтовних знань в галузі тертя та змашування. На рубежі 80-х років дев'ятого сторіччя такі знання були отримані різними вченими незалежно один від одного. Розпочався якісно новий етап розвитку трибології, який пов'язаний з іменами трьох вчених - М.Петрова, Б.Тауера та О.Рейнольдса.

### 1.3 Зношення

Перші дослідження процесів зношення матеріалів знайдено в рукописах геніального да Вінчі, де наводяться дані для простих підшипників ковзання. В них зазначається, що зношення залежить від навантаження і що слід зношення в підшипниках із горизонтальним валом необов'язково розташовується по вертикалі, а відповідає напрямку вектора результуючої сили [9]. Для зменшення зношення да Вінчі рекомендував виготовляти втулки підшипників з більш м'якого матеріалу. Наводиться і склад такого матеріалу: 30% міді та 70% олова. До речі, в рукописах да Вінчі наведено опис прокатного стану для прокатування пластин з олова (свинцю). Стан, описаний да Вінчі, мав ручний привід, валки з бронзи, яку використовували для відливання дзвонів [10].

Велике значення для розуміння процесів тертя та зношення, як і всієї механіки, мала робота Генріха Герца (Hertz Н.,1857-1894), яка була надрукована 1881 року. Теорія, розроблена Герцем з застосуванням електроаналогії, дає вирази для еліптичного розподілення нормальних напружень і співвідношення для розмірів площі контактування і зближення сфер [11].

Вивчення процесів зношення на науковій основі почалося лише в 30-ті роки двадцатого сторіччя. Зокрема, систематичні дослідження зношення провів в 1938 році Зібель (Siebel E.). Він виділив сім типів зношення серед яких: зношення сухих поверхонь при ковзанні та коченні; зношення змащених поверхонь також при ковзанні та зношенні; зношення при вібраційному контакті (фретинг); зношення твердими частками (ерозія); зношення рідиною, яка рухається (кавітація).

В 1957 році Барвел (Burwell J.T.) склав уточнену класифікацію механізмів зношення, визначивши:

- адгезійний;
- абразивний;
- корозійний;
- поверхневе зношення через втомлюваність металу.

### 1.4 Змащування

Найдавнішим документом, що підтверджує використання мастильних речовин, є барельєф із зображенням процесу транспортування величезних кам'яних статуй в древньому Єгипті. Рідке мастило, можливо просто вода, виливалась перед полозками, виконуючи головну функцію – зменшення тертя.

Відомо також, що в древньому Єгипті для змащування коліс на колісницях використовували суміш оливкової олії та вапна. [3]. Взагалі, до середини 19-го сторіччя для змащування використовували переважно рослинні олії (оливкова, рапсова) та тваринні жири (китовий жир, смалець), а також дьоготь. Лише з розвитком нафтовидобування почалось широке використання мінеральних, а потім і синтетичних олій.

Теоретичні основи застосування мастильних речовин в межах вивчення фізичних властивостей рідини закладені Ісааком Ньютоном (Isaac Newton, 1642-1727). Ньютон проводив досліди з вивчення опору переміщенню пластин по поверхні рідини, змінюючи швидкість пластин та глибину рідини. На основі результатів дослідів Ньютон зробив такі припущення:

1. сила внутрішнього тертя в рідині пропорційна різниці швидкостей елементів рідини;
2. швидкість елементів рідини розподілена неперервно і рівномірно.

Він також запропонував „закон” внутрішнього тертя для рідини:

*Сила внутрішнього тертя прямо пропорційна площі пластини і швидкості пластини та зворотно пропорційна глибині рідини [7].*

$$F = \eta \frac{VS}{h},$$

де  $\eta$  - коефіцієнт пропорційності, пізніше названий динамічною в'язкістю рідини.

Відношення швидкості  $V$  до глибини рідини  $h$  можна представити як градієнт швидкості  $\frac{V}{h} = \frac{dV}{dy} = \dot{\gamma}$ , а відношення сили тертя до площі – як напруження зсуву  $\frac{F}{S} = \tau$ . Тоді закон рідинного тертя Ньютона набуває виду

$$\tau = \eta \dot{\gamma}.$$

У 1822 році Клод Луї Нав'є запропонував диференціальне рівняння руху в'язкої рідини та першим використав термін „в'язкість” рідини [ 4 ]. Пізніше,

у 1845 році, спільно з Джорджем Габріелем Стоксом, Нав'є вивів рівняння руху рідини, які стали основою гідродинамічної теорії.

Микола Павлович Петров (1836 – 1920), виходячи з практичних потреб російських залізниць, в період з 1881 по 1883 рік провів дослідження коефіцієнту тертя при використанні різних мастил. Результати досліджень були оприлюднені у формі доповіді на засіданні Російського технічного товариства в лютому 1883 року під назвою „Тертя в машинах і вплив на нього мастильної рідини”. В своїх дослідженнях Петров проаналізував роботи Ньютона („Математические начала натуральной философии”) та Менделєєва („О сопротивлении жидкости и о воздухоплавании”), вивів диференційне рівняння руху рідини і, розв’язавши його, визначив величину моменту сили тертя для умов радіального підшипника необмеженої довжини. Він встановив, що „сила тертя двох змащених циліндрів пропорційна коефіцієнту внутрішнього тертя рідини, відповідно даній температурі, пропорційна величині поверхні взаємного контактування твердих тіл, які труться, та пропорційна першому ступеню відносної швидкості цих тіл на поверхні їх контактування; вона зворотно пропорційна сумі, що складається з товщини прошарку змащувальної рідини та суми відношень коефіцієнтів внутрішнього тертя до коефіцієнтів зовнішнього тертя при даній температурі” [12]

$$F_p = \eta \frac{V_{ck}}{h_p + \eta / f_p' + \eta / f_p''} S$$

де  $\eta$  - динамічна в'язкість мастильної рідини (коефіцієнт внутрішнього тертя рідини);

$V_{ck}$  - швидкість ковзання;

$h_p$  - товщина прошарку рідини;

$f_p'$ ,  $f_p''$  - коефіцієнти зовнішнього тертя рідини відносно матеріалів пари тертя.

У спрощеному вигляді залежність, отримана Петровим, відповідає закону Ньютона

$$F_p = \eta \frac{V}{h} S.$$

Це, однак, не зменшує її значення як першого аналітичного розв’язку для радіальних підшипників, отриманого на основі принципів гідродинаміки [ 9 ].

Розв'язок Петрова був отриманий для ідеалізованої схеми, яка передбачала: мінімально можливий зазор між циліндрами; соосність осей валу та вкладиша; постійне значення тиску по всій довжині плівки мастила.

З 1882 року за дорученням дослідницького комітету Товариства інженерів механіків (Англія) Бошан Тауер (Buchan Tower, 1845-1904) розпочав серію експериментів з метою удосконалення підшипників залізничних вагонів. Перший звіт був представлений ним 28 вересня 1883 року. Головним результатом стало „випадкове” відкриття високого тиску в плівці мастильних речовин.

Дослідна установка Тауера моделювала умови роботи підшипників залізничних вагонів. Сталевий шип з горизонтальною віссю мав діаметр 102 мм і довжину 152 мм. [13]. Частковий (відкритий з кутом обхвату 157) вкладиш з гарматної бронзи встановлювався зверху на шип, нижня частина якого розташовувалась у ванні з мастилом. В якості мастил використовували оливкову та суріпну олії, тваринні жири, мінеральну олію та густе мастило на мінеральній основі. Установка мала привід від сферичної парової машини конструкції Тауера. Крім цього, установка мала механічний лубрикатор – поршневий насос з храповим приводом для додаткової подачі мастил до робочих частин. Як пише сам Тауер: „На машині, заново зібраній і запущеній в масляній ванні, спостерігалось витікання мастила з отвору (діаметр дорівнював половині дюйма), просвердленого для маслянки. Масло стікало по поверхні кришки, забруднюючи її, тому була зроблена спроба закрити отвір спочатку корком (пробкою), потім дерев'яним чопом. Після пуску машини чоп повільно видавлювався маслом, так, начебто воно знаходилось під значним тиском... Цей експеримент переконливо показав, що латунна втулка підшипника фактично спливає на плівці мастила під дією тиску, породженого навантаженням” [14].

У своєму другому звіті, представленому 1885 року, Тауер наводить дані по розподіленню тиску у відкритому радіальному підшипнику з кутом обхвату трохи менше 180. Ці дані стали класичними і використовуються і в наш час.

Дані звітів Тауера справили враження на багатьох вчених-сучасників в механіці та гідравліці. Зокрема, ознайомився з ними і професор інженерної справи Оуенс-коледжу Манчестерського університету Осборн Рейнольдс (M. Osborne Reynolds, 1842-1912). Результати своїх теоретичних досліджень Рейнольдс представив на науковій конференції Британської асоціації сприяння розвитку науки в м. Монреалі у 1884 році. Він зробив дві доповіді з назвами „Про дію мастил” та „Про тертя цапф”. Але в завершеній формі результати його роботи були надруковані в 1886 році під назвою „Гідродинамічна теорія змащування та її застосування до дослідів Тауера”. В статті обсягом у 80 сторінок Рейнольдс представив вивід диференційного

рівняння, яке і нині вважається основним в теорії гідродинамічного змащування, у формі

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta \left[ (U_0 + U_1) \frac{dh}{dx} + 2V \right],$$

де  $U_0, U_1$  - лінійна швидкість поверхонь цапфи і вкладишу;  
 $V$  - швидкість в напрямку нормалі до осі  $x$ ;  
 $p$  - тиск.

Розв'язок Рейнольда дозволив сформулювати новий принцип, на якому ґрунтується вся гідродинаміка підшипників, а саме :

*для утворення гідродинамічного клина необхідною*

*умовою є  $\frac{dh}{dx} < 0$ .*

Крім цього, стаття містить і інші значимі результати, зокрема:

- розв'язок для плівки мастила, що стискається між еліптичними пластинами;
- розв'язок для підшипників необмеженої довжини;
- аналіз кавітації в зоні збільшення зазору;
- співвідношення між в'язкістю і температурою рослинної олії, яку в той час широко використовували у підшипниках машин;
- рекомендації по величині зазору в радіальних підшипниках.

Щодо наявності зазору, то на той час це було принципово новим технічним рішенням. В тогочасних підшипниках прагнули звести зазор до мінімуму. Навіть Н.П.Петров отримав свій розв'язок для умов постійного зазору і однакового тиску по всій робочій зоні.

### **1.5 Сучасний етап розвитку трибології**

Отже, після 80-х років дев'ятнадцятого сторіччя процеси тертя і змащування розглядаються як взаємопов'язані в рамках гідродинамічної теорії. Але навіть після ґрунтовних робіт Петрова, Тауера і Рейнольдса продовжувалось накопичення даних, які не тільки не відповідали теорії, а й суперечили один одному і не піддавались систематизації. Ці протиріччя було розв'язано на основі робіт видатного німецького вченого Ричарда Штрібека (R. Stribeck, 1861 – 1950). Очолюючи металургійний відділ Центрального інституту науково-технічних досліджень (Берлін) в період 1900 – 1902 років Штрібек провів значну кількість експериментів з визначення коефіцієнту тертя в підшипниках ковзання та кочення. Він вимірював коефіцієнти тертя в залежності від навантаження, швидкості і температури. Отримані дані не піддавались систематизації. Щоб виключити вплив температури, Штрібек

перерахував результати дослідів, прийнявши постійне значення температури у 25 °С. Продовживши досліди з визначення коефіцієнту тертя при постійній температурі в функції навантаження, швидкості та в'язкості Штрібек отримав відому криву, яку пізніше назвали його ім'ям. Найголовніший результат, отриманий Штрібеком – виявлення мінімуму на залежності коефіцієнту тертя від комплексу параметрів: в'язкості, швидкості та навантаження  $f = \varphi\left(\frac{\eta V}{F_N}\right)$ .

Аналогічні дослідження проводили Гембель:  $f = \varphi\left(\frac{\eta \varpi}{p}\right)$ ,

та М. Херсі:  $f = \varphi\left(\frac{\eta n}{p}\right)$ , або  $f = \varphi\left(\frac{ZN}{P}\right)$ .

Саме в статтях Мейо Херсі (Hersey M.D., 1886-1978), опублікованих у 1914 та 1915 роках, вперше зазначається, що мінімальні значення коефіцієнту тертя в функції безрозмірного параметру вказують на перехід від режиму „змішаного тертя” до „гідродинамічного” тертя [15].

У 1919 році з'явилися праці Вільяма Харді (Hardy W.B., 1864-1934), в яких він на основі застосування методів фізичної хімії довів здатність тонких плівок мастил сприймати навантаження і вперше використав термін „межове змащування” (*граничное, boundary*) [16].

У першій чверті минулого століття розвиток трибології дещо призупинився через значні розходження між теоретичними розв'язками і фактичними значеннями параметрів. Зокрема, зроблений Мартіном в 1916 році аналіз контакту циліндру з площиною доводив, що плівка мастила в умовах зосередженого контакту не може зберігати свою цілісність, в той час як на практиці підшипники з аналогічними параметрами успішно працювали. Вихід з такого положення було знайдено завдяки двом науковим гіпотезам. По-перше, в 1938 році Пепплер (Pepler W.) першим зробив спробу врахувати пружні деформації поверхонь в зоні контактування. По-друге, Гаткомб (Gatcombe E.K., 1945) відмовився від припущення про постійну, однорідну в'язкість мастильної речовини. Залежність в'язкості мастильної рідини від тиску пізніше вивчали багато різних вчених, але найчастіше використовують залежність, отриману Барусом.

„Окремі внески пружної деформації та залежності в'язкості від тиску відповідно малі. Але вони об'єднуються нелінійно і дають суттєве підвищення здатності плівки сприймати навантаження та нову форму плівки” [17]. Перше прийнятне рішення з врахуванням названих факторів було отримане Грубіним А.Н. в 1949 році.



Наступний етап розвитку трибології, після розробки пружно гідродинамічної теорії, пов'язаний з урахуванням реологічних властивостей мастильних речовин. Запропоновано декілька гіпотез, пояснюючих „не ньютонівську” поведінку мастил. Наприклад, Сміт (1962) висунув гіпотезу, про те, що в зоні високого тиску мастила змінюють свої властивості і деформуються як пластичні тіла. З розробкою нових синтетичних мастил задача вивчення реологічних властивостей та їх врахування в вузлах тертя стає досить актуальною.

Вивчення трибологічних процесів значною мірою визначалось розумінням процесів взаємодії нерівностей поверхні. Визначний вклад французьких вчених, починаючи від Амонтона, зводиться до виявлення контактування по окремих нерівностях – по дискретних точках. Але вони помилково вважали, що взаємодія по кожній такій точці визначається лише геометричними параметрами окремих нерівностей. Лише через 250 років, після Амонтона, в роботах Арчада (Archard J. F.), Грінвуда і Триппа, Боудена і Тейбора [6, с. 486], було доведено, що окремі нерівності самі по собі деформуються згідно із законами пружної або пластичної деформації, тому істинна площа контакту залежить як від геометричних параметрів, так і від особливостей деформування окремих нерівностей. Так, в роботі Арчада [18] запропоновано залежність для визначення реальної площі для чисто пружного контактування нерівностей

$$A_r = \text{const} \left( \frac{F_N}{E} \right)^C,$$

де  $F_N$  - нормальне навантаження;

$E$  – модуль пружності матеріалу;

$C$  – показник ступеня, який змінюється в межах від 4/5 до 44/45.

У роботі Грінвуда і Триппа [19] доведено, що: 1) число контактів по окремих нерівностях майже пропорційне навантаженню; 2) середній розмір окремого контакту майже не залежить від навантаження; 3) реальна площа контактування поверхонь пропорційна числу таких контактів. Боуден і Тейбор для умов пластичної взаємодії нерівностей реальну площу контактування запропонували визначати з співвідношення

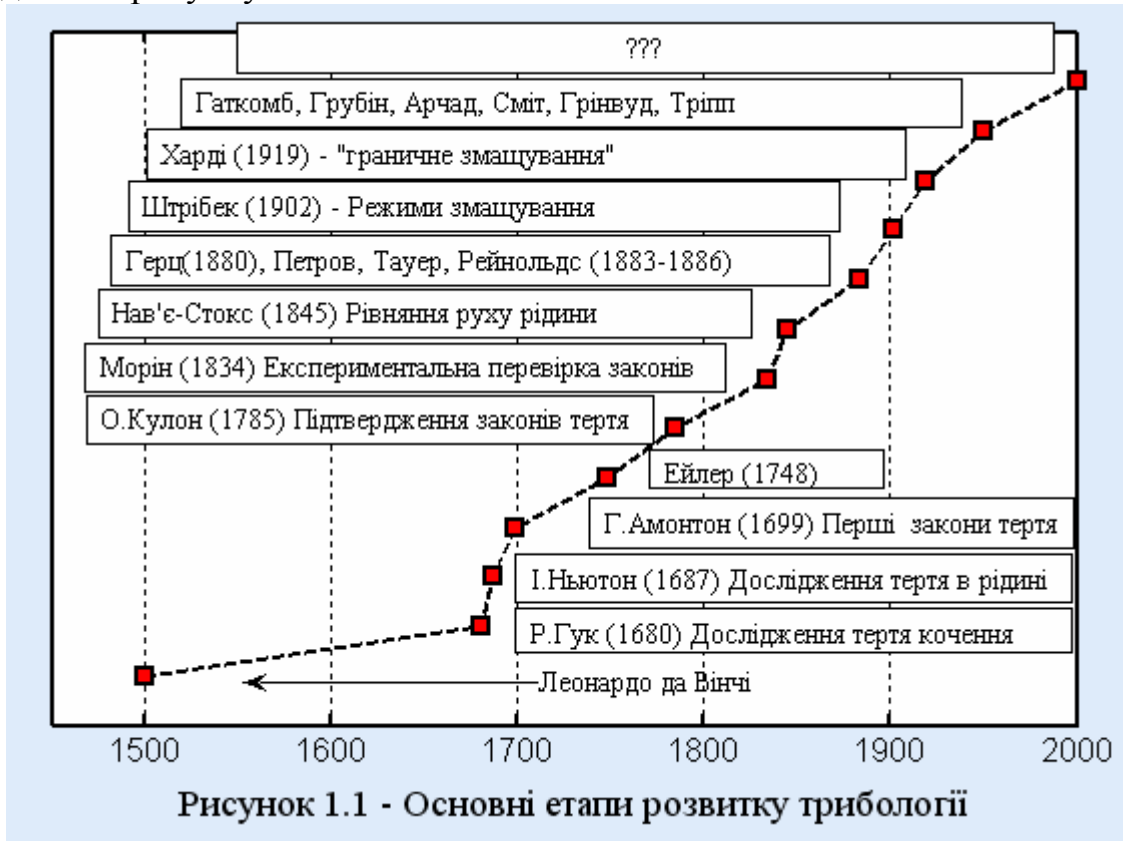
$$A_r = \frac{F_N}{\sigma_y},$$

де  $\sigma_y$  - межа текучості більш м'якого матеріалу.

Крім названих робіт в галузі контактної взаємодії, слід виділити роботу Аббота та Фаєрстоуна (Abbott and Firestone, 1933), в якій вони вперше показали співвідношення між фактичною та номінальною площами контактування для випадку пластичної деформації поверхонь. У сучасних

умовах „крива Аббота” широко використовується для визначення характеристик поверхні.

Схематичне представлення основних етапів розвитку трибології наведено на рисунку 1.1.



## 1.6 Питання для самоконтролю

1.6.1 Який внесок в розвиток трибології зробили такі вчені: да Вінчі, Амонтон, Кулон, Тауер, Петров, Рейнольдс, Штрібек, Грубін та ін.?

1.6.2 Особливості дослідів Тауера.

1.6.3 Як змінювались уявлення про шорсткість поверхні?

1.6.4 Яку умову для формування гідродинамічного клину визначив Рейнольдс?

1.6.5 Які основні напрямки розвитку сучасної трибології?

## 2 КОНТАКТУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ і параметри шорсткості

### 2.1 Механіка контакту

За визначенням, тертя виникає між тілами, які контактують і взаємно переміщуються. Отже, особливості контактування тіл – механіка контакту - значною мірою визначають параметри тертя. Тому, перш за все, розглянемо механіку контактування тіл.

Вплив властивостей поверхонь тіл, що контактують в процесі тертя, на величину сил тертя відзначав ще Леонардо да Вінчі:

*"Ті тіла, які мають більш гладку поверхню, мають більш легке тертя.[20]."*

У подальших роботах Амонтона та Кулона набула розвитку гіпотеза "шорсткості" поверхні, як одного з основних механізмів тертя. Але шорсткість ще тривалий час залишалась узагальненою якісною характеристикою поверхні, без числових показників.

На цьому етапі була виявлена така важлива особливість контактування тіл як фактична площа контактування, яка значно менша за номінальну.

Номінальна площа визначається через геометричні розміри тіл, які контактують. Таку площу ще називають „уявною”, "проекційною", "кажущейся" (рос.), "площею перекриття".

Фактична площа контактування являє собою суму площ контактування по окремих ділянках нерівностей шорстких поверхонь. Тобто, при контактуванні шорстких поверхонь вони починають взаємодіяти (контактувати) спочатку лише по окремих виступах. Зі зростанням навантаження тіла зближуються і в контакт вступають все нові виступи нерівностей.

Всебічні дослідження фактичної площі контактування на основі моделі пружкої взаємодії проведені Арчадом в 1953 -1957 роках [18]. Він довів, що фактична площа контактування прямо пропорційна навантаженню

$$A_r = K \cdot \left( \frac{F_N}{E} \right)^C \quad (2.1)$$

де  $K$  – стала;

$F_N$  - нормальна сила навантаження;

$E$  – модуль пружності матеріалу;

$C$  – показник ступеня, який, в залежності від виду моделі, змінюється в межах від 4/5 до 44/45.

Дослідження Грінвуда та Трипа [19] довели, що при пружкому контакті загальне число мікроконтактів прямо пропорційне навантаженню, середній розмір такого мікроконтакту майже не залежить від навантаження, фактична (реальна) площа пропорційна кількості мікроконтактів.

За даними [21] фактична площа контактування становить приблизно 0,01 – 0,1% від номінальної. При цьому ділянки фактичного контактування мають діаметр в межах 3 – 50 мкм. По мірі зростання навантаження розмір окремих мікроконтактів майже не змінюється, але зростає їх кількість, що й призводить до зростання фактичної площі контактування.

Зрозуміло, що при різниці номінальної та фактичної площі контактування в декілька порядків, дійсні контактні напруження можуть значно перевищувати межу текучості матеріалу деталей, що контактують. Це означає, що в точках контактування будуть виникати пластичні деформації.

Критерій пружнопластичного переходу запропоновано Гринвудом та Вільямсоном [9] у вигляді

$$\psi = \left( \frac{E}{H} \right) \cdot \left( \frac{R_a}{\beta} \right)^{0.5} \quad (2.2)$$

де  $H$  – твердість матеріалу;

$R_a$  – середнє відхилення висоти нерівностей поверхні;

$\beta$  - середній радіус виступу нерівності.

Якщо  $\psi < 0,6$ , то контакт залишається пружним для всього діапазону навантажень. При  $\psi > 1$  на частині площі контактування будуть відбуватись пластичні деформації.

При наявності пластичних деформацій фактична площа контактування визначається з співвідношення

$$A_r = \frac{F_N}{\sigma_T} \quad (2.3)$$

де  $\sigma_T$  - межа текучості більш м'якого матеріалу.

Отже, наявність шорсткості суттєво впливає на взаємодію контактуючих поверхонь, тому важливо знати і правильно оцінювати параметри шорсткості.

По мірі розвитку науки і техніки для характеристики якості поверхні були визначені "класи шорсткості", які дозволяли якісно порівнювати рівні шорсткості. Поступово шорсткість стала фізичною величиною третьої групи і для її характеристики були визначені кілька окремих показників з чітко визначеними кількісними характеристиками. Проте, сама по собі шорсткість поверхні є досить багатогранним явищем, яке неможливо охарактеризувати кількома параметрами. Тому показники шорсткості та методи їх визначення досить динамічно розвиваються і в наш час. Розглянемо основні показники шорсткості поверхні.

## 2.2 ПАРАМЕТРИ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ

Всі відхилення від номінально гладкої і плоскої поверхні розділяють на відхилення макромасштабу та відхилення мікро масштабу. Відхилення макромасштабу характеризують відхилення розмірів і форми, допусків на розміри або допусків на форму деталей. Всі інші відхилення відносять до відхилень мікромасштабу і використовують для характеристики **текстури** поверхні.

Термін **текстура поверхні** використовують для характеристики геометричних особливостей поверхні, зокрема для числової характеристики відхилень поверхні від номінально гладкої поверхні. Наприклад, за визначенням Американського національного інституту стандартів (ANSI B 46.1) текстура поверхні – це періодично повторювані або випадкові

відхилення від нормальної поверхні, які формують тривимірну топографію поверхні.

Текстуру поверхні не вимірюють кількісно – неможливо призначити окреме значення „текстури” для кожної відмінної поверхні [ 22 ]. Проте, можливо виміряти окремі „внутрішні” характеристики, або параметри, для текстури поверхні.

Відхилення мікромасштабу мають досить малу довжину хвилі (періодичність або крок), яка значно менше відхилень, обумовлених помилками форми поверхні. Для характеристики текстури поверхні використовують такі показники : шорсткість, хвилястість і борозни.

**Шорсткість** (*шероховатость, roughness*) є найбільш дрібними відхиленнями поверхні. Шорсткість визначається технологічними параметрами процесів обробки деталей та властивостями матеріалу деталі.

**Борозни** (*бороздки, lay*) є відхиленнями приблизно однакового масштабу з шорсткістю, але вони відрізняються явно вираженою направленістю. Наприклад, однонаправлені борозни при обробці струганням, або дугоподібні борозни при фрезеруванні.

**Хвилястість** (*волнистость, waviness*) характеризує відхилення поверхні з значно більшою довжиною хвилі. Довжина хвилі для цього параметру має проміжне значення між шорсткістю і помилками форми. Але в деяких випадках розділити їх досить складно.

Під **довжиною хвилі** слід розуміти відстань між однаковими точками на профілі поверхні, які періодично повторюються, тобто це крок зміни профілю.

**Профіль**, з точки зору математики, це лінія, що утворюється при перетинанні поверхні січною площиною, яка направлена перпендикулярно до поверхні. Тобто, профіль – це двомірний перетин тривимірної поверхні. Відповідно до вищезгаданих складових виділяють:

- профіль відхилень (помилки) форми;
- профіль хвилястості;
- профіль шорсткості.

У процесі вимірювань, наприклад з допомогою стержня з алмазним (діамантовим) наконечником, отримують так звану **трасу** або **профілографу**. Врахувавши особливості форми деталі (наприклад конусність), отримують **попередній профіль**, який складається з **помилки форми** та **профілю текстури**. Піддаючи профіль текстури фільтруванню, виділяють **профіль хвилястості** та **профіль шорсткості**.

Стадії отримання профілю шорсткості показані на малюнку, який взято з інтернет-ресурсів фірми Predev

([www.predev.com/smg/intro.htm/Surface.htm](http://www.predev.com/smg/intro.htm/Surface.htm) ).

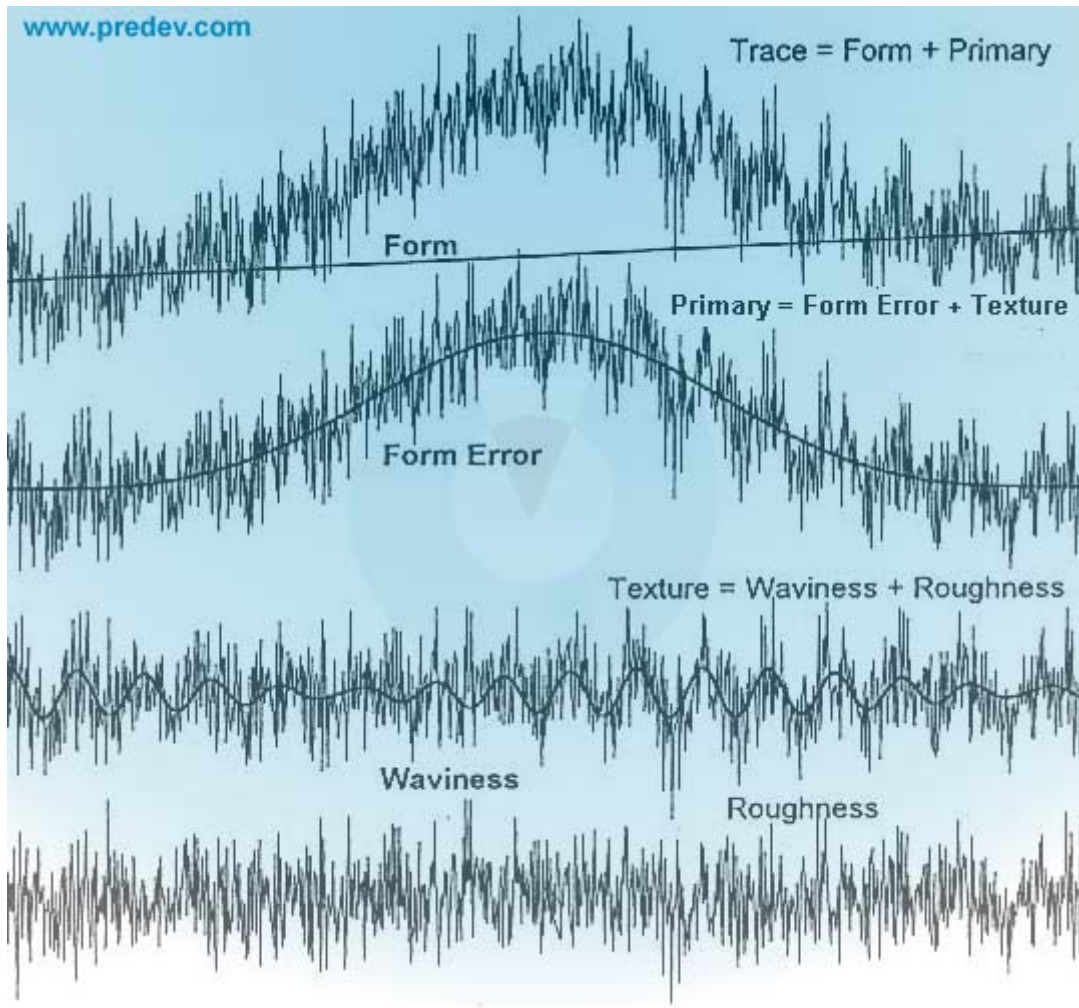


Рисунок 2.1 – Послідовність обробки траси профілометру

Фільтрування здійснюється як обробка аналогового сигналу вимірюваної інформації. Для такої обробки (фільтрування) використовують електричні, оптичні або цифрові фільтри.

Отриманий таким чином профіль шорсткості використовують для визначення числових характеристик шорсткості.

За чинним стандартами (ГОСТ 2789-73) для характеристики шорсткості використовують такі параметри:

$R_a$	середньоарифметичне відхилення профілю в межах базової довжини	$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L  y_i(x)  dx,$ або приблизно, по певній кількості точок в межах базової довжини $R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  y_i ,$ де $n$ приймають достатньо великим.
$R_z$	висота нерівностей по	Сума середніх арифметичних абсолютних

	десяти точках	відхилень значення висоти по п'яти найбільших виступах (пікам) та п'яти найглибших западинах відносно середньої лінії $R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5  y_{i \max}  + \sum_{i=1}^5  y_{i \min}  \right)$
$R_{\max}$	Найбільша висота поверхні профілю	Відстань між лінією виступів та лінією западин в межах базової довжини
$S_m$	Середній крок нерівностей профілю	Середнє арифметичне значення кроку нерівностей в межах базової довжини
$S$	Середній крок нерівностей профілю по вершинах	Середньоарифметичне значення кроку нерівностей по вершинах профілю (середня відстань між вершинами піків)
$t_p$	Відносна опорна довжина профілю	Відношення опорної довжини профілю до базової довжини $t_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n b_i$ , де $b_i$ - значення ширини виступу по лінії, яка проходить на рівні $p$ над середньою лінією.

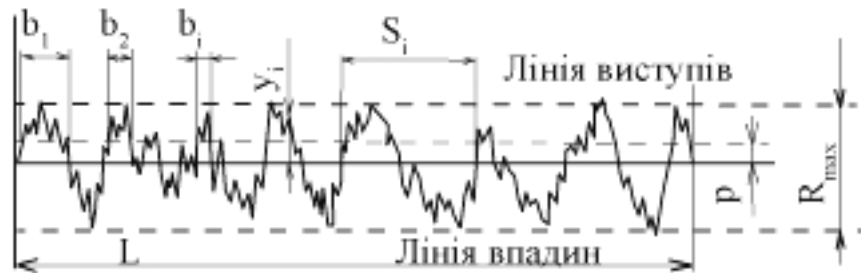


Рисунок 2.2 – Загальні характеристики шорсткості

Усі згадані параметри визначаються з ліній профілю шорсткості, тому їх називають 2D – параметрами. Для сучасних технологій таких параметрів вже недостатньо. Для вичерпної характеристики властивостей текстури поверхні використовують так звані 3D – параметри, які розділяють на декілька груп.

Динаміку таких змін можна простежити на прикладі стандартів ISO. В редакції 1984 року стандарти ISO 4287 мали такі назви:

- ISO 4287-1:1984; Surface roughness - Terminology - Part 1: Surface and its parameters ;

- ISO 4287/2:1984; Surface roughness - Terminology - Part 2: Measurement of surface roughness parameters .

Перший із стандартів в редакції 1997 року замінено на новий, де мова вже йде не про шорсткість, а про текстуру поверхні:

- ISO 4287:1997; Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters.

Другий із вказаних стандартів продовжує діяти, тобто методика вимірювань параметрів шорсткості поверхні залишається без змін. Але на додаток до нього впроваджено ще один стандарт, який визначає вимоги до функціональних параметрів текстури поверхні і складається з двох частин:

ISO 13565-1:1996; Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties - Part 1: Filtering and general measurement conditions

ISO 13565-2:1996; Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties - Part 2: Height Characterization using the linear material ratio curve

Розглянемо основні параметри, які рекомендує стандарт ISO 4287: 1997 [23]. У цьому стандарті всі параметри розділено на три групи: амплітудні, просторові (структури) та гібридні.

До **амплітудних параметрів** (параметрів висоти) в стандартах ISO включено відомі  $R_a$ ,  $R_z$ , , зміст яких залишився тим самим, та параметри  $R_{3z}$ ,  $R_{3z \max}$ ,  $R_q$ ,  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_y$ .

Параметр  $R_z$  дещо по різному називають та визначають в стандартах ISO 4287 та DIN 4762. Згідно ISO 4287 та ASME B46.1-1995 це „середня максимальна висота профілю” (Average Maximum Height of the Profile), а згідно DIN 4762 цей параметр називають „середня глибина шорсткості”, яку визначають як середнє арифметичне з окремих глибин шорсткості на п'яти ділянках в межах базової довжини. Допускається, що при вимірах за DIN результати відповідають крайньому значенню  $R_z$  ISO, якщо  $R_z$  DIN не перевищує  $R_z$  ISO.

Дозволяється використання параметрів  $R_{3z}$  або  $R_{3z \max}$  - середнього значення суми трьох найвищих піків та трьох найглибших впадин

$$R_{3z} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{3zi},$$

$$R_{3z \max} = \max[R_{3zi}].$$

Ці параметри не знайшли широкого використання в національних стандартах, але використовуються в окремих галузевих стандартах.

Параметр  $R_q$  - середньоквадратична висота профілю шорсткості, визначають з використанням формули



$$R_q = \sqrt{\int_0^L [y_i(x)]^2 dx},$$

або більш простої

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i(x)]^2}.$$

Цей параметр для звичайної синусоїдальної шорсткості пропорційний  $R_a$ , тобто  $R_q$  більше за  $R_a$  в 1,11 рази. Тому в сучасних приладах для визначення параметрів поверхні металевих деталей перевагу надають саме  $R_a$ . Використання  $R_q$  збереглося лише для оптичних характеристик.

Параметри  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_t$  за змістом близькі до  $R_{\max}$ :

$R_p$  – найвища висота піків в межах базової довжини (Maximum Profile Peak Height);

$$R_p = |\max[y_i(x)]|;$$

$R_v$  – найбільша глибина западин у межах базової довжини (Maximum Profile Valley Depth);

$$R_{pv} = |\min[y_i(x)]|;$$

$R_t$  – загальна висота шорсткості (total roughness or Maximum Height of the Profile);

$$R_t = R_p + R_v.$$

Параметр  $R_y$  або  $R_{y\max}$  називають максимальною висотою профілю в межах довжини вимірювання (базової довжини). При визначенні цього параметру базову довжину розбивають на п'ять однакових ділянок, на кожній з них визначають відстань між найвищим піком на найнижчою западиною. Найбільше з отриманих п'яти значень приймається за параметр  $R_y$ . Тобто

$$R_y = \max(R_i), \text{ де } i=1, 2, \dots, 5.$$

За змістом  $R_y$  подібний до  $R_z$ , але останній визначається дещо інакше, а саме, подібно до ГОСТ 2789, як сума усередненої висоти п'яти піків та так само усередненої висоти п'яти западин в межах базової довжини.

Отже, для параметрів амплітуди (висоти) найголовнішими залишаються  $R_a$  та  $R_t$ .

**Параметри структури** (просторові параметри) ґрунтуються на використанні даних частотних характеристик поверхні. До цієї групи в сучасних стандартах ISO включено такі показники:

- $S$  – середній крок (відстань) між окремими виступами (піками) в межах довжини вимірювань; (Mean Spacing of Local Peaks of the Profile);
- $S_m$  – середній простір відносно середньої лінії (Mean Spacing);
- $\lambda_a$  – середня довжина хвилі (Average Wavelength);

- $\lambda_q$  - середньоквадратична довжина хвилі (Root Mean Square (RMS) Wavelength).

Параметр  $S_m$  за змістом залишається без змін – це середня відстань між піками, яку визначають по точках перетинання середньої лінії, тобто середній крок піків. Якщо відстані між точками перетину середньої лінії позначити як  $S_i$ , то середній крок можна визначити як

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i.$$

Близькими за змістом до  $S_m$  є параметри  $\lambda_a$  та  $\lambda_q$ , які визначають із співвідношень

$$\lambda_a = 2\pi \frac{R_a}{\Delta_a},$$

$$\lambda_q = 2\pi \frac{R_q}{\Delta_q},$$

де  $\Delta_a$  - середнє абсолютне значення нахилу профілю шорсткості на базовій довжині;

$\Delta_q$  - середньоквадратичний нахил.

Для визначення нахилу використовують формули

$$\Delta_a = \frac{1}{L} \int_0^L \left| \frac{dy(x)}{dx} \right| dx \quad \text{або} \quad \Delta_a = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n |y_{i+1} - y_i|;$$

$$\Delta_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \left( \frac{dy(x)}{dx} \right)^2 dx} \quad \text{або} \quad \Delta_q = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^n (y_{n+1} - y_n)^2}.$$

Відмінності між  $S_m$  та  $\lambda_a$  і  $\lambda_q$  зводяться до того, що перший параметр визначає домінуючий крок нерівностей (піків), а параметри  $\lambda_a$  та  $\lambda_q$  дають середньозважені оцінки кроку по окремих нерівностях.

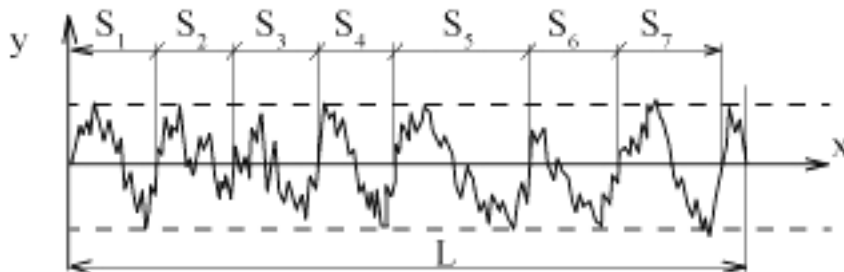


Рисунок 2.3 – Визначення середнього кроку нерівностей (виступів)

Крім цього, до групи просторових параметрів у стандартах ISO включено параметр D – щільність виступів профілю (Profile Peak Density), тобто кількість виступів (піків) на профілі шорсткості в межах базової довжини.

Група **змішаних параметрів** отримала таку назву через використання як амплітудних так і частотних характеристик поверхні. До цієї групи параметрів, за даними [[www.predev.com/smg/intro.htm/Surface.htm](http://www.predev.com/smg/intro.htm/Surface.htm)], включено:

$\Delta_a$  - середній нахил піків поверхні;

$\Delta_q$  - середньоквадратичний нахил поверхні;

$L_0$  – фактична довжина профілю;

$L_r$  – відносна довжина профілю;

$R_{sk}$  – показник асиметрії (Skewness) функції розподілення амплітуди;

$R_{ku}$  – ексцес - показник однорідності функції розподілення амплітуди або загостреності профілю (Kurtosis);

$t_p$  - абсциса кривої опорної поверхні та одночасно параметр, що характеризує відносну опорну поверхню на певній висоті (bearing ratio) ;

$H_{tp}$  - опорна висота (Bearing Height) .

Перші два параметри були розглянуті вище.

Параметр  $L_0$  характеризує фактичну довжину лінії профілю поверхні, якщо її умовно випрямити в пряму лінію. Для визначення параметру використовують формули

$$L_0 = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{dy(x)}{dx}\right)^2} dx,$$

або, спрощено

$$L_0 = \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{L}{n}\right)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}.$$

Відносну довжину профілю визначають з відношення

$$L_r = \frac{L_0}{L}.$$

Цей показник є досить інформативним і широко використовується, особливо для поверхонь, на які наноситься покриття. Для більшості поверхонь параметр  $L_r$  ненабагато більше одиниці. Але, чим більше його значення, тим більше площа фактичної поверхні, тим кращі умови для адгезії матеріалу покриття.

Показники  $R_{sk}$  та  $R_{ku}$  чисто статистичні параметри, які характеризують криву функції розподілення висоти профілю.

Профіль шорсткості, як двовимірною кривою, в кожній точці по середній лінії має певну висоту. Для звичайної шорсткості розподілення висот

профілю в більшості випадків відповідає нормальному закону, що можна зобразити у вигляді кривої

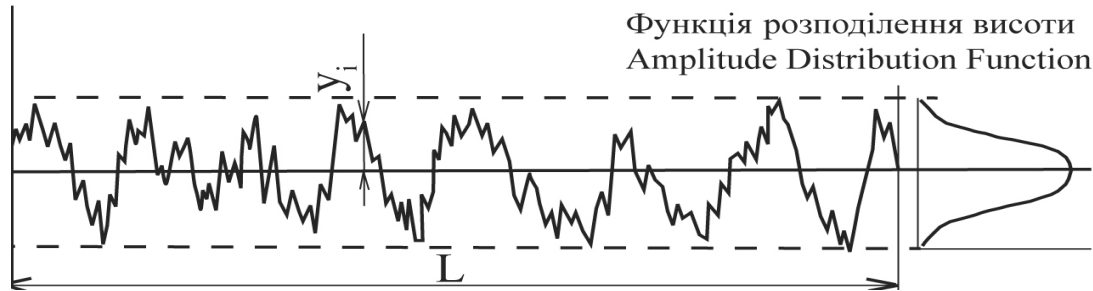


Рисунок 2.4 – Функція розподілення висоти

$R_{sk}$  характеризує можливе відхилення в розподіленні висот та западин профілю від середньої лінії. Якщо висота виступів та западин статистично однакові і їх площі теж однакові, то  $R_{sk} = 0$ , якщо висота западин більша за висоту виступів (при однаковій площі) то  $R_{sk} < 0$ , а коли висота виступів перевищує висоту западин, то  $R_{sk} > 0$ .

$$R_{sk} = \frac{1}{LR_q^3} \int_0^L y^3(x) dx,$$

$$R_{sk} = \frac{1}{nR_q^3} \sum_{i=1}^n y_i^3.$$

$R_{ku}$  характеризує ступінь загостреності кривої розподілення,

$$R_{ku} = \frac{1}{LR_q^4} \int_0^L y^4(x) dx,$$

$$R_{ku} = \frac{1}{nR_q^4} \sum_{i=1}^n y_i^4.$$

Стосовно останніх параметрів,  $t_p$  та  $H_{tp}$  слід відзначити, що саме поняття „відносна опорна поверхня профілю” широко використовується в сучасних методах визначення параметрів топографії поверхні, але дещо в інший спосіб, ніж це передбачено ГОСТ 2789. Інтегруючи криву розподілення висот профілю, отримаємо криву, яка називається кривою опорної поверхні. Інтегрування здійснюють від найвищих піків в напрямку зменшення їх висоти. Таким чином, крива опорної поверхні показує, яка частка горизонтальної лінії, проведеної на відповідному рівні, приходить на матеріал, тобто може сприймати навантаження. Тому таку криву і називають „крива відносно матеріалу” або „крива Аббота-Фаєрстоуна”. За фізичним змістом крива опорної поверхні показує динаміку зміни відносної опорної поверхні  $t_p$  по висоті профілю. Відповідно таку частку представляють у відсотках – від 0 до 100% і вказують по осі абсцис, а по осі ординат відкладають відповідну висоту профілю.

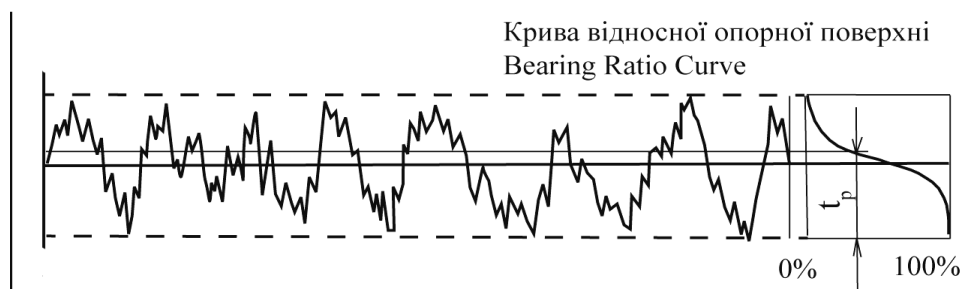


Рисунок 2.5 – Побудова кривої опорної поверхні

Крива опорної поверхні містить значну кількість інформації про поверхню, на відміну від звичайного показника  $t_p$ , який дає лише одну точку на цій кривій. Як видно з рисунку, крива опорної поверхні має вигляд S-подібної кривої з двома точками перегину. Якщо визначити два значення  $t_p$ , то з'являється можливість оцінки зміни висоти профілю. Наприклад, визначивши  $t_p$  для точок перегину, отримуємо параметр  $H_{tp}$  – опорну висоту або різницю висот профілю. Замість точок перегину можуть бути використані фіксовані значення відносної опорної поверхні. Наприклад, різниця висот профілю при 5% та 90% відносної опорної поверхні дає значення так званої **шведської висоти** -  $H$ .

Параметри  $H_{tp}$  та  $H$  за змістом досить близькі до  $R_t$  або  $R_{max}$ , але менше залежать від висоти окремих аномальних піків або занадто глибоких западин.

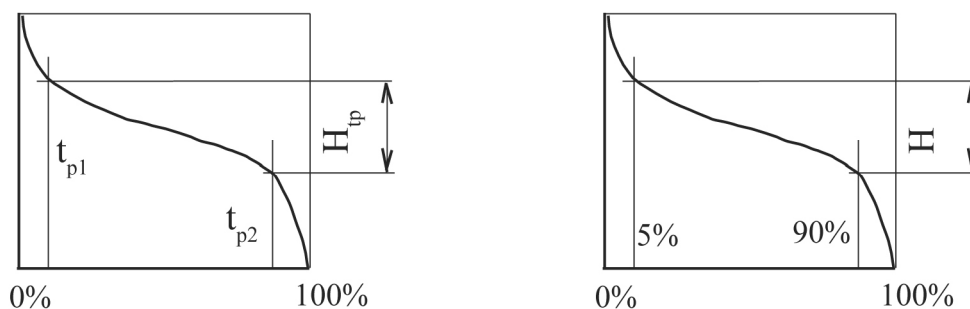


Рисунок 2.6 – Визначення висоти профілю з кривої опорної поверхні

Таким чином, якщо стандарт 1973 року передбачав використання 6 параметрів для характеристики шорсткості, то чинні стандарти ISO включають вже 22 параметри. Аналогічна картина і в інших стандартах. Наприклад, в американському стандарті [ 24 ] до групи амплітудних показників включено ті самі, що й в стандартах ISO, до групи просторових

параметрів – лише 2 ( $P_c$  та  $S_m$ ), до групи змішаних – 6 параметрів ( $\Delta_a$ ;  $\Delta_q$ ;  $R_{sk}$ ;  $R_{ku}$ ;  $t_p$ ;  $H_{tp}$ ).

Зупинимось більш детально на відносно новому параметрі  $P_c$  - кількість піків (Peak Count) - аналог  $D$  в ISO. Він знаходить досить широке використання в багатьох галузях, завдяки своїй високій інформативності. Зміст параметру зводиться до визначення кількості піків на базовій довжині. Звідси і розмірність параметру – кількість піків на одиницю довжини - шт./см. Кількість піків визначають на певному рівні відносно середньої лінії. Наприклад, на висоті в 1 мкм, або 1,3 мкм.

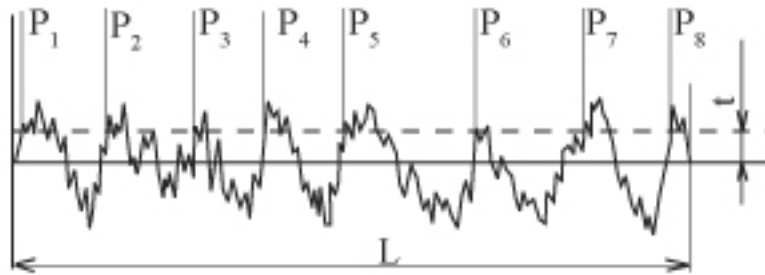


Рисунок 2.7 – Визначення кількості виступів (піків)

Проте, незважаючи на таку значну кількість існуючих параметрів, виходячи з потреб виробників та споживачів, продовжують розробляти все нові параметри. Так, згідно стандарту [ 25 ] введена група **функціональних параметрів**, яка включає такі показники:

- $R_k$  глибина осьової (центральної) шорсткості (Core Roughness Depth);
- $R_{pk}$  зменшення висоти піків (Reduced Peak Height);
- $R_{vk}$  зменшення глибини западин (Reduced Valley Depth);
- $Mr1$  частка матеріалу (Material Portion);
- $Mr2$  частка матеріалу (Material Portion);
- $V_o$  об'єм утримуваної рідини ("Oil-Retention" Volume).

Більшість наведених функціональних параметрів ґрунтується на використанні кривої, що характеризує опорну поверхню - кривої Абботта (або Абботта-Фаєрстоуна). Стандарт ISO 13565-1996 рекомендує використання параметру  $R_k$ , який за змістом близький до  $H_{tp}$  та  $H$ , але має більш прикладне значення. Методика визначення параметру  $R_k$  передбачає обчислення мінімального нахилу кривої опорної поверхні в межах ділянки шириною у 40%. Визначивши положення такої ділянки на кривій опорної поверхні, позначаємо її крайні точки як А та В. Через ці точки проводимо пряму до перетинання з вертикальними лініями, що відповідають відносній опорній поверхні в 0% та 100%. Точки перетинання позначаємо як С і D.

Якщо через ці точки провести горизонтальні лінії, то вони будуть перетинати криву опорної поверхні в точках E і F. Опустивши з цих точок перпендикуляри на ось абсцис, отримаємо точки  $MR_1$  та  $MR_2$ . З точок E і F можна провести прямі до перетинання з вертикальними лініями для  $t_p = 0\%$  та  $t_p = 100\%$  таким чином, щоб утворювані ними трикутники за площею відповідали площі, відповідно, під та над кривою опорної поверхні. Точки перетину з вертикалями позначаємо G та H. Отже, в такий спосіб крива опорної поверхні апроксимується ламаною лінією. Висота профілю, що відповідає відрізку GC, дає оцінку висоти піків, які не можуть суттєво впливати на характеристики контакту. Такі піки зминаються або зношуються в початковий період роботи. Цей параметр позначають  $R_{pk}$ . Аналогічно для  $t_p = 100\%$  відрізок DH дає висоту профілю, що приходить на западини, які будуть зберігатися тривалий час. Цей параметр позначають  $R_{vk}$ . Відповідно між  $R_{pk}$  та  $R_{vk}$  (ділянка CD) залишається основна (робоча або опорна) висота профілю -  $R_k$ .

Параметр  $MR_1$  характеризує відносну опорну довжину профілю, яка містить піки (виступи) над основною «опорною поверхнею». Для більшості практичних застосувань шорстких поверхонь бажано мати мінімальні значення  $MR_1$ . Параметр  $MR_2$  характеризує відносну опорну довжину профілю, яка сприймає основне робоче навантаження. Для  $MR_2 = t_p = 100\%$  будуть відсутні западини, але це небажано з точки зору утримання мастильних речовин або покриттів.

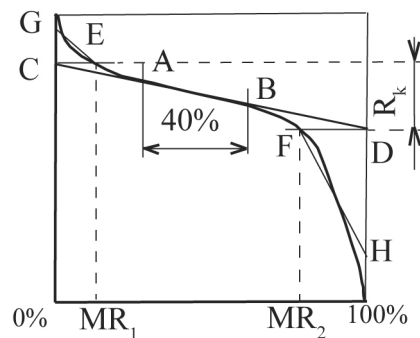


Рисунок 2.8 – Визначення параметру  $R_k$

Похідними від  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $MR_1$ ,  $MR_2$  є показники площі піків та западин відносно основної опорної поверхні :

$$A_1 = \frac{1}{2} \frac{R_{pk} * MR_1}{100\%},$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \frac{R_{vk} (100 - MR_2)}{100\%}.$$

Показник  $A_2$  має важливе практичне значення, тому що він характеризує здатність поверхні утримувати рідину. Для цього показника використовують також позначення  $V_0$  або  $S_{vi}$  (valley fluid retention; oil retention volume).

Таким чином, серед 3D параметрів слід виділити, як найбільш важливі для забезпечення технологічних показників продукції, такі:  $P_c$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $A_2$ .

**Параметри хвилястості** визначають за даними вимірювань профілю шорсткості. Існуючі стандарти не регламентують окремих вимог до вимірів параметрів хвилястості. Загальні рекомендації зводяться до того, що хвилястість має більшу довжину хвилі, вимірюється на більшій базовій довжині. В залежності від потреб тієї чи іншої галузі можуть використовуватись різні рекомендації. Наприклад, у машинобудуванні умовно приймається, що співвідношення між довжиною хвилі та її висотою становить не менше 40. Тобто довжина хвилі (крок хвилястості) більше за її амплітуду в 40 і більше разів. Для шорсткості довжина хвилі (крок) менше за її амплітуду:

довжина хвилі шорсткості становить від 0,002 мкм до 12,5 мкм;  
амплітуда – від 0,025 мкм до 1600 мкм.

По аналогії з середньоарифметичною шорсткістю для характеристики хвилястості використовують **середньоарифметичну хвилястість** -  $W_a$ , як середньоарифметичне відхилення висоти хвилі від середньої лінії в межах базової довжини:

$$W_a = \frac{1}{L} \int_0^L |w(x)| dx,$$

$$W_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |w_i|.$$

Крім цього, можуть використовуватись такі параметри як:

$W_q$  – середньоквадратична висота хвилі відносно середньої лінії на базовій довжині;

$W_p$  – максимальна висота або найбільша висота хвилястості над середньою лінією;

$W_v$  – максимальна глибина або найнижча точка хвилястості;

$W_t$  – загальна висота або сума найбільшої та найглибшої хвилі відносно середньої лінії.

На відміну від параметрів текстури поверхні показники хвилястості поки що не знаходять практичного застосування.

## 2.3 Питання для самоконтролю

2.3.1 Назвіть основні параметри, які використовують для характеристики шорсткості поверхні.

2.3.2 Чим відрізняються параметри  $R_a$  та  $R_z$  ?



- 2.3.3 Наведіть сучасні функціональні параметри шорсткості.
- 2.3.4 Як оцінюють проекційну та фактичну площі контактування?
- 2.4.5 Назвіть приблизні значення параметрів шорсткості для різних процесів обробки.

## 3 ПРОЦЕСИ ТЕРТЯ

### 3.1 Визначення та класифікація процесів тертя

При контактуванні двох тіл, між ними виникає взаємодія, яка протидіє їх взаємному переміщенню. Найпростіший приклад такої взаємодії – брусок на похилій поверхні.

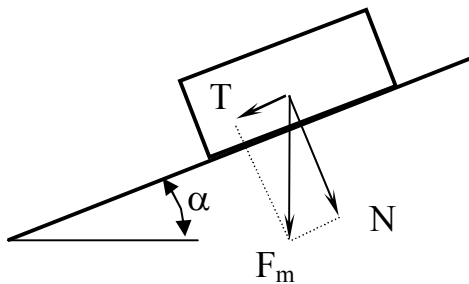


Рисунок 3.1

Маса бруска визначає "навантаження" по площі контактування. При наявності нахилу, який визначається кутом  $\alpha$ , сила від маси тіла  $F_m$  розкладається на складову  $N$ , що діє по нормалі до поверхні, та зсувну силу  $T$ . По мірі збільшення  $\alpha$  зростає  $T$  і зменшується  $N$ . При досягненні певного значення  $T$  брусок почне рухатись по похилій поверхні. Це значення сили  $T$  іноді називають силою "тертя спокою" або статичне тертя. Але слід пам'ятати, що тертя виникає як протидія переміщенню.

Цей приклад ілюструє класичний випадок тертя ковзання, для якого характерне взаємне переміщення поверхонь. Крім тертя ковзання відрізняють тертя кочення.

Розглянемо особливості **тертя ковзання**.

Параметри тертя ковзання суттєво залежать від усього комплексу умов на контактних поверхнях. Зокрема, від тиску, швидкості, температури, наявності окислів, забруднень або мастильних речовин на поверхні контактуючих тіл. Наявність мастильних речовин не тільки впливає на умови тертя, але суттєво, якісно змінює ці умови, тому зазвичай розглядають два випадки:

- сухе тертя;
- тертя змащених поверхонь.

При сухому терті, тобто за умов відсутності мастильних речовин, мають місце такі особливості процесу тертя ковзання [26]:

а) **Сили тертя прямо пропорційні нормальному навантаженню між двома поверхнями**

$$F_T = f \cdot F_N \quad (3.1)$$

Коефіцієнт пропорційності називають **коефіцієнтом тертя**.

Але така залежність спостерігається лише за помірною тиску. З зростанням тиску понад певне значення сили тертя також зростають, але вже

не пропорційно. За певного критичного тиску тертя різко зростає, що характеризують як "заїдання" з виходом з ладу всього механізму.

**б) Сила тертя, так само як і коефіцієнт тертя, не залежить від номінальної площі контактування.**

Ця особливість сухого тертя ковзання також характерна тільки для помірною тиску.

**в) При незначних швидкостях переміщення тіл сили тертя не залежать від цієї швидкості.**

Для умов тертя при наявності мастильних речовин проявляються суттєво відмінні особливості тертя, а саме:

**а) Тертя незначною мірою залежить від навантаження, якщо поверхні розділені мастильною речовиною.**

**б) Сили тертя пропорційні швидкості переміщення поверхонь при незначному тиску.**

За умов високого тиску тертя лінійно зменшується від максимального значення при незначній швидкості, до мінімуму при швидкості ковзання приблизно 0,5 м/с, а далі зростає приблизно як квадратний корінь зі швидкості.

**в) Тертя змащених поверхонь суттєво залежить від температури в робочій зоні.**

Цей вплив проявляється через зміну в'язкості мастил.

**г) Якщо поверхні повністю розділені мастильною речовиною, тертя не залежить від матеріалів пари тертя та характеристик їх поверхонь.**

**Тертя кочення** має місце, коли одне тіло котиться поверхнею іншого. З досвіду відомо, що для перекочування тіла потрібно прикласти значно меншу силу ніж для його перетягування. Відповідно, опір такому переміщенню коченням, який і визначають як тертя кочення, також значно менше.

Візуально у процесі кочення абсолютно жорсткої сфери по площині вони контактують в одній точці, а для циліндру на площині таке контактування відбувається по лінії. Але в дійсності площа контактування реальних тіл значно більша через пружні деформації одного або обох контактуючих тіл. Гістерезисні явища при пружних деформаціях і викликають опір коченню. По мірі перекочування пружні деформації відновлюються не миттєво, а з деякою затримкою. В результаті не вся енергія повертається до пружно деформованих тіл. Частина її перетворюється в тепло і зберігається в тілах або розсіюється. Саме в таких енергетичних витратах головною складовою є опір коченню.

На відміну від тертя ковзання, коефіцієнт тертя кочення має розмірність – одиниці довжини, наприклад мм або м.

Закони тертя ковзання не можуть бути застосовані до процесу кочення за однакових умов (швидкість, навантаження, температура та ін.). Але деякі узагальнення все таки можливі:

а) Сила тертя кочення прямо пропорційна навантаженню та зворотно пропорційна радіусу кривизни  $R$

$$F_r = f_r \cdot \frac{F_N}{R} \quad (3.2)$$

б) Сила тертя кочення може бути представлена у вигляді степеневі залежності від навантаження

$$F_r = k \cdot F_N^n \quad (3.3)$$

де константи  $k$  та  $n$  визначаються з експериментів.

в) Сила тертя кочення зменшується з зменшенням шорсткості поверхні контактуючих тіл.

### 3.2 Механізми тертя

У сучасній трибології виділяють два основні механізми тертя: деформаційний та адгезійний.

**Адгезійний** механізм сухого тертя пояснює розсіяння енергії утворенням адгезійних зв'язків по окремих точках контактування шорстких поверхонь та подальшим руйнуванням цих зв'язків при переміщенні одного тіла відносно іншого.

Як показано в попередньому розділі, реальна поверхня контактуючих тіл має певну шорсткість. При наявності навантаження контактування тіл відбувається по окремих виступах шорсткості. В залежності від величини навантаження та геометричних параметрів виступів, у кожній з таких точок контактування можливі пружні або пластичні деформації. В результаті деформацій в точках реального контактування можуть утворюватись адгезійні зв'язки – відбувається "зварювання" в таких точках. Якщо тіла взаємно переміщуються, то для руйнування таких адгезійних зв'язків потрібно прикласти додаткову силу, яку класифікують як силу тертя кочення.

Наприклад, якщо тіла мають приблизно однакову і невисоку міцність, руйнування зв'язків буде відбуватись по місцях щойно утвореного зварювання. При цьому реальна площа контактування для переважно пластично деформованих виступів становитиме

$$A_r = \frac{F_N}{\sigma_T},$$

а сила, необхідна для руйнування утворених адгезійних зв'язків, становитиме

$$F_T = \tau_s \cdot A_r$$

де  $\tau_s$  - напруження зсуву (межа міцності на зсув) утвореного з'єднання.

Як відомо напруження зсуву при пластичній деформації становлять  $\tau_s \approx 0.577 \cdot \sigma_T$ . Отже, коефіцієнт тертя за цих умов буде дорівнювати

$$f = \frac{F_T}{F_N} = \tau_s \cdot \frac{F_N}{\sigma_T} \cdot \frac{1}{F_N} = 0,577 \cdot \sigma_T \cdot \frac{F_N}{\sigma_T} \cdot \frac{1}{F_N} \approx 0,577.$$

Отримане значення коефіцієнту тертя відповідає реальним значенням для процесів гарячого прокатування з невисокими швидкостями.

У випадках, коли тіла мають значно більшу міцність, а у точках контактування спостерігаються не тільки пластичні, а і пружні деформації, реальна площа контактування визначається переважно показниками твердості тіл [27]

$$A_r = \frac{F_N}{H}$$

Співвідношення між твердістю та межею текучості для більшості конструкційних металів має вигляд  $H = 3 \cdot \sigma_T$ . Отже, за цих умов отримаємо дещо іншу оцінку коефіцієнта тертя

$$f = \tau_s \cdot \frac{F_N}{H} \cdot \frac{1}{F_N} = 0,577 \cdot \sigma_T \cdot \frac{F_N}{3 \cdot \sigma_T} \cdot \frac{1}{F_N} \approx 0,19.$$

Отримане значення характерне для деталей, що працюють в умовах відсутності мастильних речовин.

Якщо ж припустити, що в точках контактування мають місце лише пружні деформації, для яких реальна площа контактування визначається співвідношенням  $A_r = \frac{F_N}{E}$ , оцінка коефіцієнту тертя буде

$$f = \tau_s \cdot \frac{F_N}{E} \cdot \frac{1}{F_N} = 0,577 \cdot \sigma_T \cdot \frac{1}{2,1 \cdot 10^5} = 2,7 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma_T.$$

При значенні межі текучості конструкційних металів близько 400 Н/мм<sup>2</sup>, отримаємо  $f \approx 0,001$ .

У наведених прикладах розглядаються ідеалізовані випадки, тому в них ми маємо верхню оцінку коефіцієнту тертя. В реальних умовах значення коефіцієнта тертя можуть суттєво зменшуватись через наявність граничних плівок мастил, окислів, забруднень і т. ін., крім цього співвідношення між пружними та пластичними деформаціями в точках дійсного контактування визначається певними значеннями параметрів. Наприклад, при терті деталей з мало вуглецевої сталі у вакуумі коефіцієнт тертя досягає значення 0,8 [27].

**Деформаційний** механізм тертя характерний для випадків контактування металів з різною міцністю (твердістю). Ідеалізовану модель такого механізму тертя представляють як деформування – "проорування" (з рос. „пропахивания”) – поверхні м'якого металу одиночним виступом нерівності більш міцного металу. Приймаючи припущення про конусну форму виступу з кутом при вершині у 160°, з геометричних співвідношень можемо визначити силу, яка врівноважує зовнішнє навантаження на одиночний виступ

$$F_N = A_{rh} \cdot \sigma_T,$$

та силу, що протидіє переміщенню виступу

$$F_T = A_{rv} \cdot \sigma_T,$$

де  $A_{rh}$  - горизонтальна проекція реальної площі контактування конусного виступу (півколо);

$A_{rv}$  - вертикальна проекція реальної площі контактування конусного виступу (трикутник).

$$A_{rh} = \frac{\pi \cdot r^2}{2}, \quad A_{rv} = \frac{2 \cdot r \cdot \delta}{2} = \frac{r^2}{\tan \varphi},$$

де  $\delta$  - глибина занурення виступу в більш м'який метал;

$\varphi$  - половина кута при вершині конусу.

Після відповідних перетворень, отримаємо

$$f = \frac{F_T}{F_N} = \frac{r^2 \cdot \sigma_T}{\tan \varphi} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_T}{\pi \cdot r^2} = \frac{2}{\pi \cdot \tan \varphi}.$$

Для  $\varphi = 80^\circ$  коефіцієнт тертя буде дорівнювати 0,11. Для більш гладкої поверхні з  $\varphi = 85^\circ$   $f = 0,056$ .

Отримані значення деформаційної складової коефіцієнта тертя слід розглядати лише як найменше значення, тому що в наведених співвідношеннях не враховувалось накопичення металу перед конусним виступом та зміцнення металу під час деформування.

### 3.3 Питання для самоконтролю

3.3.1 Особливості адгезійного механізму зношення та оцінка значень коефіцієнту тертя.

3.3.2 Особливості деформаційного механізму тертя та оцінка значень коефіцієнту тертя.

3.3.3 Як впливають забруднення на поверхні на процеси та параметри тертя?

3.3.4 Які особливості взаємодії поверхонь при пластичній деформації?

3.3.5 Відмінності тертя при ковзанні та коченні.

## 4 РЕЖИМИ ЗМАЩУВАННЯ

### 4.1 Властивості та класифікація мастильних речовин

#### 4.1.1 Загальна класифікація

Речовини, які використовують для зменшення тертя, називають мастильними. Їх класифікують за такими ознаками: агрегатний стан; склад; спосіб виготовлення; призначення та інші. За агрегатним станом відрізняють такі групи мастильних речовин:

- олії (оливи, *масла, oil*) – мастила у вигляді рідини;
- масла або мастила (*пластичные смазки, grease*) – мастильні речовини, які мають внутрішню структуру;
- тверді мастила.

Олії, в залежності від хімічного складу та „походження” розділяють на :

мінеральні;  
рослинні;  
синтетичні.

Мінеральні олії виготовляють з нафти, тому їх часто називають „нафтовими”. Нафта складається в основному з вуглеводів трьох типів: аліфатичних (парафінових)  $C_nH_{2n+2}$ ; циклічних нафтових  $C_nH_{2n}$ ,  $C_nH_{2n-4}$ ; циклічних ароматичних  $C_nH_{2n-6}$  (12). Крім цього, вона містить нафтово-ароматичні (асфальтові), смолисто-асфальтові речовини, нафтової кислоти та багато інших речовин. Переганяючи нафту при атмосферному тиску, з неї відбирають бензин (різних сортів), лігроїн та гас (керосин), а в залишку отримують мазут. Шляхом вакуумної перегонки мазуту отримують ряд фракцій-дистилятів: веретенний, машинний, автоловий, циліндровий та інші. Після очищення цих фракцій-дистилятів отримують олії малої в'язкості. Залишок називається гудрон або напівгудрон. Подальша більш глибока переробка гудронів використовується для виготовлення високов'язких мастил, які називають „залишковими”.

Мінеральні олії класифікують за призначенням. За діючими стандартами відрізняють такі групи мінеральних олій:

індустріальні;  
моторні;  
трансмійні;  
енергетичні.

Узагальнюючи, можемо скласти схему класифікації мастильних речовин

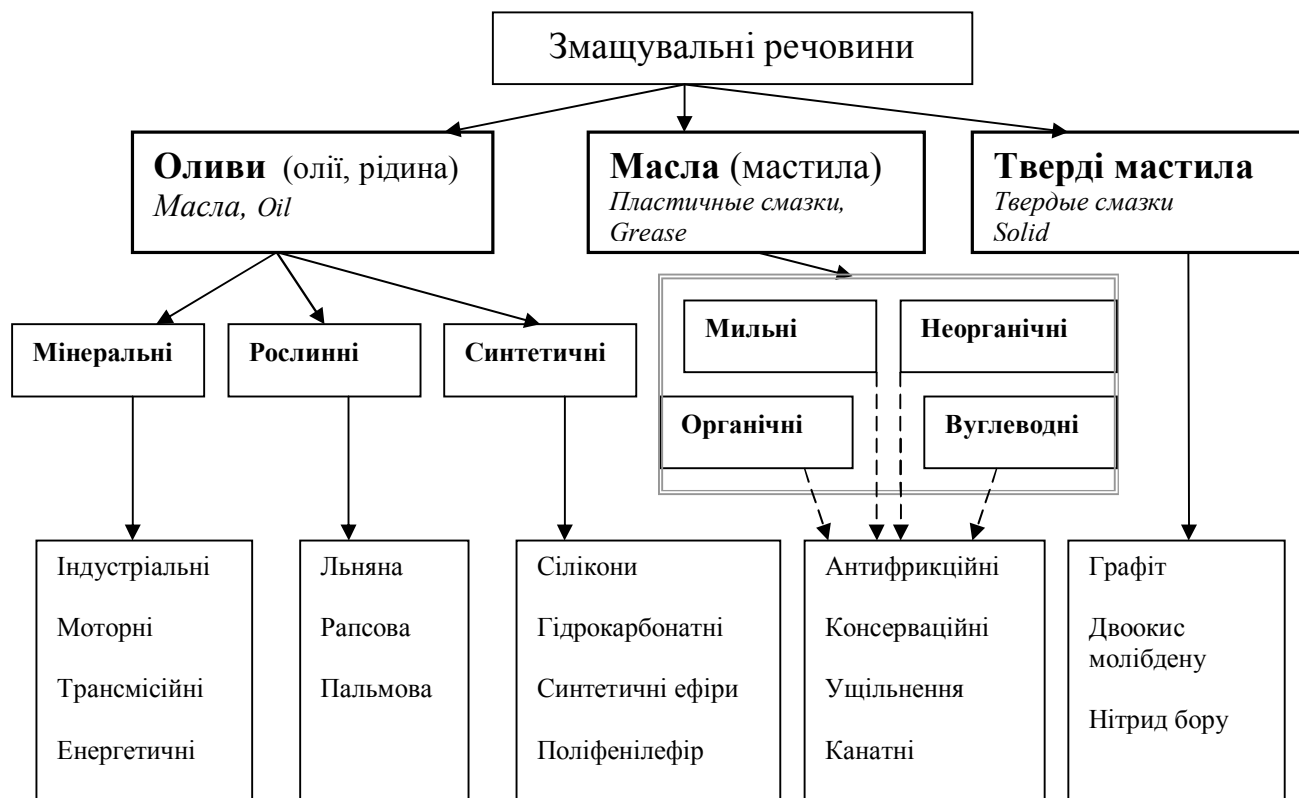


Рисунок 4.1 - Схема класифікації мастильних речовин

#### 4.1.2 Характеристики властивостей мастильних речовин

Для характеристики властивостей олив (рідких мастильних речовин) використовують такі групи показників:

- хімічні (склад, лужне число, йодне число, карбонільне число, коксове число та ін.);
- фізичні (густина, динамічна в'язкість, кінематична в'язкість, індекс в'язкості);
- фізико-хімічні (температура займання, температура краплевідділення, температура застигання та ін.).

**Густина** – фізична властивість (величина), яка визначається як відношення маси речовини до зайнятого об'єму. При вимірах густини рідин визначають масу мірного об'єму і визначають густину в кілограмах на кубічний метр. Наприклад, щільність води при температурі 4°C становить 1000 кг/м<sup>3</sup>. Для низьков'язких рідин, наприклад спиртів, використовують ареометри, які дозволяють оцінити густину у відносних одиницях – градусах.

**В'язкість** – фізична властивість рідини опиратись течії. Для рідин, і для мастильних речовин зокрема, визначають динамічну та кінематичну в'язкість.



**Динамічна в'язкість** визначається як сила опору, яка виникає при взаємному переміщенні прошарків рідини з певною швидкістю.

Наприклад, сила в дінах, яка потрібна для переміщення пластини площею в  $1 \text{ см}^2$  з швидкістю в  $1 \text{ см/с}$  при відстані між поверхнями (товщині прошарку мастила) в  $1 \text{ см}$  називається Пуазом. В системі СІ ця одиниця розмірності не використовується, але вона дозволяє зрозуміти фізичний зміст показника динамічної в'язкості. Отже, за наведеним визначенням і згідно закону внутрішнього тертя Ньютона, сила  $F$  прямо пропорційна площі  $S$  та швидкості  $V$  і обернено пропорційна товщині прошарку мастила (рідини)  $t$ . Тобто

$$F = \eta \left( \frac{S \cdot V}{t} \right)$$

Коефіцієнт пропорційності  $\eta$  і характеризує динамічну в'язкість рідини. Якщо у наведеному виразі площу перенести у ліву частину, ми отримаємо напруження зсуву, які виникають у рідині  $\tau = \frac{F}{S}$ . Відношення швидкості до відстані  $t$  являє собою швидкість зсуву  $\gamma = \frac{V}{t}$ . Отже, попередній вираз можна представити у вигляді, який відомий як закон тертя Ньютона

$$\tau = \eta \cdot \gamma.$$

Користуючись цим законом, отримаємо сучасну розмірність динамічної в'язкості

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} ; \quad [\eta] = \frac{\text{Па}}{\text{с}^{-1}} = \text{Па} \cdot \text{с}.$$

**Кінематична в'язкість** - відношення динамічної в'язкості до густини рідини. Розмірністю такого відношення є  $\text{м}^2/\text{с}$ . Ця одиниця розмірності отримала назву Стокс (Ст). Більш поширеним є використання дольної одиниці - сантистокса  $1 \text{сСт} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ст} = 1 \text{ мм}^2/\text{с}$ . Показник кінематичної в'язкості більш зручний при визначенні в'язкості за допомогою капілярних віскозиметрів.

**Індекс в'язкості** – безрозмірний показник, що характеризує міру впливу температури на в'язкість мастильних рідин. Цей показник визначають за методикою ASTM D 2270 і позначають як VI (Viscosity Index). Показник характеризує величину зміни в'язкості даної мастильної речовини в порівнянні з двома іншими, які мають відповідно високий та низький рівень зміни в'язкості. Пізніше, з появою нових мастил, діапазон зміни показника VI значно розширився: з'явилися значення більше 100 та зі знаком мінус. Останнє характерно для мастил, які складаються переважно з ароматичних вуглеводів. Тому виділяють такі діапазони для значень індексу в'язкості: низькі – до 35; середні – від 35 до 80; високі – від 80 до 110; дуже високі – понад 110. [28]

Важливо пам'ятати, що чим вище індекс в'язкості, тим меншою мірою змінюється в'язкість мастила зі збільшенням температури [29].

### 4.1.3 Мінеральні мастильні речовини

#### •Моторні оливи

**Моторні** олії призначені для використання в двигунах внутрішнього згорання. Згідно ГОСТ 17479.1-85, всі моторні оливи розділяють на класи за в'язкістю та групи за рівнем експлуатаційних властивостей. Класи в'язкості, передбачені цим стандартом, наведено у таблиці 4.1, розподіл за групами – у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1– Класи в'язкості моторних олив

Класи в'язкості моторних мастил (ГОСТ 17479.1-85)			Класи в'язкості за SAE	
Клас в'язкості	Кінематична в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, за температури		Позначення	Кінематична в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, (при 100°С), не менше
	100°С	-18°С, не більше		
<b>3з</b>	3,8	1250	<i>5W</i>	3,8
<b>4з</b>	4,1	2600	<i>10W</i>	4,1
<b>5з</b>	5,6	6000	<i>15W</i>	5,6
<b>6з</b>	5,6	10400	<b>20W</b>	5,6
<b>6</b>	Від 5,6 до 7,0 вкл.	-	<i>20</i>	5,6
<b>8</b>	7,0 до 9,3	-		
<b>10</b>	9,3 до 11,5	-		
<b>12</b>	11,5 до 12,5	-	<i>30</i>	9,3
<b>14</b>	12,5 до 14,5	-		
<b>16</b>	14,5 до 16,3	-		
<b>20</b>	16,3 до 21,9	-	<i>50</i>	16,3
<b>24</b>	21,9 до 26,1	-	<i>60</i>	21,9
<b>3з/8</b>	7,0 до 9,3	1250	<i>5W-20</i>	
<b>4з/6</b>	5,6 до 7,0	2600	<i>10W-20</i>	
<b>4з/8</b>	7,0 до 9,3	2600	<i>10W-20</i>	
<b>4з/10</b>	9,3 до 11,5	2600	<i>10W-30</i>	
<b>5з/10</b>	9,3 до 11,5	6000	<i>15W-30</i>	
<b>5з/12</b>	11,5 до 12,5	6000	<i>15W-30</i>	
<b>5з/14</b>	12,5 до 14,5	6000	<i>20W-30</i>	
<b>6з/10</b>	9,3 до 11,5	10400	<i>20W-40</i>	
<b>6з/14</b>	12,5 до 14,5	10400	<i>20W-40</i>	

Таблиця 4.2 – Групи призначення та експлуатаційних властивостей

Групи мастил згідно ГОСТ 17479.1–85			Групи мастил за API	
Позначення групи	Рекомендоване застосування		Позначення	Рекомендоване застосування
А	Нефорсовані бензинові двигуни та дизелі		SB	
Б	Б1	Мало форсовані бензинові	SC	
	Б2	Мало форсовані дизелі	CA	
В	В1	Середньофорсовані бензинові	SD	
	В2	Середньофорсовані дизелі	CB	
Г	Г1	Високо форсовані бензинові	SE	Для двигунів випуску 1972-1980
	Г2	Високо форсовані дизелі без наддуву	CC	
Д	Д1	Високо форсовані бензинові	SF	Для двигунів випуску 1981-1988
	Д2	Високо форсовані дизелі з наддувом	CD	
Е	Е1	Високо форсовані бензинові з умовами роботи важчими ніж Д1	SG	Для двигунів випуску після 1989
	Е2	Високо форсовані дизелі з наддувом бензинові з умовами роботи важчими ніж для Д2	CF-4	

Крім наведених мастил за класифікацією API виготовляють такі групи:

SH – аналог SG, але методика випробувань більш жорстка (для двигунів з 1993 року);

SJ – нова група, введена після 1996 року з більш жорсткими вимогами до викидів.

#### •Трансмісійні мастила

Трансмісійні мастила призначені для використання в трансмісіях транспортних засобів від легкових автомобілів до тракторів і тепловозів, а також в редукторах та передачах промислового обладнання. Вони являють собою базові мінеральні мастила з необхідними комплексами присадок для забезпечення відповідних функціональних властивостей.

Згідно стандарту ГОСТ 17479.2-85 трансмісійні мастила класифікують по класам в'язкості та групам за призначенням. Стандартом передбачено чотири класи в'язкості, по значенню кінематичної в'язкості при температурі 100°C, та п'ять груп властивостей (дивись таблиці 4.3 і 4.4).

Трансмісійні мастила позначають літерами „ТМ” та, через дефіс, вказується група і клас в'язкості. Приклади позначень з одночасним порівнянням із застарілими позначеннями та відповідністю аналогічним мастилам за класифікацією SAE наведено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.3

Класи в'язкості трансмісійних мастил згідно ГОСТ 17479.2-85		
Клас в'язкості	Кінематична в'язкість при 100 °С, мм <sup>2</sup> /с	Температура, за якої динамічна в'язкість не перевищує 150 Па·с, °С, не більше
9	6,00-10,99	-35
12	11,00-13,99	-26
18	14,00-24,99	-18
34	25,00-41,00	-

Таблиця 4.4

Групи трансмісійних мастил за ГОСТ 17479.2-85		
Група мастил за експлуатаційними властивостями	Склад мастил	Область використання
1	Мінеральні мастила без присадок	Циліндричні, конічні та черв'ячні передачі при контактних напруженнях до 1600 МПа і температурі до 90°С.
2	Мінеральні мастила з протизношувальними присадками	Те ж, але при контактних напруженнях до 2100 МПа і температурі мастила в об'ємі до 130 °С
3	Мінеральні мастила з протизадирними присадками помірної ефективності	Циліндричні, конічні, спіральні-конічні та гіпоїдні передачі при контактних напруженнях до 2500 МПа і температурі до 150 °С
4	Мінеральні мастила з протизадирними присадками високої ефективності	Циліндричні, конічні, спіральні-конічні та гіпоїдні передачі при контактних напруженнях до 3000 МПа і температурі до 150 °С
5	Мінеральні мастила з протизадирними присадками високої ефективності та багатофункціональної дії	Гіпоїдні передачі при динамічних навантаженнях, контактних напруженнях понад 3000 МПа і температурі мастил до 150 °С

Наприклад, найбільш поширене мастило ТМ-5-18, більш відоме за позначенням ТАД-17и, є мінеральним універсальним мастилом, точніше сумішшю залишкових та дистильованих мастил. Призначене для використання у всіх типах передач, в тому числі в автомобільних, гіпоїдних. Мастило містить багатофункціональну присадку, в якій присутні сполуки сірки та фосфору, а також антидепресорну та антипінну присадки. Діапазон робочих температур від -25°С до 140 °С. Кінематична в'язкість при температурі 50°С 110-120 мм<sup>2</sup>/с, при 100°С -  $\geq 17,5$  мм<sup>2</sup>/с. Індекс в'язкості 100.

Таблиця 4.5

Відповідність позначень			
Позначення за ГОСТ 17479.2-85	Застаріле позначення	Клас в'язкості згідно SAE	Група згідно API
TM-1-18	ТС-14,5	90	GL-1
TM-1-18	AK-15		
TM-2-9	ТСп-10ЭФО	75W	GL-2
TM-2-18	ТЭп-15	90	
TM-2-34	ТС	140	
TM-3-9	ТСзп-8	75W	GL-3
TM-3-9	ТСп-10	75W	
TM-3-18	ТСп-15К, ТАп-15В	90	
TM-5-9	ТСз-9гип	75W	GL-5
TM-5-18	ТСп-14гип, ТАД-17и	90	
TM-5-34	ТСгип	140	
TM-5-12з(рк)	TM5-12рк	80W/85W	

#### • Гідравлічні мастила

Ця група мастил призначена для використання в гідравлічних системах машин та механізмів. За стандартом ГОСТ 17479.3 „Мастила гідравлічні. Класифікація і призначення” їх розділяють за класами в'язкості та групам за експлуатаційними властивостями. Тому позначення мастила складається з аббревіатури „МГ” (мастило гідравлічне), цифр, що вказують на клас в'язкості, та літери (А, Б або В), якою позначається відповідність певній групі експлуатаційних властивостей (див. таблицю 4.6).

Група А (НН за ISO) – нафтові мастила без присадок призначені для використання в малонавантажених гідравлічних системах з шестеренними або поршневыми насосами, які працюють при тиску до 15МПа і температурі до 80°C.

Група Б (HL за ISO) – мастила з антиокислювальними та антикорозійними присадками, які призначені для середньо навантажених гідросистем з тиском до 25 МПа та температурі до 80°C.

Група В (HM за ISO) – очищені мастила з антиокислювальними, антикорозійними присадками та протизношувальними присадками, які призначені для гідросистем з тиском понад 25 МПа та температурі понад 90°C.

Таблиця 4.6

Класи в'язкості гідравлічних мастил за ГОСТ 17479.3-85

Клас в'язкості		Кінематична в'язкість при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с
Низьков'язкі	5	4,14-5,06
	7	6,12-7,48
	10	9,00-11,00
	15	13,50-16,50
Середньов'язкі	22	19,80-24,20
	32	28,80-35,20
В'язкі	46	41,40-50,60
	68	61,20-74,80
	100	90,00-110,00
	150	135,00- 165,00

#### •Індустріальні мастила

**Індустріальні** - це група найбільш поширених мінеральних олій, які можуть бути використані в багатьох механізмах загального призначення: редукторах, підшипниках, гідравлічних системах. Ці мастила виготовляють згідно ГОСТ 17479.4-87 ("*Масла индустриальные. Классификация и обозначение*"). У стандарті виділяють дві підгрупи мастил:

- олії загального призначення без присадок;
- олії загального призначення з присадками (леговані).

До першої групи відносять мастила, які можуть бути застосовані в машинах та механізмах промислового обладнання, умови роботи яких не вимагають окремих вимог до антиокислювальних або антикорозійних властивостей. Інтервал зміни кінематичної в'язкості таких мастил становить від 2,2 до 190 мм<sup>2</sup>/с при температурі 50°С. Наприклад: И-5А, И-8А, И-12А, И-12А1, И-20А, И-30А, И-40А, И-50А.

До другої групи відносять дистильовані та залишкові нафтові мастила, або їх суміші, з глибоким селективним очищенням та з присадками, які забезпечують антиокислювальні, протизношувальні, антикорозійні та антипінні властивості. Такі мастила, леговані відповідними наборами присадок, використовують у сучасному механічному обладнанні. Прикладами таких мастил є наступні: И-Л-С-5, И-Л-С-10, И-Л-С-22 (індустріальні леговані сірчані); ИГП-18, ИГП-30, ИГП-38, ИГП-49, ИГП-72, ИГП-91, ИГП-114, ИГП-152, ИГП-182 (індустріальні гідравлічні). Цифри означають кінематичну в'язкість при температурі 50°С.

Для порівняння розглянемо класифікацію індустріальних мастил за стандартом ISO 3448-75 („Змашувальні матеріали індустріальні. Класифікація в'язкості”), за яким виділяють 18 класів в'язкості (Viscosity Grade), визначеної при температурі 40°С (див. таблицю 4.7).

Таблиця 4.7 - Класи в'язкості індустріальних мастил за ISO 3448-75

Клас      В'язкість кінематична при      Клас      В'язкість кінематична при

в'язкості	40°C, мм <sup>2</sup> /с	в'язкості	40°C, мм <sup>2</sup> /с
2	1,9-2,5	68	61-75
3	3,0-3,5	100	90-110
5	4,0-5,0	150	135-165
7	6,0-8,0	220	198-242
10	9,0-11,0	320	288-352
15	13,0-17,0	460	414-506
22	19,0-25,0	680	612-748
32	29,0-35,0	1000	900-1100
46	41,0-51,0	1500	1350-1650

#### •Енергетичні мастила

До групи енергетичних відносять мастила, які забезпечують змащування та інші технічні, технологічні або експлуатаційні функції. Їх виготовляють з нафти, але введенням присадок забезпечують необхідні властивості. До енергетичних мастил відносять:

- компресорні;
- турбінні;
- трансформаторні;
- конденсаторні;
- кабельні.

Компресори – тип механізмів для збільшення тиску робочої рідини або газу. За конструктивним виконанням відрізняють поршневі та ротаційні компресори, турбокомпресори та компресори холодильних установок. Мазильні речовини в компресорах повинні забезпечувати зменшення тертя на рухомих частинах (клапана, циліндри), герметизацію робочих камер та охолодження деталей. В процесі роботи деталі компресорів можуть розігріватись до температури 180 - 220 °С і створювати тис до 20 МПа, тому основними показниками для компресорних мастил є герметизуючі властивості, протипригарні та антикорозійні властивості, термоокислювальна стабільність.

За чинними стандартами виготовляють чотири групи **компресорних мастил**. Перша – для робочих температур до 160°C; друга – до 180 °С; третя – до 200 °С; четверта – понад 200°C. Позначення компресорних мастил складається з літери „К”, номера групи та, після дефісу, значення кінематичної в'язкості при температурі 100°C.

**Турбінні мастила** призначені для забезпечення змащування та охолодження підшипників та інших деталей парових та газових турбін, гідротурбін та турбокомпресорів. Крім цього, вони можуть використовуватись у системах регулювання турбін, а також у гідравлічних системах інших механізмів. Комплекс вимог до турбінних мастил включає

такі показники: стабільність проти окислювання, здатність не утворювати осаду, здатність не утворювати емульсій з водою, не призводити до корозії деталей та інші. Приклади турбінних мастил: Тп-22С; Тп-22Б; Тп-30 Тп-46 (цифрами позначають кінематичну в'язкість при температурі 50°C).

**Трансформаторні мастила** – призначені для використання в силових та вимірювальних трансформаторах і в масляних вимикачах. Основні показники для цієї групи мастил: електроізолюючі властивості; низька в'язкість, стабільність проти окислювання, тривалість роботи. Приклади трансформаторних мастил: ТКп, Т1500У, ТК, ВГ, АГК, МВТ. Основні властивості найбільш використовуваних мастил наведено у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8

Показники властивостей	Значення показників для мастил марок:			
	ТКп	Т-1500У	ГК	ВГ
Кінематична в'язкість при температурі: 50°C 40°C -30°C	9 - 1500	- 11 1300	9 - 1200	9 - 1200
Кислотне число, мг КОН/г, не більше	0,02	0,01	0,01	0,01
Температура займання в закритому тиглі, не нижче °С	135			
Температура застигання, не вище °С	-45			

**Конденсаторні мастила** використовують для „просочування” ізоляції паперово-масляних конденсаторів у радіотехніці, тому основні вимоги пов'язані з забезпеченням ізолюючих властивостей.

**Кабельні мастила** використовуються як ізолююче та теплопровідне середовище в наповнених мастилом кабелях. Для них також основними показниками є ізолюючі властивості.

#### 4.1.4 Рослинні олії

З насіння більшості рослин можна видобувати олії. Значна кількість таких олій використовуються як харчові продукти. Наприклад, соняшникова, кукурудзяна, горіхова, оливкова, арахісова олії, олія какао. Але найбільші обсяги виробництва мають рослинні олії промислового призначення. Серед них лідером є пальмова олія, яку використовують для виготовлення мила та як технологічне мастило при виготовленні холоднокатаних листів. Крім пальмової, знаходять використання такі олії: касторова, кокосова, конопляна, рапсова, бавовняна („хлопковая”; з насіння бавовни), соєва, та інші. Вони використовуються переважно при виробництві мила, оліфи, лаків та фарб. Як мастильні речовини знаходять використання: касторова (як емульгатор); бавовняна (у прокатному виробництві та для виготовлення



олеїнової кислоти); рапсова олії. Властивості рослинних олій наведено в довіднику [ 21]

#### 4.1.5 Синтетичні мастила

На відміну від мінеральних, рослинних і навіть тваринного походження мастильних речовин синтетичні мастила є продуктом переробки вихідної сировини на молекулярному рівні. Вони містять речовини відомі в природі, але на основі наукових досягнень та жорстко контрольованих хімічних процесів вдається виготовити або виділити речовини з унікальними властивостями. В залежності від складу та будови молекул відрізняють декілька групи синтетичних мастильних мастил (олив) за даними [30], основні з яких наведено у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9

Назва групи	Діапазон робочих температур, °С	Відмінності
Синтетичні гідрокарбонатні	-60 ...125	<i>VI=125 – 250; Добра змащувальна здатність</i>
Полігліколі (етиленгліколь гліцерин)	-40 ... 100	<i>VI=160 – 220; Невисока вартість</i>
Синтетичні ефіри (диефір поліефіри)	-65 ... 150	<i>VI=125 – 250; Дуже добра здатність до змащування та сприйняття навантажень.</i>
Сілікони (діметил, феніл, галогенід)	-70 ... 200	<i>VI=200 – 650; Виключно низька леткість (випаровуваність)</i>
Флюороефір	-90 ... 250	<i>VI=100 – 350; Добра змащувальність, висока інертність.</i>
Поліфенілефір (PPE)	10 ... 250	<i>VI=40 – 60; Дуже добра змащувальна здатність але висока леткість.</i>
Пертетрафторетілен (Perfluoropolyether –PFPE)	-45 ... 125	<i>VI=100 – 250; Добра змащувальність, висока інертність.</i>

Основні властивості синтетичних мастил, які обумовлюють їх застосування:

- висока змащувальна здатність – ефективне зменшення тертя та зменшення зношення;
- виняткова термічна та окислювальна стабільність;
- широкий діапазон зміни в'язкості;
- незначна залежність в'язкості від температури.

До групи синтетичних гідрокарбонатних мастил відносять поліальфаолефіни та діалкідні бензоли. Такі мастила проявляють характеристики, близькі до мінеральних мастил та можуть утворювати з ними суміші. Використовують у двигунах внутрішнього згорання, турбінах, як гідравлічні та компресорні рідини, як мастила в зубчастих передачах та підшипниках. Близькість властивостей до мінеральних олій пояснюється тим, що в структурі молекул одна з металних груп ( $\text{CH}_3$ ) замінюється на карбоксильну  $-\text{COOH}$ .

#### 4.1.6 Пластичні мастильні речовини

За визначенням стандарту ГОСТ 26098-84 „пластичне мастило” – мазеподібний нафтопродукт або синтетичний продукт, який відрізняється наявністю структурного каркасу, утвореного частками загущувача, і в чарунках (ячейках) якого розміщено базове мастило, який призначено для зменшення зносу деталей при терті, консервації виробів, герметизації ущільнень і з'єднань.

Пластичні мастильні речовини широко використовують в підшипниках, шарнірах, зубчастих, гвинтових та ланцюгових передачах, для направляючих механічного обладнання тощо. Класифікують ці мастила за **консистенцією, складом та призначенням** (областями застосування).

За консистенцією пластичні мастила розділяють на **напіврідкі, пластичні та тверді**.

Напівтверді та пластичні мастила являють собою колоїдні системи, які складаються з дисперсійного середовища, дисперсної фази та присадок. Дисперсійне середовище утворюють мінеральні мастила дистильованої або залишкової груп, а також їх суміші. Дисперсійною фазою є різного роду згущувачі. У більшості мастил концентрація згущувачів становить від 3 до 15%. Тверді пластичні мастила являють собою суспензії, в яких дисперсійним середовищем є високов'язкі залишкові мастила, смола або інше зв'язуюче, а згущувачем – тверде мастило.

Подібна, але більш деталізована класифікація пластичних мастил запропонована Національним інститутом змащування пластичними мастилами (National Lubricating Grease Institute - NLGI), яка ґрунтується на показнику пенетрації, що характеризує глибину занурення конусу у пробу мастильної речовини і вимірюється у десятих долях міліметра, згідно з методикою ASTM Method D217. Класи консистенції за цим стандартом наведено у таблиці 4.10.

Таблиця 4.10

Клас консистенції за NLGI	Глибина занурення конусу за методом ASTM при температурі 25°C	Консистенція мастила	
000	445-475	Рідкі	Напіврідкі
00	400-430	Майже рідкі	
0	355-385	Гранично м'які	
1	310-340	Дуже м'які	Пластичні
2	265-295	М'які	
3	220-250	Середньої твердості	
4	175-205	Тверді	Тверді
5	130-160	Дуже тверді	
6	85-115	Гранично тверді	

За складом пластичні мастила розділяють на групи за основним компонентом, яким можуть бути: **мило, неорганічні мастила, органічні мастила, вуглеводи.**

Мило, яке використовують як загущувач, являє собою солі вищих карбонових кислот. В залежності від аніона мила відрізняють кальцієві, літієві, барієві, алюмінієві і натрієві мила. Мильні мастила, в залежності від використаної жирової сировини, називають умовно синтетичними (аніон мила - радикал синтетичних жирних кислот) або жировими (аніон мила - радикал природних жирних кислот), наприклад, синтетичні або жирові солідоли.

Неорганічні мастила містять, у якості загущувача, термостабільні високодисперсні неорганічні речовини з розвиненою поверхнею. Прикладами таких речовин можуть бути силікагель, бентоніт, графіт, азбест та інші.

Органічні мастила містять високодисперсні термостабільні органічні речовини, такі як полімери, пігменти, полімочевина, сажа та інші.

Вуглеводні мастила містять згущувачі з високо плавких вуглеводів, таких як петролатум, церезин, парафін, озокерит, природний або синтетичний віск.

За призначенням пластичні мастила розділяють на такі групи: **антифрикційні; консерваційні; ущільнюючі; канатні.**

Група антифрикційних мастил найбільш чисельна і включає такі підгрупи:

- загального призначення, наприклад: *Солідол С, Солідол Ж, Графітна Ж*, які мають діапазон робочих температур від -30 до 60°C;

- загального призначення для підвищених температур, наприклад: *Смазка 1-13* (підшипники електродвигунів, маточини (ступиці) колес автомобілів), *Литін-2* (голчасті підшипники карданних шарнірів), які використовують при температурах від -40 до 120°C);
- багатоцільові, наприклад *Літол-24* – водостійке мастило, утворене сумішшю нафтових мастил, літєвого мила 12-оксистеаринової кислоти та пакетом присадок, яке має добрі консерваційні властивості та використовується в діапазоні температур від -40 до 120°C; *Фіол-2* – водостійке мастило для підшипників ковзання та кочення, зубчастих передач промислового обладнання та інше;
- термостійкі, які призначені для використання в вузлах тертя з робочими температурами до 200 – 350°C, наприклад: *ЦИАТИМ – 201* – пластичне мастило, яке складається з синтетичного мастила, загущеного комплексним кальцієвим милом, та антиокислювальної добавки і призначене для підшипників електромашин та приладів з частотою обертання до 10000 об/хв. (від -60 до 150°C); *ПФМС-4С* – авіаційні вузли тертя, тихохідні підшипники кочення, гвинтові шарикові передачі, різьби (від -30 до 300°C);
- морозостійкі – до -60°C, наприклад *ЦИАТИМ – 203*, *ГОИ-54n*;
- хімічно стійкі – мастила для різьбових та контактних з'єднань або ущільнень, які працюють в агресивних середовищах, наприклад *ЦИАТИМ – 205*;
- редукторні, наприклад: *ЦИАТИМ – 208* для важко навантажених редукторів; *Трансол – РОМ* – для редукторів металургійного обладнання (від -30 до 90°C); *Редуктол М* - промислове обладнання та транспортна техніка при температурі від -40 до 150 °С та контактних напруженнях до 2,5 ГПа ;
- вузькоспеціалізовані, такі як для електричних машин, електроконтактні, автомобільні (*ШРУС-4*, *Фіол-2У*), залізничні, морські, авіаційні, індустриальні (*ЛКС-металургійна*), бурові.

Консерваційні мастила призначені для захисту металевих деталей і механізмів від корозії при експлуатації, транспортуванні, зберіганні, наприклад „*Пушечная (ПВК)*”.

Ущільнюючі мастила призначені для забезпечення герметизації зазорів, полегшення складання-розбирання арматури, різьби та рухомих з'єднань, в тому числі у вакуумних пристроях.

Канатні мастила забезпечують захист від корозії та підтримання працездатності металевих канатів.

#### 4.1.7 Тверді мастила

Всі тверді мастильні речовини, або як їх ще називають твердозмащувальні матеріали (ТЗМ), за будовою та складом розділяють на

неорганічні та органічні. До органічних належать тверді полімерні матеріали, наприклад політетрафторетілен (ПТФЕ), поліаміди та ін. Серед неорганічних виділяють шаруваті (слоистые) та нешаруваті. До шаруватих належать графіт, дісульфід молібдену, нітрід бору. До нешаруватих відносять хлориди та фториди металів, окиси та м'які метали (Pb, Sn, Cd, In, Ga, Ag, Al) [31].

Найбільш відомим ТЗМ є графіт. Його змащувальні властивості визначаються особливостями кристалічної будови.

Як відомо, графіт має гексагональні кристалічні ґратки (*кристаллическую решетку*), у вершинах яких атоми вуглецю зв'язані між собою ковалентними силами. Відстані між атомими вуглецю в такій ґратці (решітці) дорівнюють 0,14 нм. Відстані між окремими шарами – кристалічними площинами, становить 0,34 нм. Сила зв'язку між кристалічними площинами визначається Ван-дер-Ваальсовими силами, які на 3 – 4 порядки слабші за ковалентні. Тому міцність графіту на зсув у напрямку, паралельному кристалічним площинам відповідно менша ніж в напрямках, які відповідають руйнуванню ковалентних зв'язків. Ефект змащувальної дії графіту суттєво підвищується за рахунок молекул води, які легко адсорбуються між кристалічними площинами і сприяють послабленню взаємодії між ними. Наприклад, при відсутності вологи коефіцієнт тертя з використанням графіту може становити 0,3, а при наявності адсорбованої вологи зменшується до 0,05.

Аналогічну будову має дісульфід молібдену, кристалічна будова якого складається з атомів молібдену, з'єднаних ковалентними силами в правильні шестикутники, а атоми сірки, з'єднуючись з атомами молібдену, утворюють розгалужену об'ємну структуру, відділяючи прошарки атомів молібдену один від одного. Атоми сірки сусідніх прошарків взаємодіють через слабкі Ван-дер-Ваальсові сили, що й забезпечує незначний опір зсуву цього матеріалу. Одночасно плівка цього мастильного матеріалу може сприймати порівняно високі навантаження і зберігати свої антифрикційні властивості до тиску в  $3 \cdot 10^3$  МПа, що відповідає межі міцності більшості металів.

Нітрід бору, аналогічно графіту може мати гексагональну шарувату будову або будову тетраедру. Як ТЗМ використовується шаруватий нітрід бору.

Крім наведених речовин, для змащування використовують дісульфід вольфраму  $WS_2$ , сульфід свинцю (олива)  $PbS$ , хлорид свинцю  $PbCl_2$ , хлорид міді  $CuCl_2$ , фториди алюмінію  $AlF_3$ , магнію  $MgF_2$  та інші.

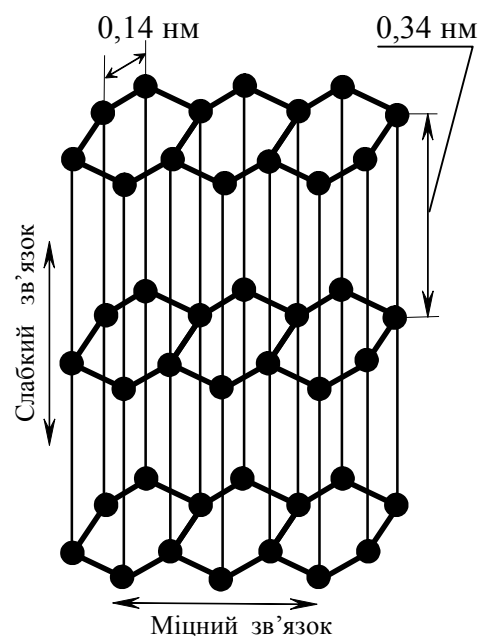


Рисунок 4.2 - Схема кристалічної будови графіту

## 4.2 Моделі мастильних речовин

У подальшому розгляді терміни рідина та речовина будемо розглядати як синоніми.

Терміном „реологія” позначають „вивчення змін форми та течії речовини, включаючи пружність, в'язкість та пластичність”.

У реології всі речовини, які течуть або деформуються, розділяють на дві основні категорії [ 32 ]:

- ньютонівські та;
- неньютонівські.

Ньютонівські рідини є найбільш поширеними. До них відносять усі рідини, для яких спостерігається прямо пропорційна залежність між напруженнями зсуву  $\tau$  та швидкістю зсуву  $\dot{\gamma}$ . Цю залежність називають емпіричним законом Ньютона

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (4.1)$$

Згідно з цим законом, в'язкість рідини  $\eta$ , представлена як коефіцієнт пропорційності, незважаючи на те, що вона є фізичною величиною. Це можливо лише для ньютонівської рідини тому, що її в'язкість залишається постійною для всього діапазону зміни швидкості зсуву. Ньютон вважав, що всі матеріали при даній температурі мають в'язкість, яка не залежить від швидкості зсуву. Іншими словами, подвоєна сила буде перемішувати рідину вдвічі швидше [ 32 ].

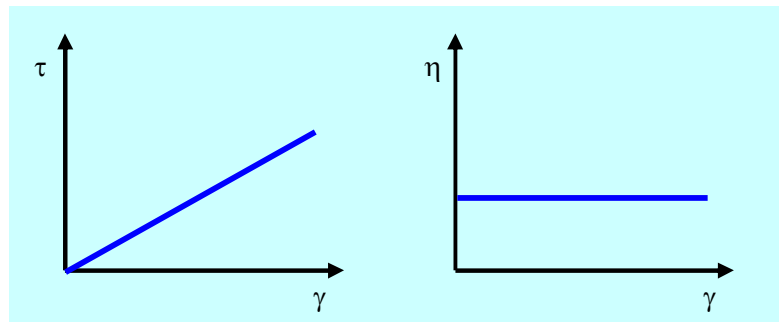


Рисунок 4.3 – Властивості ньютонівських рідин

Всі речовини, течія яких не відповідає закону Ньютона, тобто речовини, для яких відношення напружень зсуву до швидкості зсуву не є постійною величиною, відносять до категорії неньютонівських. Для неньютонівських речовин використовують поняття „ефективна” або „приведена” в'язкість.

Серед неньютонівських речовин виділяють три великі групи [ 33 ]:

1 – узагальнені ньютонівські речовини, властивості яких не змінюються з часом, а в'язкість може залежати від швидкості зсуву та інших факторів;

2 – речовини, для яких спостерігається зміна властивостей з часом;

3 – в'язко-пружні речовини

До першою групи речовин відносять псевдопластичні, дилатантні та пластичні.

Псевдопластичні речовини проявляють нелінійне збільшення напружень зсуву і зменшення в'язкості зі зростанням швидкості зсуву. Причому інтенсивність зростання напружень поступово зменшується, наближаючись до певної межі. Прикладами таких речовин можуть слугувати фарби, емульсії, дисперсії різних типів. Через особливості течії таких речовини, які наведено на рисунку 4.4, їх часто називають „зі зменшенням зсуву”. У спрощеному розумінні нелінійність пов'язана зі зміною структури речовини, наприклад, за рахунок орієнтації молекул у напрямку зсуву, що призводить до зменшення в'язкості і відповідного зменшення напружень зсуву. Чим більше швидкість зсуву, тим у більшій мірі змінюється структура і тим менші напруження зсуву.

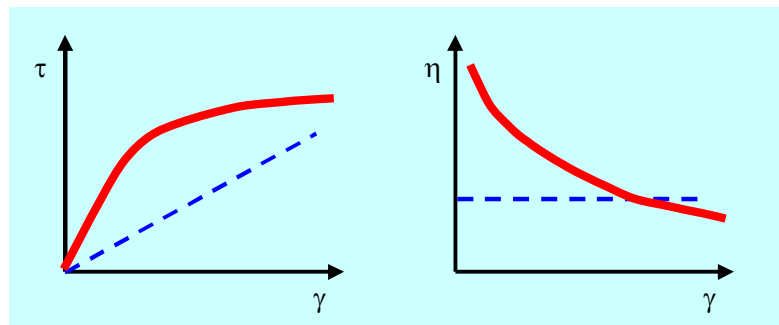


Рисунок 4.4 – Особливості течії псевдо пластичних речовин

Дилатантні речовини проявляють збільшення напружень зсуву та збільшення в'язкості зі зростанням швидкості зсуву. Дилатансія менш поширена ніж псевдопластичність. Прикладами речовин з дилатантними властивостями є розчини глини, розчини крохмалю у воді, суміші піску з водою та інші. Такі речовини називають „зі збільшенням зсуву”. Збільшення в'язкості пояснюється утворенням певних зв'язків між частками речовини, наприклад за рахунок процесів агрегування.

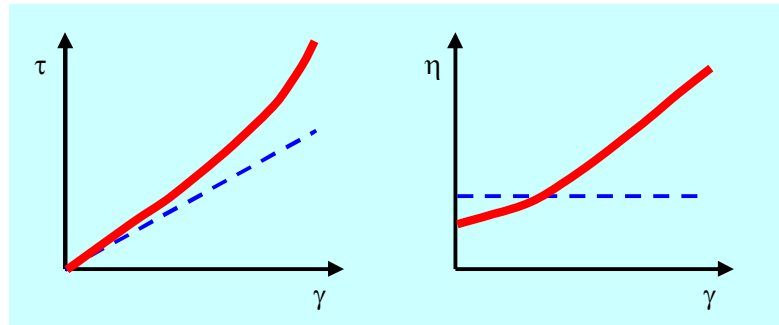


Рисунок 4.5 – Особливості течії дилатантних речовин

Відмінності між псевдопластичними та дилатантними речовинами досить наглядно демонструє логарифмічна діаграма напруження-швидкість [ 34 ].

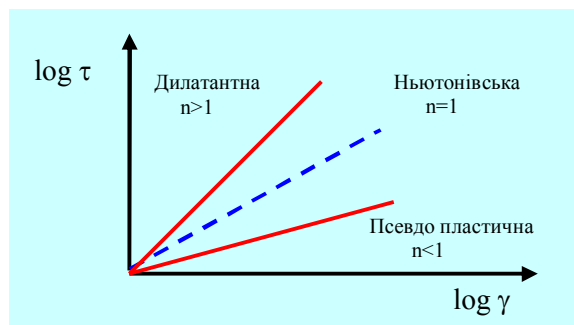


Рисунок 4.6 – Узагальнена діаграма

Пластичні речовини в статичному стані, за відсутності зовнішнього впливу, проявляють властивості твердих тіл. Лише коли зовнішні сили створять в об'ємі такої речовини певні напруження, можлива її течія (деформація). Напруження, рівень яких повинен бути перевищений для деформування речовини, називають „межею пластичності” або „напруження пластичності”. По досягненні межі пластичності речовина може деформуватися (текти), проявляючи чисто пластичні (жорстко-пластичні), ньютонівські, псевдопластичні або дилатантні властивості. Прикладами таких речовин можуть бути консистентні (пластичні) мастильні речовини, метали в процесах деформування, особливо в гарячому стані, кетчуп, майонез та інші.

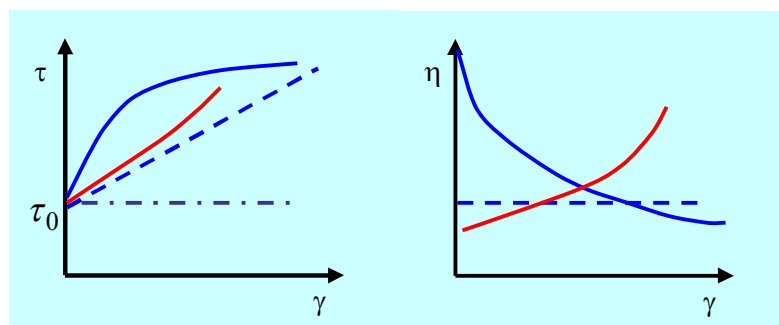


Рисунок 4.7 – Особливості течії пластичних речовин



Групу речовин, властивості яких залежать від часу при незмінних зовнішніх умовах, розділяють на дві підгрупи:

- тиксотропні;
- реопектичні.

Тиксотропні речовини проявляють зменшення в'язкості з часом при постійній швидкості зсуву (рисунок 4.8). Зменшення в'язкості призводить до зменшення напружень зсуву, аналогічно псевдопластичним речовинам. Тому тиксотропні речовини також називають „зі зменшенням зсуву”. При цьому потрібно пам'ятати, що ознака зменшення зсуву є обов'язковою для тиксотропних речовин, але не всі речовини зі зменшенням зсуву є тиксотропними. Зменшення зсуву пояснюється зміною, наприклад, частковим руйнуванням структури.

Реопектичні речовини за властивостями протилежні тиксотропним – з часом їх в'язкість зростає при незмінній швидкості зсуву. Зростання в'язкості пояснюється утворенням нової, більш складної структури речовини.

Реопектичні речовини зустрічаються значно рідше ніж тиксотропні. Прикладами тиксотропних речовин є консистентні (пластичні) мастила, деякі види фарб. Тиксотропні речовини можуть проявляти гістерезисні явища, або мати більш складну поведінку [ 35 ]

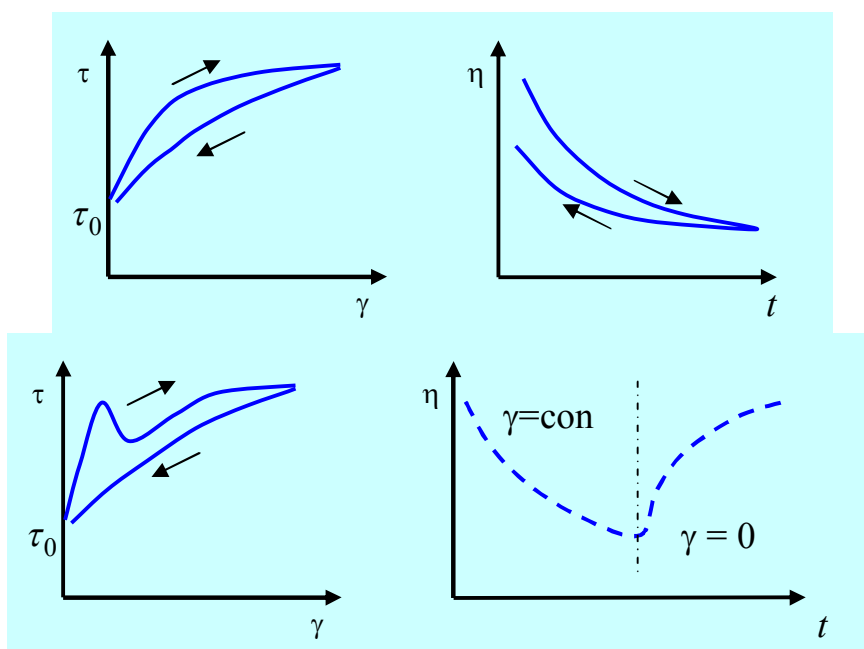


Рисунок 4.8 – Особливості течії тиксотропних речовин [ 35 ]

Для групи в'язко-пружних речовин характерне поєднання властивостей пружного твердого тіла та в'язкої рідини. Причому, в'язкі властивості можуть проявлятися по аналогії зі звичайною ньютонівською рідиною (суцільна лінія на рисунку 4.9), як пластична деформація (пунктирна лінія) або як псевдопластична деформація (штрих-пунктирна лінія).

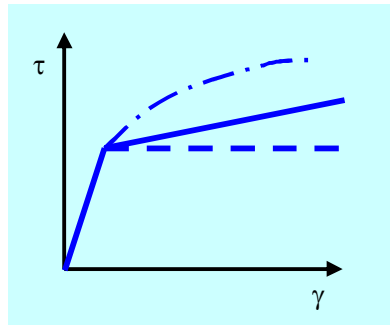


Рисунок 4.9 – Особливості течії в'язко-пружних речовин

Наведена класифікація речовин враховує процеси в'язкої течії і охоплює лише основні відмінності поведінки речовин. Для їх математичного опису використовують відповідні моделі.

При побудові моделей неньютонівських речовин використовують принцип механічного моделювання, запропонований Рейнером [ 33 ]. За цим принципом поведінку різних речовин визначають як паралельне або послідовне поєднання елементів з в'язкою, пружною або пластичною деформацією. Наприклад, при послідовному з'єднанні елементів з пружною деформацією за законом Гука та пластичною деформацією за законом Сен-Венана отримаємо модель речовини Прандтля

$$\begin{aligned} \tau &= E\gamma, & \text{при } \tau < \tau_0; \\ \tau &= \tau_0. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Паралельне з'єднання в'язкого та пластичного елементів з послідовно приєднаним пружним елементом утворює модель Бінгама

$$\begin{aligned} \tau &= E\gamma, & \text{при } \tau < \tau_0; \\ \tau &= \tau_0 + \eta_b \dot{\gamma} & \text{при } \tau > \tau_0. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Відома також модель пружно пластичної речовини у вигляді

$$\begin{aligned} \tau &= G\gamma, & \text{при } \tau \leq \tau_0; \\ \tau &= \tau_0 + K(\gamma - \gamma_c), & \text{при } \tau > \tau_0. \end{aligned} \quad (4.4)$$

де  $E$  - модуль пружності;

$G$  - модуль пружності при зсуві;

$K$  - показник пластичності;

$\gamma$  - деформація зсуву;

$\dot{\gamma}$  - швидкість деформації зсуву;

$\tau_0$  - критичне напруження зсуву – межа текучості.

Такі математичні моделі з достатньою точністю описують поведінку деяких реальних речовин, але будь-яка математична модель не може в повній мірі врахувати всі особливості існуючих в природі та створених для конкретного застосування різноманітних речовин. Тому постійно

з'являються нові або уточнюються існуючі математичні моделі. Розглянемо деякі з таких моделей.

Для неньютонівських речовин нелінійність залежності в'язкості від швидкості зсуву представляють через різні математичні функції. Так, відома модель Прандтля-Ейрінга [ 33 ], в якій нелінійність враховується через гіперболічний синус у вигляді

$$\tau = A \cdot \operatorname{arcsinh} \left( \frac{\dot{\gamma}}{C_1} \right), \quad (4.5)$$

або,

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau_0}{\eta} \cdot \sinh \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right), \quad (4.6)$$

де  $C_1$  - стала Прандтля-Ейрінга;

$\tau_0$  - граничне напруження зсуву.

Найбільш поширеним є використання моделі Освальда де-Віля (Ostwald-de Waele) або степеневому закону [ 33 ]

$$\tau = K \dot{\gamma}^n, \quad (4.7)$$

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1},$$

де  $K$  - показник консистенції;

$n$  - показник степені.

Для певного діапазону зміни швидкостей зсуву степеневий закон дозволяє досить точно визначити поведінку і властивості значної кількості речовин, у тому числі псевдо пластичних та дилатантних. Для більш широкого діапазону зміни швидкостей зсуву використовують модель Кроса (Cross, 1965) [ 36 ]

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (K \dot{\gamma})^n}, \quad (4.8)$$

де  $\eta_0$  - в'язкість при низькій швидкості зсуву, умовно при  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ ;

$\eta_\infty$  - в'язкість при високій швидкості зсуву ( $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ ).

Вид залежностей для напружень зсуву та в'язкості, згідно моделі Кроса, наведено на рисунку 4.10.

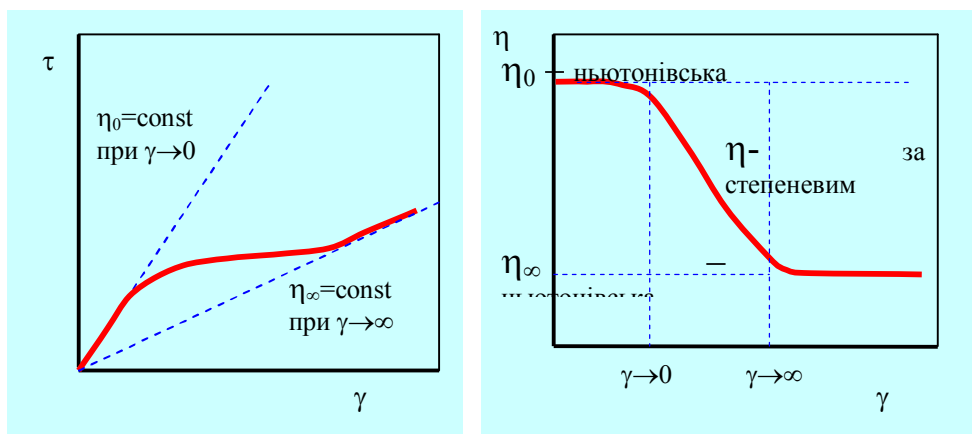


Рисунок 4.10 – Особливості течії пластичних речовин [ 34 ]

Для пластичних речовин одна з перших моделей була запропонована Бінгамом (Bingham) [ 33 ]. Модель, на відміну від форми представленої виразом (4.3), дозволяє враховувати в'язку течію після досягнення певних напружень зсуву

$$\tau = \tau_0 + \eta_b \dot{\gamma}. \quad (4.9)$$

де  $\eta_b$  - пластична в'язкість Бінгама.

Аналогічна за структурою модель була запропонована Кесоном (Casson) [33 ]

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta \dot{\gamma}}. \quad (4.10)$$

Для пластичних речовин, які, на відміну від моделі Бінгама, після досягнення межі пластичності деформуються за степеневим законом, Гершель та Балклі (Herschel-Bulkley) запропонували модель у вигляді [ 33 ]

$$\tau = \tau_0 + (K \dot{\gamma})^n. \quad (4.11)$$

Модель Гершеля-Балклі називають узагальненою степеневою моделлю і досить часто використовують за основу при розробці моделей речовин в різноманітних галузях, від харчових продуктів до сплавів металів. Розглянемо декілька таких прикладів.

Для врахування тиксотропних властивостей модель Гершеля-Балклі була доповнена множником, що враховує вплив тривалості зсуву на напруження зсуву [ 37, 38 ]

$$\tau = \tau_0 + (K \dot{\gamma})^n t^{-m}. \quad (4.12)$$

де  $t$  - тривалість зсуву, с;

$m$  – індекс тиксотропності (безрозмірний);

$K$  – параметр консистенції з розмірністю Па·с<sup>n+m</sup>.

В інших роботах [ 39, 40 ] модель Гершеля-Балклі була уточнена для врахування зміни структури речовини через напруження текучості – модель Моллета:

$$\tau = \tau_0 \lambda + K \dot{\gamma}^n, \quad (4.13)$$

де  $\lambda$  - параметр структури, який змінюється в межах від 0 (структура відсутня або зруйнована) до 1 (жорстка структура, що наближається до твердого тіла).

Для процесів деформування сплавів в процесі їх кристалізації в роботі [41] запропонована модель, в якій напруження зсуву визначають як функцію швидкості зсуву та структурного параметра, який залежить від часу. При цьому напруження зсуву зростають за експонентною залежністю при збільшенні твердої (закристалізованої) складової. З урахуванням усіх припущень запропоновано модель у вигляді

$$\tau = \tau_0(f_s) + \exp(B \cdot f_s) K^* k \dot{\gamma}^m, \quad (4.14)$$

де  $B, K^*$  - реологічні параметри (коефіцієнти);

$k$  - структурний параметр;

$f_s$  - частка затверділої фази.

Показник  $m$  зростає зі збільшенням долі затверділої фази. Структурний параметр змінюється від нуля (відсутність структури) до нескінченності (повністю агрегатована структура) і визначається з диференційного рівняння

$$\frac{\partial k}{\partial t} = c(\dot{\gamma})(k_e - k), \quad (4.15)$$

де  $c(\dot{\gamma})$  - постійний коефіцієнт, що відповідає врівноваженому значенню  $k_e$ ;

Значення параметру  $k$  повинно задовольняти співвідношенню

$$c(\dot{\gamma}) = a \cdot \exp(b \cdot \dot{\gamma}),$$

де  $a, b$  – постійні коефіцієнти, що визначаються з результатів попередніх досліджень реологічних властивостей.

В окремому випадку, при постійній швидкості зсуву, структурний параметр наближається до врівноваженого значення

$$k_e = \frac{1}{(\alpha \cdot \dot{\gamma})^{m-n}}, \quad (\alpha = 1/c).$$

де  $n$  – показник, що відповідає модифікованій моделі Гершеля-Балклі

$$\tau = \tau_0(f_s) + \exp(B \cdot f_s) k \dot{\gamma}^n,$$

де  $k = k^* \alpha^{n-m}$ .

Аналогічний підхід використано в роботі [ 42 ], де узагальнену модель Гершеля-Балклі представлено у вигляді

$$\eta = \left[ K (\dot{\gamma})^{n-1} + \frac{\tau_0(1 - \exp(-B\dot{\gamma}))}{\dot{\gamma}} \right] \cdot \exp(-c'(T - T_0)), \quad (4.16)$$

де  $c'$  - енергія активації, що дозволяє враховувати вплив температури;

$T_0$  - температура, при якій визначався параметр консистенції  $K$ ;

$B$  - показник зростання напружень.

За умов, коли напруження текучості  $\tau_0$  дорівнюють нулю, отримуємо модель Оствальда-де Віля. При  $n=1$  отримуємо модифікований бінгамовий пластик, при  $n=1$  та  $B=\infty$  отримуємо модель звичайного бінгамового пластика після досягнення межі текучості, а при  $n=1$  та  $\tau_0 = 0$  вираз (4.14) трансформується в модель ньютонівської рідини.

Для в'язко-пружних рідин найбільш поширеним є використання моделі Максвела у вигляді [ 33 ], де в'язка складова має класичну ньютонівську форму

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} - \frac{d\tau}{dt} \cdot \frac{\eta}{E}, \quad (4.17)$$

або

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{G_\infty} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta_0}, \quad (4.18)$$

де  $E$  – стала Максвела;

$G_\infty$  - граничний модуль пружності при зсуві.

В'язку складову в моделі Максвела представляють і в нелінійній формі, наприклад, в моделі рідини Рі-Ейрінга (Ree-Eyring)

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\tau}{G} \right) + \frac{\tau_0}{\eta} \cdot \sinh \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right), \quad (4.19)$$

Де  $\tau_0$  - граничне напруження зсуву;

$G$  - модуль зсуву рідини;

$t$  - характерний час.

Модель рідини Максвела часто використовують як основу, уточнюючи в'язку або пружну складові. Наприклад, відома модель запропонована Беїром та Вінером на основі обробки експериментальних даних, де в'язкі властивості рідини враховуються через гіперболічний тангенс [ 17, 43]

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{G_\infty} \cdot \frac{d\tau}{dt} - \frac{\tau_L}{\eta_0} \operatorname{arth} \left( \frac{\tau}{\tau_L} \right), \quad (4.20)$$

де  $\tau_L$  - граничне (максимальне) напруження зсуву.

Подальшим розвитком моделі Максвела є трикомпонентна модель рідини Олдройда [ 33, 42 ],

$$\tau = \eta_0 \cdot \dot{\gamma} - \frac{\eta_0}{E} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \lambda \cdot \eta_0 \cdot \frac{d\tau}{dt}, \quad (4.21)$$

для якої в'язкість визначають з формули

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{1 + \frac{2}{3} \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dot{\gamma}^2}{1 + \frac{2}{3} \lambda_1^2 \cdot \dot{\gamma}^2}, \quad (4.22)$$

де  $E$  - стала закону Олдройда;  
 $\eta_0$  - в'язкість при нульовій швидкості зсуву;  
 $\lambda_1$  - час релаксації;  
 $\lambda_2$  - час запізнення.

### 4.3 Класифікація режимів змащування

Як зазначено в розділі 1.5, перший крок до класифікації режимів змащування зробив Штрібек у 1902 році, виявивши наявність мінімуму залежності коефіцієнту тертя від в'язкісно-швидкісного параметру  $\frac{\eta \cdot V}{F_N}$ , який пізніше отримав назву "параметр Зоммерфельда". У подальших роботах Герсі та Гарді, після експериментального підтвердження відмінностей між різними режимами змащування і остаточного утвердження термінів, з'явилась перша класифікація режимів змащування, згідно з якою виділяли "граничне", "змішане" та "гідродинамічне" змащування.

За сучасними уявленнями, параметр Зоммерфельда впливає на режим змащування не напряму, а опосередковано, через товщину плівки мастила та наявну шорсткість поверхонь. Відношення товщини плівки мастила до сумарної шорсткості поверхонь являє собою досить інформативний параметр

$$\lambda = \frac{\xi}{\sqrt{(R_{a1}^2 + R_{a2}^2)}},$$

де  $\xi$  - товщина плівки мастила;

$R_{a1}, R_{a2}$  - показники шорсткості поверхні, відповідно тіла 1 та 2.

Залежність коефіцієнту тертя від цього параметру повністю повторює криву Штрібека. Для вивчення режимів змащування корисним буде поєднання кривої Штрібека з залежністю відносного часу відсутності контакту між тілами, отриманою шляхом вимірювання електричного опору контакту. Поєднання цих двох кривих, показане на рисунку 4.11, дозволяє виділити три якісно відмінні режими змащування.

При  $\lambda < 1$  має місце **межовий режим змащування**. Відмінності цього режиму змащування:

- порівняно високі значення коефіцієнту тертя;
- значення коефіцієнту тертя стрімко зменшуються з збільшенням параметру  $\lambda$  або параметру Зоммерфельда;
- спостерігається майже повне контактування металевих поверхонь;
- порівняно високі показники зношення.

Назву "межовий" цей режим отримав через наявність в робочій зоні плівок мастил гранично малої товщини, властивості яких суттєво відрізняються від об'ємних властивостей тих самих мастильних речовин.

Незважаючи на незначні розміри таких плівок, порядку кількох прошарків молекул, межові плівки відіграють важливу роль у зменшенні тертя, тому що при повній відсутності мастил (сухе тертя) коефіцієнт тертя не залежить від швидкості ковзання.

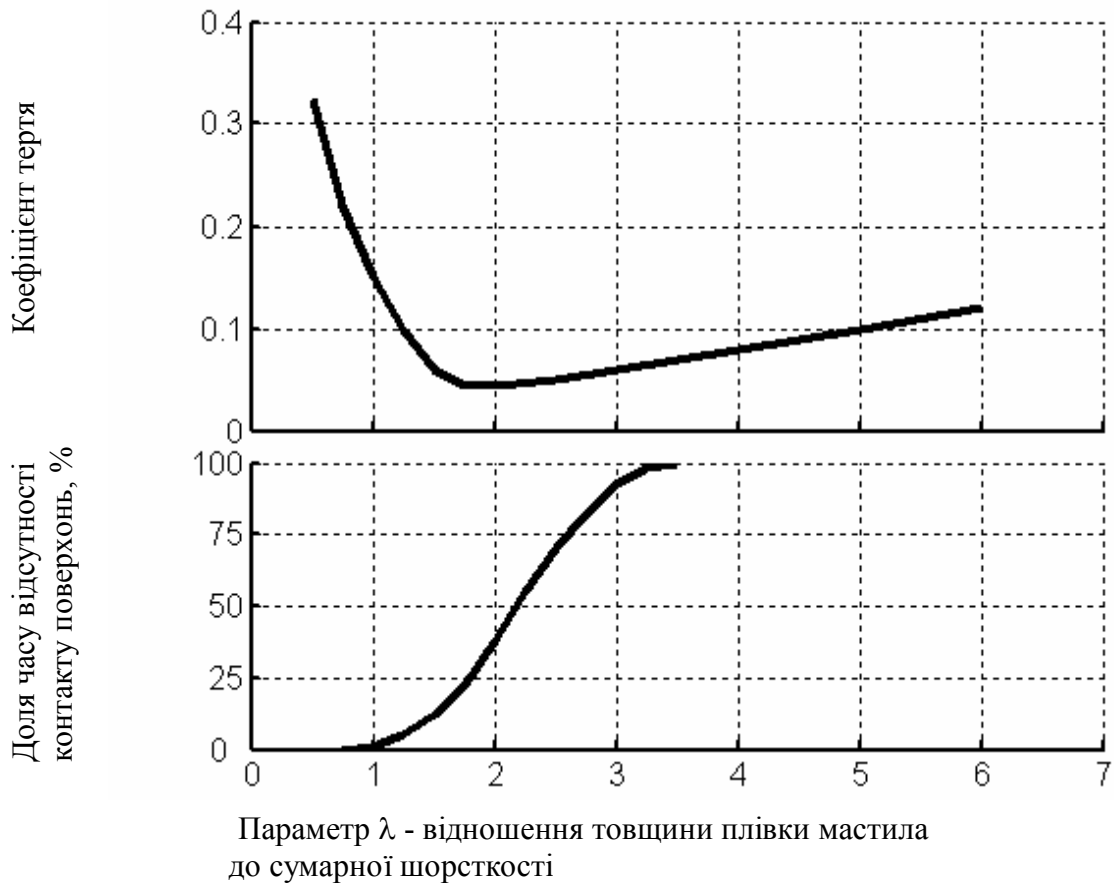


Рисунок 4.11 – Крива Штрібека-Герсі

При  $\lambda > 3$  реалізується **гідродинамічний режим змащування**, який має такі особливості:

- порівняно невисокі значення коефіцієнту тертя;
- значення коефіцієнта тертя зростає з збільшенням параметру  $\lambda$  або параметру Зоммерфельда;
- відсутність контактування металевих поверхонь – вони розділені суцільною плівкою мастильних речовин;
- надходження мастильної речовини в робочу зону забезпечується за рахунок гідродинамічних факторів;
- мінімальне зношення робочих поверхонь.

Цей режим прагнуть забезпечити у більшості машини і механізмів, тобто він має найбільше розповсюдження.

За умов  $1 < \lambda < 3$  має місце **змішаний режим змащування**, який характеризується такими особливостями:



- мінімальні значення коефіцієнту тертя;
- помірні показники зношення поверхонь.

Із самої назви зрозуміло, що при такому режимі змащування присутнє формування і ефективна робота, як межових плівок мастил, так і гідродинамічних плівок, що розділяють поверхні. Поєднання двох механізмів формування плівок мастил забезпечує найбільшу ефективність змащувальної дії – мінімальні значення коефіцієнту тертя.

Отже, з точки зору мінімізації витрат на тертя цей режим має перевагу, коли величина зношення несуттєва.

Існують і інші класифікації режимів змащування, але всі вони мають за основу вищенаведену, враховуючи її фізичне обґрунтування.

Зокрема, в період 1970 – 1984 років у провідних трибологічних лабораторіях Європи було проведено скоординовані дослідження з вироблення критеріїв оцінки змащувальної дії різних мастил [45]. Результатом багаторічної роботи стала розробка методики оцінки ефективності мастил за діаграмою переходів, яку отримують в координатах "навантаження – швидкість ковзання". При цьому навантаження має розмірність сили, що обумовлене переважним використанням чотиришарової машини (а також для будь-якого точкового контакту). Діаграма переходів має вид, наведений на рисунку 4.12.

При помірних навантаженнях майже для всього діапазону швидкостей спостерігається гідродинамічний режим змащування, який характеризується мінімальними значеннями коефіцієнтів зношення та тертя. При швидкостях до приблизно 1 м/с зростання навантаження призводить до переходу в режим межового змащування, який характеризується більш високими показниками зношення та тертя. Подальше зростання навантаження або швидкості призводить до руйнування мастильної плівки і, відповідно, переходу в режим сухого тертя і, в кінцевому підсумку, до задиру (заїдання) та виходу з ладу всього вузла тертя. Головна цінність наведених діаграм переходів у можливості порівняння ефективності дії різних за складом мастильних речовин.

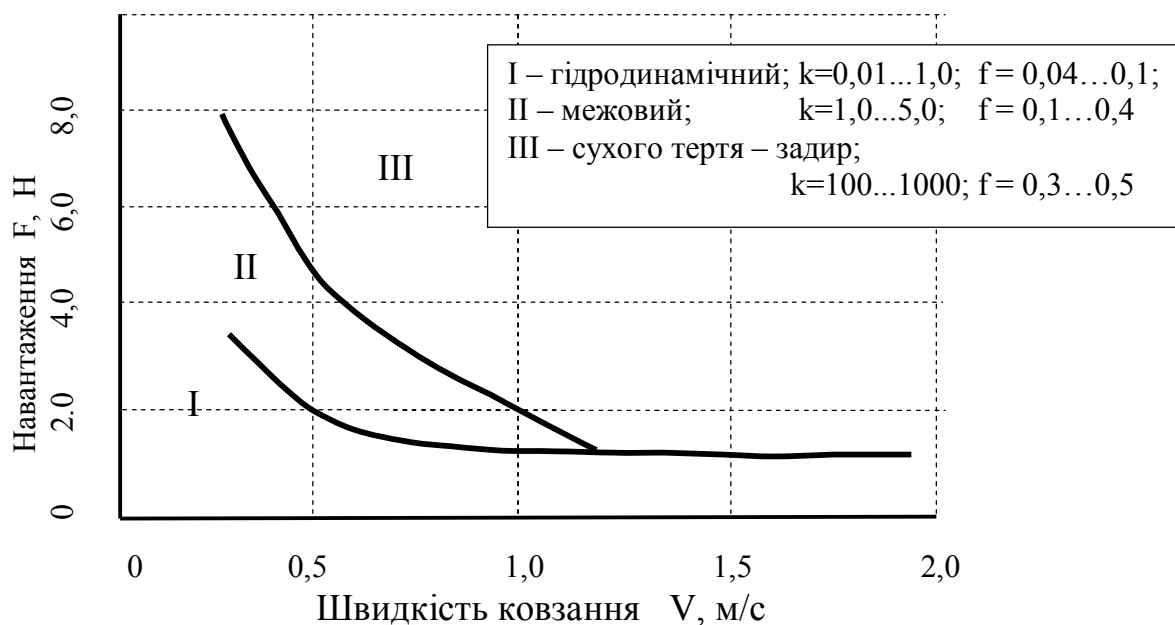


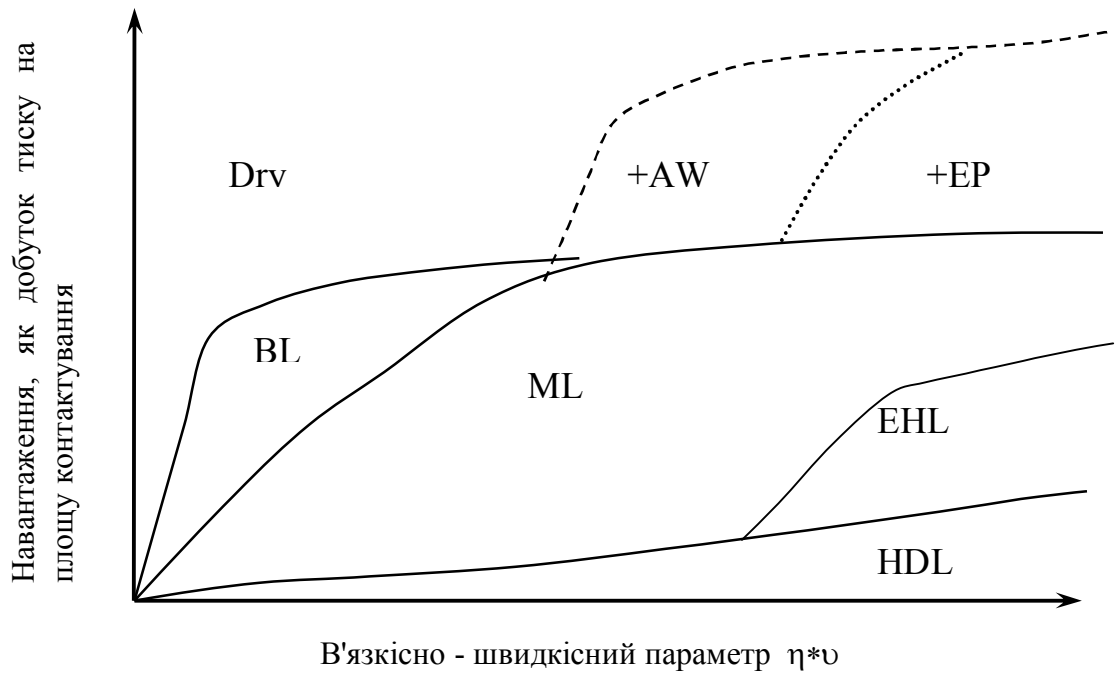
Рисунок 4.12 - Діаграми переходів

Для пояснення режимів змащування знаходить застосування альтернативна діаграма [ 46], наведена на рисунку 4.13.

Еласто-гідродинамічний або пружно-гідродинамічний режим змащування відрізняється від звичайного гідродинамічного наявністю пружних деформацій однієї або обох поверхонь пари тертя. Як видно з діаграми, цей режим допускає значно більші навантаження.

Для будь-яких значень в'язкісно-швидкісного параметру існує певне критичне навантаження, перевищення якого призводить до руйнування межових плівок мастила і переходу до сухого тертя з можливістю задиру. Проте введення в мастила добавок – присадок – забезпечує розширення робочого діапазону навантажень.

Розглянемо більш детально процеси формування межових плівок мастил та особливості дії присадок.



- HDL – hydrodynamic lubrication - гідродинамічне змащування;  
 EHL – elasto-hydrodynamic lubrication – еласто-гідродинамічне змащування;  
 ML - mixed lubrication - змішане змащування;  
 BL - boundary lubrication - межове змащування;  
 AW - anti-wear – антизношувальні присадки;  
 EP - extreme-pressure lubrication – присадки, що забезпечують збільшення допустимого тиску  
 Dry – сухе тертя з можливістю "задиру".

Рисунок 4.13 – Альтернативна діаграма переходів

#### 4.4 Процеси формування межових прошарків мастил

Змащувальна дія речовин, які застосовують для зменшення тертя, в значній мірі визначається здатністю цих речовин адсорбуватися на поверхні твердого тіла.

*Адсорбція (від латинського ad – на, sorbeo –поглинаю) - поглинання речовини з газового або рідинного середовища поверхнею твердого тіла або поверхнею рідини.*

Більшість рідин, у тому числі і мастил, досить добре адсорбуються поверхнею металів, що часто трактують як „змочуваність”. Сила такої взаємодії порівняно невелика. Для режиму гідродинамічного змащування такої взаємодії достатньо для формування плівки мастила і створення гідродинамічної підйомної сили. Для умов межового змащування, коли формуються плівки незначної товщини і мастильні речовини не можуть проявляти „об’ємні” властивості, сила такої взаємодії явно недостатня і такі плівки повинні легко руйнуватись. Проте експериментально доведено існування плівок мастил в умовах межового змащування. Механізм межового змащування визначається в основному фізикою та хімією на поверхнях

контактування твердих тіл в присутності мастильних речовин. Тому виникає необхідність розглянути особливості будови мастильних речовин та їх трибологічну поведінку.

Як вже відзначалось, мінеральні рідинні мастила, які отримують з нафти, складаються переважно з парафінових (аліфатичних), нафтових та ароматичних вуглеводів. Всі ці речовини можуть вважатись нейтральними через свою структурну будову [ 2].

Наведені речовини взаємодіють з твердою поверхнею металу через Ван-дер-Ваальсові сили, які характеризуються малою енергією зв'язку. Фактично взаємодія відбувається через електромагнітні поля молекул. Така взаємодія називається фізичною адсорбцією.

Сила взаємодії може бути суттєво підвищена при введенні до складу мастила полярних молекул. Наприклад , якщо в молекулі парафіну одна з металних груп ( $\text{CH}_3$ ) заміщується карбоксильною групою ( $\text{COOH}$ ), утворюється нова речовина – стеаринова кислота. Можливе також заміщення в металній групі лише одного атому водню (гідрогену) на гідроксильну групу ( $\text{OH}$ ) з утворенням спирту.

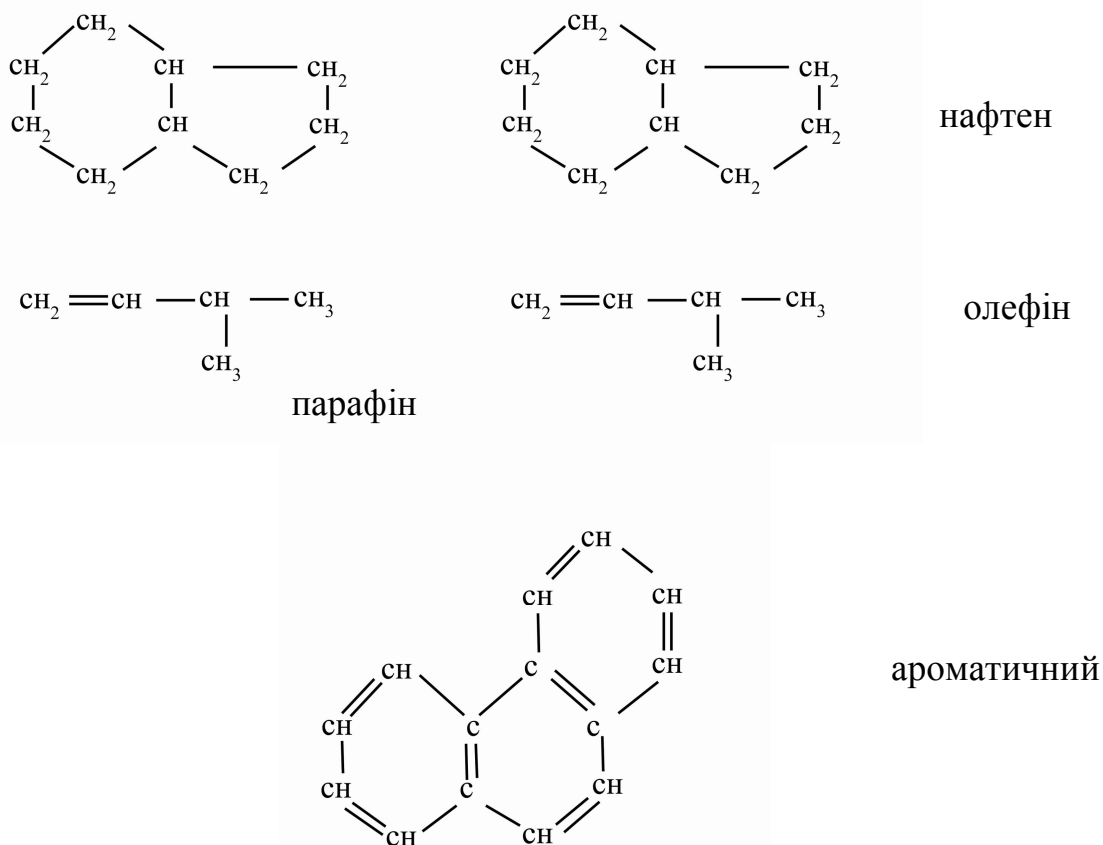
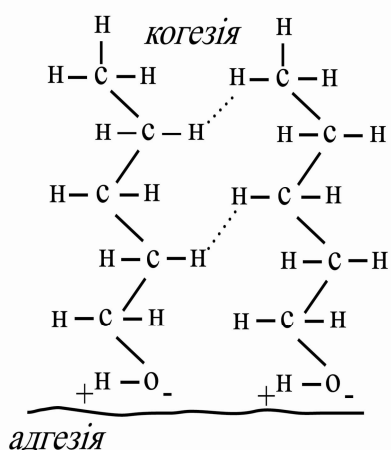


Рисунок 4.14 - Структурні формули основних складових нафти



У гідроксильній групі атом кисню має негативний заряд, а атом гідрогену – позитивний. Взаємодіючи з кристалічною ґраткою та полями електронів металу, гідроксильна група забезпечує значно міцніше з’єднання молекул. Крім цього, такі полярні молекули розташовуються переважно перпендикулярно поверхні. З урахуванням когезії між вертикально розташованими молекулами, утворюються мономолекулярні прошарки. Зсув по гідроксильних групах вимагає значно більше енергії, ніж зсув по кінцям молекул. Наприклад, мономолекулярний прошарок

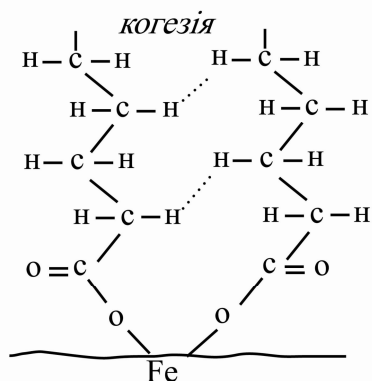
стеаринової кислоти має товщину в 1,9 нм [2, с 150].

Така взаємодія теж класифікується як „фізична адсорбція” (фізіосорбція).

Речовини, які підсилюють фізичну адсорбцію, називають поверхнево активними. Навіть незначні добавки поверхнево активних речовин, вже близько 1 %, суттєво зменшують тертя, тому такі присадки називають „модифікаторами тертя”.

Цей вид взаємодії дуже чутливий до температури. При підвищенні температури виникає десорбція, порушення орієнтації і плавлення (руйнування) молекул. Тому мастила з модифікаторами тертя використовуються при малих навантаженнях та невисоких швидкостях ковзання.

Сила взаємодії може бути ще більше посилена, якщо забезпечити хімічну взаємодію молекул мастил з елементами структури металу. Така взаємодія класифікується як „хемосорбція”. Наприклад, при взаємодії стеаринової кислоти з окисом заліза в присутності води утворюється плівка металевого мила зі стеарату заліза на поверхні. Таке мило має набагато вищі значення опору на зсув та значно вищі значення температури плавлення ніж вихідна жирна кислота. Наприклад, температура плавлення стеаринової кислоти 69°C , а для її металевих мил -  $\approx 120^\circ\text{C}$  [ 2].



Мономолекулярні плівки, утворені в результаті хемосорбції, набагато міцніше з'єднуються з поверхнею металу, ніж при фізіосорбції. Вони фактично є продовженням твердого тіла, тому що руйнування міжатомних зв'язків в молекулах потребує значної енергії. Саме через це хемосорбція забезпечує значне підвищення зносостійкості. Речовини, які забезпечують або сприяють хемосорбції, називають *антизношувальними присадками (AW)* [45]. Межові плівки, утворені реакціями

хемосорбції, забезпечують зменшення тертя та зношення при помірних навантаженнях, температурах та швидкості ковзання.

Крім адсорбції, можливі також хімічні реакції мастильних речовин з поверхнею металу, коли відбувається обмін валентними електронами і утворюються нові хімічні речовини. Хімічні реакції при формуванні межових плівок мастил можливі лише при наявності в молекулах цих мастил атомів сірки, фосфору або хлору, тобто хімічно активних речовин та для хімічно активних металів вузлів тертя. Вони утворюють на поверхні металу плівки солей металів (мил) з незначною міцністю на зсув, але високою температурою плавлення. Наприклад, хлориди, сульфіді або фосфіді. Такі плівки більш стабільніші ніж адсорбовані і забезпечують роботу вузлів тертя при значних навантаженнях, високих температурах та швидкостях ковзання. Такі умови для звичайних мастил призводять до „задиру”, тому плівки мастил, які вступають в хімічну реакцію з металом деталей вузлів тертя, називають „протизадирними” або „максимального тиску” - „extreme pressure” – EP.

Для більш детального вивчення особливостей дії присадок при формуванні межових плівок мастильних речовин розглянемо якісну діаграму залежності коефіцієнту тертя від температури, запропоновану [2] і наведену на рисунку 4.15.

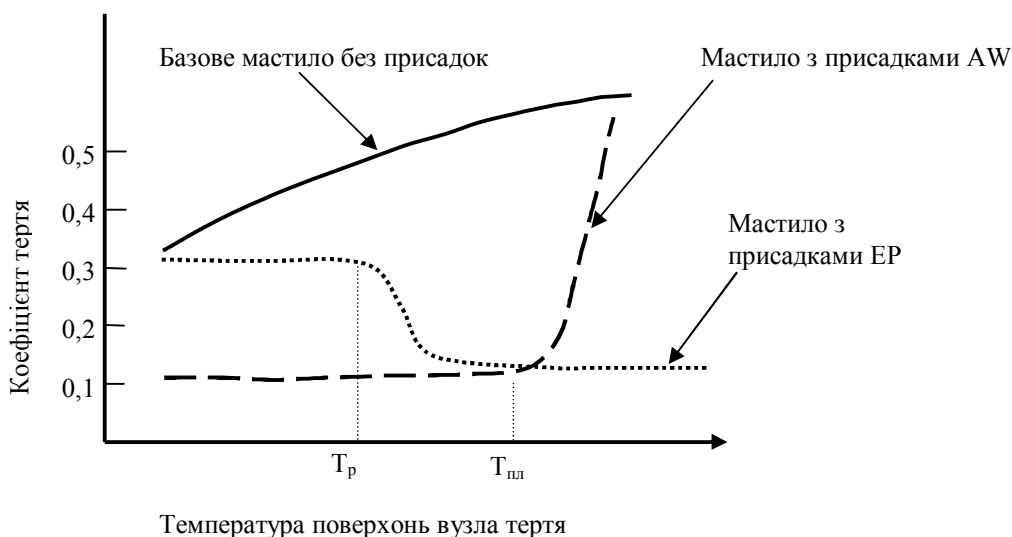


Рисунок 4.15 - Узагальнена якісна залежність коефіцієнту тертя від температури для мастил з різними присадками

Базове мастило з нейтральними складовими і без присадок забезпечує порівняно високі значення коефіцієнту тертя, які поступово зростають зі збільшенням температури поверхонь вузла тертя. Введення поверхнево активних присадок, тобто модифікаторів тертя, які взаємодіють з поверхнею через фізіосорбцію, забезпечує зменшення значень коефіцієнту тертя (на рисунку не показано) зі збереженням виду залежності від температури.

Якщо в мастило ввести присадки AW, наприклад жирні кислоти, які утворюють з поверхнею металеве мило, значення коефіцієнту тертя суттєво зменшується. Але при досягненні температури плавлення мила  $T_{пл}$ , при якій руйнуються довгі парафінові ланцюжки, коефіцієнт тертя різко зростає.

Якщо в мастило введена протизадирна присадка EP, то вона не проявляє помітної дії до досягнення певної температури  $T_p$ , при якій починається хімічна реакція. Для діапазону температур вище такої температури активації коефіцієнт тертя поступово зменшується, досягаючи мінімальних значень, характерних для мастил з хемосорбцією.

Для кращого розуміння поділу присадок на антизношувальні та протизадирні використовують діаграму залежності коефіцієнту зношення від навантаження в логарифмічному масштабі [2], приклад якої наведено на рисунку 4.16. Коефіцієнт зношення визначають як частку від ділення об'ємного зношення на навантаження, помножену на шлях ковзання.

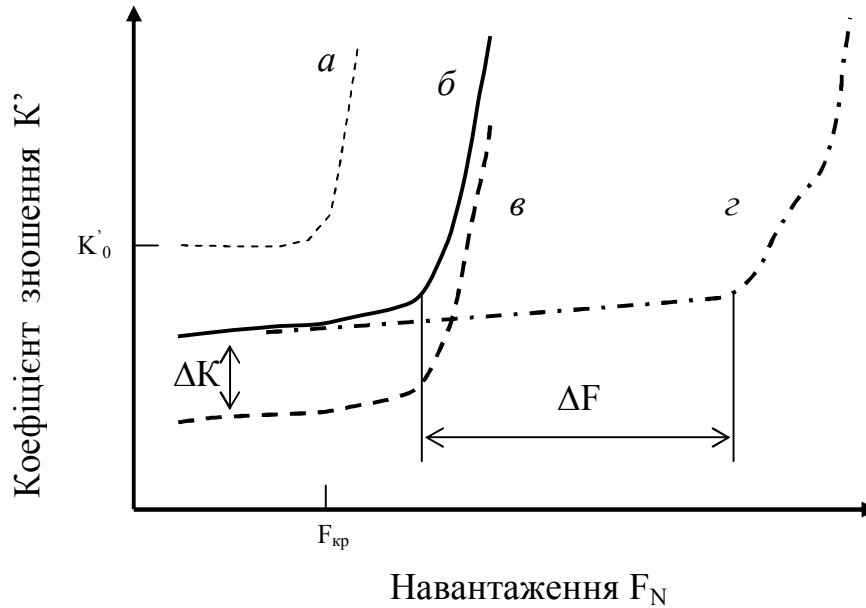


Рисунок 4.16 Схематична залежність зношення від навантаження

Крива  $a$  на рисунку відповідає показникам зношення при відсутності мастильних речовин – так зване „сухе тертя”. При незначних навантаженнях встановлюється певна інтенсивність зношення, яка відповідає показнику  $K'_0$ . Така інтенсивність може зберігатись при зростанні навантаження до критичного значення  $F_{кр}$ , після чого відбувається інтенсивне зростання зношення навіть при незначному збільшенні навантаження.

Якщо використовувати нейтральні мастильні речовини, характер зношення буде відповідати кривій  $b$ . Як видно зі схеми, використання мастильної речовини забезпечує зменшення інтенсивності зношування та розширює діапазон допустимих навантажень.

При використанні присадок AW інтенсивність зношення характеризується кривою  $v$ , тобто зменшується на величину  $\Delta K$ . Проте, допустиме навантаження, в порівнянні з базовим мастилом, практично не змінюється.

Крива  $г$  характеризує інтенсивність зношення при використанні присадок EP. Як видно зі схеми, такі присадки суттєво не змінюють початкову інтенсивність зношення, але дозволяють значно збільшити допустимі навантаження. У порівнянні з базовим мастилом, навантаження зростають на величину  $\Delta F$ .

У сучасних мастилах, особливо моторних, прагнуть підбирати такі комплекси присадок, які б забезпечували зменшення коефіцієнту тертя, як при помірних температурах (AW), так і при підвищених температурах (EP). Однак, слід враховувати, що деякі присадки можуть проявляти антагонізм. Наприклад, неможливе поєднання деяких консерваційних (проти окислювальних) та протизадирних присадок.



Приклади присадок [45, с. 94]:

- модифікатори тертя : олеїнова кислота; діамін; діододецилфосфіт;
- антизношувальні: діакілдітіофосфат цинку; трикрезилфосфат;
- протизадирні: хлорований парафін; дібензилдісульфід.

#### 4.5 Питання для самоконтролю

- 4.5.1 Наведіть загальну класифікацію мастильних речовин.  
 4.5.2 Переваги і недоліки синтетичних мастильних речовин.  
 4.5.3 Особливості властивостей неньютонівських мастильних речовин.  
 4.5.4 Наведіть характерні відмінності граничного та рідинного (гідродинамічного) режимів змащування.  
 4.5.5 Відмінності пружногідродинамічного режиму тертя та сухого тертя.

## 5 ГІДРОДИНАМІЧНА ТЕОРІЯ ЗМАЩУВАННЯ

### 5.1 Математична задача теорії гідродинамічного змащування

Динамічні рівняння руху в'язкої рідини [47] у загальному вигляді можуть бути представлені наступними виразами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -p + 2\eta \frac{\partial u}{\partial x} + \Phi \left( \lambda' - \frac{2}{3} \eta \right) \\ \sigma_y &= -p + 2\eta \frac{\partial v}{\partial y} + \Phi \left( \lambda' - \frac{2}{3} \eta \right) \\ \sigma_z &= -p + 2\eta \frac{\partial w}{\partial z} + \Phi \left( \lambda' - \frac{2}{3} \eta \right) \\ \Phi &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \right\}; \quad (5.1)$$

$$\tau_{xy} = \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right);$$

$$\tau_{yz} = \eta \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right); \quad (5.2)$$

$$\tau_{zx} = \eta \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right).$$

Рівняння руху стисливої рідини в декартовій системі координат мають вигляд:

$$\begin{aligned}
\rho \frac{du}{dt} &= \rho X + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}; \\
\rho \frac{dv}{dt} &= \rho Y + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}; \\
\rho \frac{dw}{dt} &= \rho Z + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z},
\end{aligned} \tag{5.3}$$

а умова нерозривності виражається:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{5.4}$$

Запишемо рівняння балансу енергії:

$$\begin{aligned}
\rho \frac{d}{dt} \left[ \frac{C_v T}{A_1} + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right] &= \rho (uX + vY + wZ) + \\
+ \frac{1}{A_1} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] &+ \\
+ \frac{\partial}{\partial x} [u\sigma_x + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}] + \frac{\partial}{\partial y} [u\tau_{yx} + v\sigma_y + w\tau_{yz}] &+ \\
+ \frac{\partial}{\partial z} [u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\sigma_z] &
\end{aligned} \tag{5.5}$$

Якщо підставити (5.3) у (5.5), одержимо рівняння енергії у більш зручній формі:

$$\begin{aligned}
\frac{\rho}{A_1} \frac{d(C_v T)}{dt} &= \frac{1}{A_1} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \\
+ \sigma_x \frac{\partial u}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial w}{\partial z} + \tau_{xy} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) &+ \\
+ \tau_{yz} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \tau_{xz} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) &
\end{aligned} \tag{5.6}$$

Рівняння (5.3) і (5.6) справедливі для опису руху будь-якої стисливої чи нестисливої рідини. У випадку опису ньютонівської рідини варто врахувати вирази (5.1) і (5.2).

Таким чином, для ньютонівської рідини (стисливої чи нестисливої) основні рівняння гідродинаміки й теплопередачі мають вигляд:

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\partial u}{\partial t} &= \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\eta \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \eta \Phi + \lambda' \Phi \right] + \\
&+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \eta \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] ; \\
\rho \frac{\partial v}{\partial t} &= \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\eta \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \eta \Phi + \lambda' \Phi \right] + \\
&+ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \eta \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \eta \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] ; \\
\rho \frac{\partial w}{\partial t} &= \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\eta \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \eta \Phi + \lambda' \Phi \right] + \\
&+ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \eta \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] ;
\end{aligned} \tag{5.7}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\rho}{A_1} \frac{d(C_v T)}{dt} &= \frac{1}{A_1} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] - \\
&- p \Phi - \frac{2}{3} \eta \Phi^2 + \lambda' \Phi^2 + 2\eta \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \\
&+ \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \eta \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \eta \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \\
\Phi &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z},
\end{aligned} \tag{5.8}$$

- де  $x$  – абсциса, спрямована проти руху масляного шару, мм;  
 $y$  – координата, спрямована поперек масляного шару, мм;  
 $z$  – координата, спрямована перпендикулярно до осей  $x$  і  $y$ , мм;  
 $p$  – гідродинамічний тиск у даній точці, МПа;  
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальні напруження в точці, МПа;  
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – дотичні напруження в точці, МПа;  
 $u, v, w$  – компоненти швидкості руху елемента рідини в напрямку осей  $x, y, z$ , відповідно, мм/с;  
 $\rho$  – густина рідини в даній точці,  $\text{кг} \cdot \text{с}^2 / \text{мм}^4$ ;  
 $X, Y, Z$  – компоненти об'ємної сили, віднесені до одиниці маси,  $\text{мм}^2 / \text{с}$ ;  
 $t$  – час, с;  
 $A_1 = 1/427$  – термічний еквівалент роботи, ккал/(кгс · м);

$T$  – температура в даній точці, °C;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності рідини, ккал/(м·с·°C);

$C_v$  – теплоємність при сталому об'ємі, (ккал·м)/(кгс·с<sup>2</sup>·°C);

$\lambda'$  – другий коефіцієнт в'язкості, що обумовлює дисипацію енергії при стисненні і розширенні рідини, Па·с.

Величина  $\lambda'$  залежить від часу навантаження рідини і часу релаксації. Для рідин, що мають ньютонівські властивості, коли час релаксації значно менше, ніж час навантаження рідини, в'язкість  $\lambda'$  дорівнює нулю.

При розгляді руху тонкого мастильного шару можна знехтувати інерційними й масовими силами, а також зміною тиску поперек цього шару.

Крім того, відзначимо, що вирази (5.7), (5.8) отримані за умови ламінарного плину рідини й відсутності капілярних сил. З огляду на вищенаведене, система рівнянь, що обумовлює неізотермічний тиск стисливої і нестисливої рідини, при стаціонарному і нестаціонарному процесі, для ньютонівського й неньютонівського стану, має вигляд:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}; \quad (5.9.a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad (5.9.б)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}; \quad (5.9.в)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{A_1} \left[ \frac{\partial(C_v T)}{\partial t} + u \frac{\partial(C_v T)}{\partial y} + w \frac{\partial(C_v T)}{\partial z} \right] = \\ = \frac{1}{A_1} \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \tau_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned}; \quad (5.10)$$

При розв'язанні цієї системи для випадку плину ньютонівської рідини необхідно врахувати умову нерозривності (5.4), закон Ньютона для дотичних напружень:

$$\tau_{xy} = \eta \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5.11)$$

та

$$\tau_{yz} = \eta \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (5.12)$$

залежність в'язкості мастила, густини, теплоємності та її теплопровідності від тиску й температури:

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \varphi_{\eta}(p, T); \\ \rho &= \varphi_{\rho}(p, T); \\ C_v &= \varphi_{C_v}(p, T); \\ \lambda &= \varphi_{\lambda}(p, T), \end{aligned} \right\} \quad (5.13)$$

а також форму масляного зазору  $\xi = \xi(x, y)$ . Повне розв'язання такої задачі пов'язане з значними труднощами, тому часто застосовують ті чи інші спрощення. При усередненні температури, в'язкості і густини мастила поперек плівки а, також з огляду на те, що сили тяжіння й сили інерції мізерно малі в порівнянні з гідродинамічними тисками, та, нехтуючи кривизною мастильного шару, отримують узагальнене рівняння Рейнольдса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \xi^3 \frac{\rho}{\eta} \frac{\delta p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \xi^3 \frac{\rho}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right] &= 12\xi \frac{\partial \rho}{\partial t} - 12\rho V_0 - \\ &- 6(U_a + U_b) \frac{\partial(\rho\xi)}{\partial z} - 6(W_a + W_b) \frac{\partial(\rho\xi)}{\partial z}, \end{aligned} \quad (5.14)$$

де  $U_a$  і  $U_b$  – швидкості руху верхньої і нижньої поверхонь у напрямку, зворотному осі  $x$ , м/с;

$W_a$  і  $W_b$  – швидкості руху верхньої і нижньої поверхонь у напрямку, зворотному осі  $z$ , м/с;

$V_0$  – швидкість взаємного віддалення поверхонь тертя, м/с;

$\xi$  – поточна товщина прошарку мастила.

Рівняння (5.14) дійсне для будь-якого випадку нестационарного руху в'язкої стисливої рідини, для якої величини  $\rho$  і  $\eta$  не є сталими. Фізичний зміст рівняння (5.14) полягає в тому, що виникнення гідродинамічного тиску у середині плівки залежить від трьох складових, які відображують вплив клинового зазору, розтягнення й здавлювання. Третій член правої частини рівняння, що враховує вплив клина і є найважливішим. Другий член враховує вплив розтягнення мастила на тиск, а останній – вплив здавлювання. На підставі ряду експериментальних досліджень можна запровадити деякі додаткові спрощення. Оскільки довжина області тертя в поперечному напрямку гідродинамічного клина набагато перевищує його довжину в напрямку осі, то впливом торцевих витоків масла можна знехтувати і задачу про плинність мастильного шару можна звести до плоскої. Як показують дослідження [48], при такому припущенні помилка не перевищує 8 %. З аналізу роботи [47] видно, що точність розв'язання задачі, з урахуванням стиснення мастила, підвищується в середньому на 5...7 %. Тому стисненням мастила можна знехтувати. Тоді вирази (5.14) і (5.10) набувають вигляду:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6\eta(U_a + U_b)(\xi_0 - \xi)}{\xi^3} - 12 \frac{\eta V_0}{\xi^3} (x - x_0); \quad (5.15)$$

$$\frac{\rho C_v}{A_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (5.16)$$

де  $U_a$  і  $U_b$  – лінійні швидкості поверхонь, що утворюють гідродинамічний клин, мм/с;

$\xi$  і  $\xi_0$  – поточне значення товщини шару мастила і її значення в перерізі  $dp/dx = 0$ , мкм;

$V_0$  – швидкість зближення тертьових поверхонь в одиницю часу, мм/с;

$x_0$  – координата кінця області тертя, мм.

У разі сталого режиму плинущого мастила зближення поверхонь гідродинамічного клина не відбувається і параметр  $V_0 = 0$ , тоді рівняння (5.16) набуває вигляду:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6\eta(U_a + U_b)}{\xi^3} \quad (5.17)$$

Зупинимося на припущенні про прилипання граничного шару мастила до поверхонь, що утворюють гідродинамічний клин. Як уже зазначалося, якщо молекули масла знаходяться в безпосередній близькості до твердого тіла, то їхнє поведіння багато в чому обумовлюється впливом сил з боку цього тіла. Для масляної плівки, що перебуває в таких „межових” умовах, характерна особлива реологія, проміжна між реологією твердих тіл і рідин. З віддаленням від поверхні твердого тіла, вплив створюваного ним силового поля послаблюється, і до мастила повертаються його об'ємні властивості. Дослідження [49] показують, що межові плівки мають товщину  $0,01 \div 0,05$  мкм і менше.

Таким чином, ми отримали систему з рівнянь: (5.13), (5.16), (5.17) і виразу, що визначає товщину мастильного шару в будь-якому поточному перерізі гідродинамічного клину, із чотирма невідомими функціями  $(p, T, \xi, \eta)$  при трьох аргументах  $(x, y, t)$ .

## 5.2 Умови надходження мастила в робочу зону. Спрощений вивід рівняння Рейнольдса

Перед входом в робочу зону контактування двох поверхонь, що утворюють пару тертя (підшипник), мастило попадає у клиноподібний зазор, який називають гідродинамічним клином. Несуча здатність, тобто здатність сприймати зовнішнє навантаження, цього клину мастила виявляється наступним чином.

У гідродинаміці прийнято, що на межі твердого тіла і в'язкої рідини ковзання немає. Це означає, що прошарки мастила в безпосередній близькості до поверхонь мають однакові з ними швидкості. При наявності різниці швидкостей між поверхнями, у прошарку рідини виникає певний розподіл швидкостей. Якщо припустити, що швидкість шарів мастила від

однієї поверхні валка до іншої змінюється прямолінійно, то виявиться, що при однакових середніх швидкостях на вході і виході кількість мастила на вході перевищує кількість мастила на виході. Це призводить до виникнення тиску в гідродинамічному мастильному клині, який зростає настільки, що врівноважує зовнішнє навантаження. В результаті дії цього гідродинамічного тиску надходження мастила буде зменшуватися, а витікання – збільшуватися. Це відбувається за рахунок зміни розподілення швидкостей по товщині прошарку мастила на вході та виході, таким чином, що середні швидкості змінюються, а кількість мастила на вході дорівнює кількості на виході, тобто виконується умова нерозривності.

Таким чином, для будь-якого підшипника чи пари тертя саме гідродинамічні умови визначають величину гідродинамічного тиску та відповідну цьому тиску товщину прошарку мастила. Зміна будь-якого з параметрів, що входять до рівняння (5.18), відразу призведе до зміни інших параметрів.

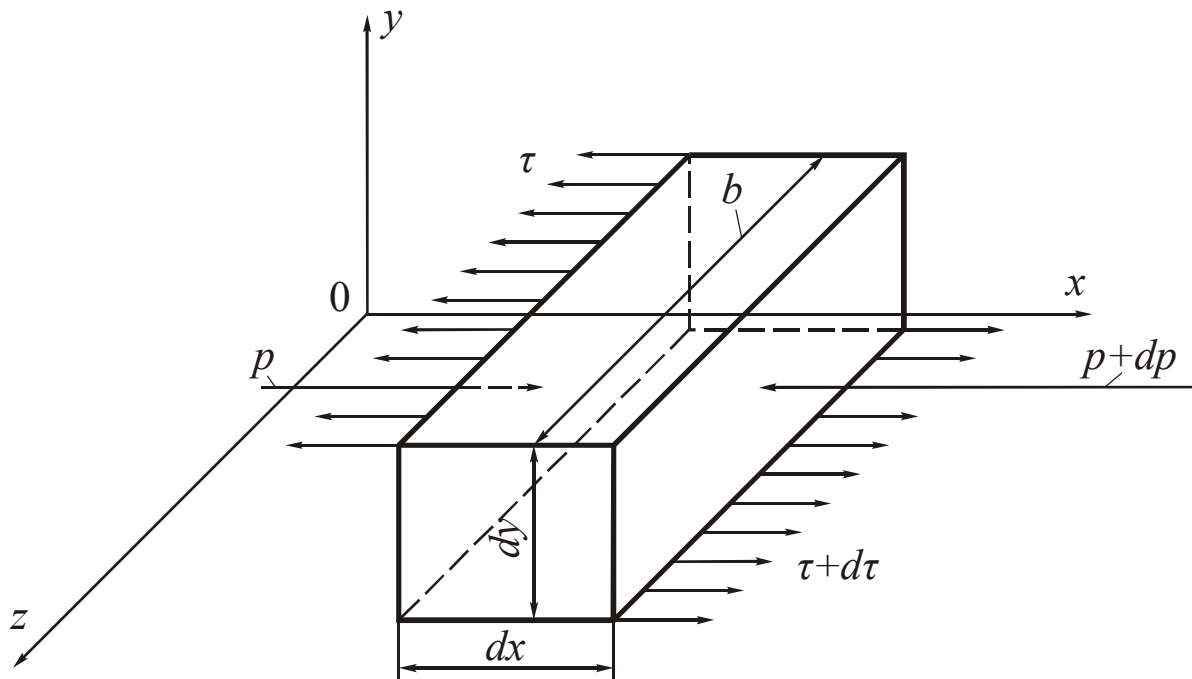
Наприклад, збільшення швидкості однієї з поверхонь призведе до зростання несучої здатності плівки мастила, тобто гідродинамічний тиск повинен збільшитись. Проте зовнішнє навантаження залишається таким самим, відповідно і тиск у плівці мастила не змінюється, а зростання несучої здатності призведе до формування плівки мастила більшої товщини.

Інша складова механізму надходження в осередок деформації мастила пов'язана з наявністю мікронерівностей на поверхнях пари тертя. Мастило, замикаючись у западинах між сусідніми виступами шорсткості, разом із ними потрапляє в робочу зону.

Крім цього, певна кількість мастила надходить у робочу зону за рахунок межового ефекту.

Розглянемо спрощений вивід рівняння Рейнольдса для гідродинамічного підшипника.

Виділимо в об'ємі мастила, що знаходиться у робочій зоні, елементарний об'єм мастила довжиною  $dx$  висотою  $dy$  і шириною  $b$  (рисунок 5.1). Припустимо, що плин мастила є плоским і стаціонарним. Розглянемо умови



**Рисунок 5.1 – Схема рівноваги виділеного елемента мастила**

рівноваги цього елемента. Обмежимося лише однією з умов: сума проекцій усіх сил на вісь  $X$  дорівнює нулю:

$$p \cdot b \cdot dy - (p + dp) \cdot b \cdot dy - \tau \cdot b \cdot dx + (\tau + d\tau) \cdot b \cdot dx = 0. \quad (5.18)$$

Розкривши дужки і скоротивши подібні складові, отримаємо

$$- dp \cdot dy + d\tau \cdot dx = 0,$$

або

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dy}. \quad (5.19)$$

Отже, з умов рівноваги ми отримали основне рівняння для плоскої задачі, яке ідентичне рівнянню (5.9, а).

З огляду на закон тертя Ньютона  $\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy}$ , рівняння (5.19) можемо записати у вигляді:

$$\frac{dp}{dx} = \eta \cdot \frac{d^2u}{dy^2}, \quad (5.20)$$

де  $u$  – швидкість поточного шару мастила;

$p$  – гідродинамічний тиск у виділеному елементі мастильної плівки;

$\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості.



Після інтегрування рівняння (5.20) за  $y$ , при припущенні, що тиск по товщині елементу мастила постійний, можемо визначити розподілення швидкості :

$$u = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2. \quad (5.21)$$

Для визначення констант інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  прийняли наступні граничні умови:

$$u = -v_0 \text{ при } y = 0,$$

$$u = -v_B \text{ при } y = \xi;$$

де  $v_0, v_B$  – швидкості відповідних поверхонь;

$\xi$  – поточна товщина прошарку мастила.

При заданих граничних умовах сталі  $C_1$  і  $C_2$  дорівнюють:

$$C_1 = -\frac{v_B - v_0}{\xi} - \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{\xi}{2},$$

$$C_2 = -v_B.$$

Підставивши значення  $C_1$  і  $C_2$  у рівняння (5.21), одержуємо

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} (y^2 - \xi y) - (v_B - v_0) \frac{y}{\xi} - v_0. \quad (5.22)$$

За допомогою виразу (5.22) можна визначити питому витрату мастила для прошарку товщиною  $\xi$  (на одиницю ширини потоку):

$$q = \int_0^{\xi} u dy = -(v_B + v_0) \frac{\xi}{2} - \frac{\xi^3}{12\eta} \frac{dp}{dx}. \quad (5.23)$$

У площині безпосередньо перед входом в робочу зону гідродинамічний тиск відсутній, тобто при певному  $\xi_0$   $p = 0$ , тому з (5.23) можемо визначити

$$q_0 = -(v_B - v_0) \frac{\xi_0}{2}. \quad (5.24)$$

Оскільки питома витрата мастила в будь-якому перерізі повинна бути однаковою, прирівнюючи праві частини виразів (5.24) і (5.23), після звичайних перетворень знаходимо вираз для визначення похідної  $dp/dx$ , яке і є рівнянням Рейнольдса:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta (v_B + v_0) \frac{\xi_0 - \xi}{\xi^3}, \quad (5.25)$$

де  $\xi_0$  – товщина шару мастила в перетині входу в робочу зону.

Для розв'язання цього рівняння необхідно визначити профіль зазору між поверхнями. Представляючи геометрію поверхонь як взаємодію циліндру з площиною і апроксимуючи частину поверхні циліндру параболою, отримаємо рівняння для визначення профілю зазору

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2 \cdot R}, \quad (5.26)$$

де  $h_0$  - мінімальний зазор, тобто зазор у площині осі циліндру;  
 $x$  – відстань від площини осі циліндру;  
 $R$  – радіус циліндра.

Величина  $h_0$  являє собою товщину прошарку мастила у першому наближенні. Для спрощення можемо прийняти, що  $h_0$  дорівнює нулю. Тоді інтегрування рівняння Рейнольдса із використанням граничних умов  $p = 0$  при  $x \geq 0$  (умови Зоммерфельда) отримаємо вираз для визначення розподілу тиску по робочій зоні підшипника [9]

$$p = -2\eta(v_0 + v_b) \frac{x}{h_0^2}. \quad (5.27)$$

Після інтегрування цього виразу можемо визначити гідродинамічну підйомну силу, віднесену до одиниці ширини підшипника

$$\frac{F_N}{L} = \int_0^\infty p \cdot dx = 2,45 \cdot \frac{\eta \cdot v \cdot R}{h_0}. \quad (5.28)$$

Після звичайних перетворень можемо отримати рівняння для мінімальної товщини плівки мастила

$$\frac{h_0}{R} = 2,45 \cdot \left( \frac{\eta \cdot v \cdot R}{F_N} \right). \quad (5.29)$$

Для коефіцієнту тертя прийняті припущення дозволяють отримати вираз

$$f = \frac{F_T}{F_N} = 0,76 \cdot \left( \frac{\eta v L}{F_N} \right)^{0,5} \quad (5.30)$$

Таким чином, рівняння Рейнольдса дозволяє визначити всі необхідні гідродинамічні параметри.

Але наведені співвідношення забезпечують прийнятну точність лише при невисоких значеннях навантажень, тобто у випадках так званого легконавантаженого контакту. При збільшенні навантажень точність визначення параметрів стає непринятною. Наприклад, для умов контактування двох сталевих дисків радіусом 81 мм при навантаженні 0,196 МН/м розраховане значення мінімальної товщини плівки мастила дорівнює 0,038 мкм, а фактичне становить 3,5 мкм [17]. Але, незважаючи на невисоку точність, наведені співвідношення дозволяють наочно продемонструвати вплив чисто гідродинамічних факторів, таких як в'язкість, швидкість.

З метою забезпечення потрібної точності визначення параметрів змащування розроблені різноманітні методики для конкретних застосувань. Так, для підшипників ковзання гідродинамічну підйомну силу рекомендовано визначати з формули

$$F_{HD} = \frac{L \cdot d^3 \cdot \eta \cdot \omega}{\Delta^2},$$

- де  $L$  - довжина підшипника, м;  
 $d$  - діаметр вала підшипника, м;  
 $\omega$  - кутова швидкість валу,  $\text{с}^{-1}$ ;  
 $\Delta$  - діаметральний зазор у підшипнику, м.

За структурою ця формула повністю відповідає вищенаведеній методиці, але на відміну від неї дозволяє визначати мінімальну товщину плівки в залежності від коефіцієнта навантаженості.

*Розглянемо приклад визначення параметрів роботи підшипника ковзання з бронзовими вкладишами. Діаметр вала підшипника  $d = 160$  мм, діаметральний зазор  $\Delta = 0,2$  мм. Довжина підшипника  $L = 120$  мм. Частота обертання валу  $n = 140$  об/хв. Навантаження  $F_R = 500$  кН. Підшипник змащується густим мастилом з еквівалентною в'язкістю  $\eta = 0,64$  Па·с.*

1. Визначаємо загальні параметри роботи підшипника:

- кутову швидкість обертання валу:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}; \quad \omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 140}{60} = 14,65 \text{ с}^{-1};$$

- середній тиск на робочій поверхні підшипника:

$$p_{cp} = \frac{F_R}{L \cdot d}; \quad p_{cp} = \frac{500000}{120 \cdot 160} = 26 \text{ Н / мм}^2 = 26 \text{ МПа}.$$

2. Розраховуємо гідродинамічну підйомну силу, створювану мастильною речовиною в робочій зоні підшипника

$$F_{HD} = \frac{120 \cdot 160^3 \cdot 0,64 \cdot 10^{-6} \cdot 14,64}{0,2^2} = 123 \text{ кН}.$$

3. Визначаємо коефіцієнт завантаженості підшипника

$$K_H = \frac{F_R}{F_{HD}}; \quad K_H = \frac{500}{123} \approx 4,0.$$

4. З графіків для  $K_H = 4$  та  $\frac{L}{d} = \frac{120}{160} = 0,75$  знаходимо відносний ексцентриситет, тобто відношення ексцентриситету до радіального зазору підшипника,  $e_0 = \frac{e}{\delta} = \frac{2 \cdot e}{\Delta} = 0,85$ .

5. Розраховуємо мінімальну товщину плівки мастила, використовуючи формулу

$$h_{\min} = \frac{\Delta}{2} \left( 1 - \frac{2 \cdot e}{\Delta} \right); \quad h_{\min} = \frac{0,2}{2} (1 - 0,85) = 0,015 \text{ мм}.$$

Для підшипників рідинного тертя рекомендовано використання залежності

$$F_{HD} = 0,4 \cdot \eta_0 \cdot U \cdot L^2 \cdot d \frac{\left( \frac{\delta_{ПРТ}}{h_{\min}} \right) - 1}{\delta_{ПРТ}^2},$$

де  $U$  - швидкість ковзання у підшипнику, м/с;

$\delta_{ПРТ}$  - радіальний зазор у підшипнику, м;

$h_{\min}$  - мінімальна товщина плівки мастила в робочій зоні підшипника.

Максимальна вантажопідйомність таких підшипників спостерігається при  $\frac{\delta_{ПРТ}}{h_{\min}} = 2$ . При цьому відносний ексцентриситет  $e_0 = \frac{e}{\delta_{ПРТ}}$  становитиме

0,5. Але на практиці, при проектуванні підшипників приймають  $\frac{\delta_{ПРТ}}{h_{\min}}$  від 3 до 15, що забезпечує  $e_0 = 0,67 \div 0,93$ .

Для порівняння розглянемо особливості формування плівки мастила в зубчастому зачепленні.

На рисунку 5.2 зображена схема евольвентного зубчастого зачеплення. Зачеплені зубці стикаються в точках контакту  $K_1, K_2$ , що переміщуються при обертанні шестерень уздовж лінії зачеплення  $K_1 - K_3$  від основи ведучого зубу до його вершини та відносно від вершини відомого зубу до основи останнього.

При переміщенні точки контакту по профілях зубів між останнім відбувається ковзання. Швидкість цього ковзання  $V_K$  є мінлива; вона зменшується в межах робочого профілю за напрямком від крайніх точок головки та ніжки зубу до полюсу зачеплення  $P$ , де  $V_K = 0$  та має місце чисте ковзання початкових кіл обох зубчастих коліс. В усіх інших положеннях точки контакту спостерігається поєднання ковзання та кочення, причому біля вершини зубу швидкість ковзання є найбільшою і може досягати в некоригованих колесах половини окружної швидкості шестерні.

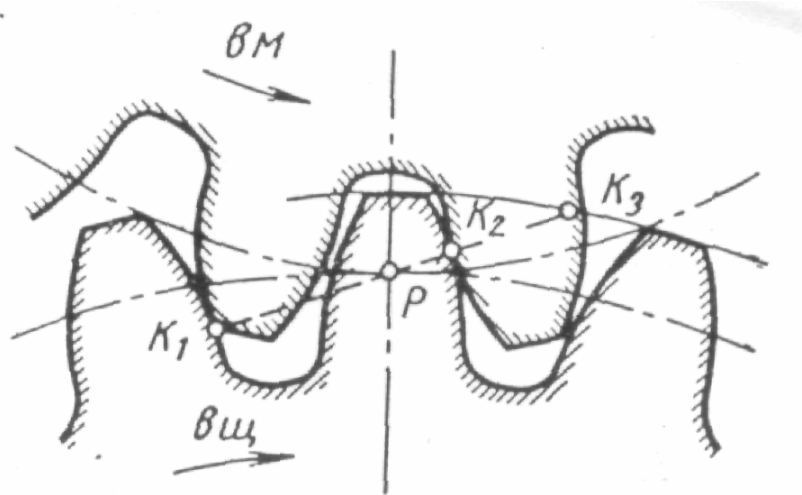


Рисунок 5.2 – Схема зубчастого зачеплення

Напрямок вектору швидкості ковзання і сил тертя на профілях зубів не є постійним, і при проходженні точки контакту через полюс зачеплення вони змінюють свій знак на протилежний.

Найбільш небезпечними точками зачеплення у відношенні заїдання є точки, віддалені на відстань  $0,3 m$  ( $m$  – модуль зачеплення, мм) від точок  $K_1$  та  $K_2$  (рис. 5.2). Тому необхідно розрахувати товщину прошарку мастила в цих двох точках [48]. Відповідні радіуси кривизни дорівнюють (нехай ведучою буде нижня шестерня, а ведомим верхнє зубчасте колесо):

$$\left. \begin{aligned} R_{шк1}' &= R_{шк1} + 0,3 \cdot m, & R_{кк1}' &= R_{кк1} - 0,3 \cdot m, \\ R_{шк1}'' &= R_{шк1} + 0,3 \cdot m, & R_{кк2}' &= R_{кк2} + 0,3 \cdot m. \end{aligned} \right\} \quad (5.31)$$

У точці входу в зачеплення  $K_1$  радіус кривизни колеса

$$R_{кк1} = \sqrt{(R_{ек}^2 - R_{ок}^2)}. \quad (5.32)$$

Радіус кривизни шестерні в цій точці

$$R_{шк1} = A \cdot \sin \alpha_0 - \sqrt{(R_{ек}^2 - R_{ок}^2)}. \quad (5.33)$$

де  $A$  – міжцентрова відстань, мм;

$\alpha_0$  - кут зачеплення;

$R_{еш}$  - радіус кола виступів зубів шестерні, мм;

$R_{ош}$  - радіус кола основи зуба шестерні, мм.

Швидкість кочення в кожній точці лінії зачеплення визначається:

$$U_{шк1} = R_{шк1} \cdot \omega_{ш} \cdot 10^{-3}, \quad U_{кк1} = R_{кк1} \cdot \omega_{к} \cdot 10^{-3}, \quad (5.34)$$

$$U_{шк2} = R_{шк2} \cdot \omega_{ш} \cdot 10^{-3}, \quad U_{кк2} = R_{кк2} \cdot \omega_{к} \cdot 10^{-3}, \quad (5.35)$$

де  $\omega_{ш}$  и  $\omega_{к}$  - кутові швидкості шестерні і колеса, 1/сек.

Приріст температури мастильної плівки можна розрахувати за формулою Блока:

$$\Delta t = 0,185 \cdot f_{тр} \cdot \sqrt[4]{K^3 (\lambda_{шi} \pm \lambda_{кi})} \cdot [\sqrt{U_{шi}} - \sqrt{U_{кi}}], \quad (5.36)$$

$$f_{тр} = \frac{0,0316}{\sqrt[4]{\eta'_0 (U_{шi}^2 - U_{кi}^2)}}, \quad (5.37)$$

де  $K$  – погонний тиск, що приходиться на одиницю довжини робочої зони зачеплення.

Температура в зоні контакту, за якою визначається в'язкість  $\eta_0$ , дорівнює:

$$T = T_0 + \Delta t, \quad (5.38)$$

де  $T_0$  - температура мастила до вході в контактну зону, °С; Приведена кривизна для будь - якої точки визначається за формулою:

$$\lambda_{шi} \pm \lambda_{кi} = \frac{1}{\rho_{прi}}, \quad 1/м \quad (5.39)$$

$$\frac{1}{\rho_{прi}} = \frac{1}{\rho_{шi}} + \frac{1}{\rho_{кi}}, \quad 1/м \quad (5.40)$$

Товщина прошарку мастила, згідно контактнo-гiдродинамiчнiй теорiї визначається з формули

$$h_0 = \frac{3,17 [\eta_0 (U_{шi} + U_{кi})]^{0,75} \cdot \theta^{0,6}}{K^{0,15} (\lambda_{шi} + \lambda_{кi})^{0,4}} \quad (5.41)$$

**Приклад.** Розрахувати товщину мастильної плівки для прямозубої циліндричної передачі з наступними параметрами: модуль  $m = 3$ , міжцентрова відстань дорівнює:  $A = 71,5$  мм, діаметр кола виступів шестерні  $D_{сш} = 72$  мм, колеса  $D_{ск} = 82,5$  мм, число обертів шестерні  $n_{ш} = 6350$  об / хв, зусилля впливу на контакт  $P = 1000$  кг, ширина шестерні і колеса  $B = 100$  мм, об'ємна температура мастила  $T_0 = 50$  °С, змащування здійснюється мінеральним мастилом з в'язкістю  $\nu_{20} = 1400$  мм<sup>2</sup> / с,  $\nu_{100} = 20$  мм<sup>2</sup> / с. Густина мастила дорівнює 880 кг / м<sup>3</sup>, п'єзокоефіцієнт в'язкості дорівнює  $\theta = 0,15$  мм<sup>2</sup> / кг.

Розрахунок товщини мастильної плівки проведений для точки, що розташована на відстані, яке дорівнює 0,3 т від точки  $K_1$ .

Попередньо визначимо радіус біля основи зубів шестерні  $R_{ош}$  за умови, що:

$$\begin{aligned} R_{ек} + R_{ош} &= A; \\ 41,25 + R_{ош} &= 71,5; \\ R_{ош} &= 30,25 \text{ мм}, \end{aligned}$$

а також цей радіус у колеса  $R_{ок}$ :

$$\begin{aligned} R_{еш} + R_{ок} &= A; \\ 36 + R_{ок} &= 71,5; \\ R_{ок} &= 35,5 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Далі знайдемо радіуси кривизни колеса та шестерні в точці  $K_1$  за формулами (5.31) та (5.32):

$$\begin{aligned} R_{кк_1} &= \sqrt{(R_{ек}^2 - R_{ок}^2)} = \sqrt{(41,25^2 - 35,5^2)} = 21 \text{ мм}; \\ R_{шк_1} &= A \cdot \sin \alpha_0 - \sqrt{(R_{ек}^2 - R_{ок}^2)} = 71,5 \cdot 0,423 - 21 = 9,24 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Окрім того, визначимо радіуси колеса та шестерні в найбільш навантаженій точці  $K'_1$ , що віддалена від точки  $K_1$  на відстань  $0,3t$ .

$$\begin{aligned} R'_{кк_1} &= R_{кк_1} - 0,3t = 21 - 0,3 \cdot 3 = 20,1 \text{ мм}, \\ R'_{шк_1} &= R_{шк_1} + 0,3t = 9,24 + 0,3 \cdot 3 = 10,14 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Знайдемо кутову швидкість шестерні:

$$\omega_{ш} = \frac{2\pi \cdot n_{ш}}{60} = \frac{6,28 \cdot 6350}{60} = 664 \text{ сек.}^{-1}$$

Знайдемо лінійну швидкість обертання шестерні в точці  $K'_1$ :

$$U'_{шк_1} = R'_{шк_1} \cdot \omega_{ш} \cdot 10^{-3} = 10,14 \cdot 664 \cdot 10^{-3} = 6,73 \text{ м / с}.$$

Визначимо радіуси початкових кіл колеса  $R_к$  та шестерні  $R_{ш}$ . Ці кола з'єднуються в точці, де ковзання зубу колеса по зубу шестерні відсутнє

$$R_к = \frac{R_{ек} + R_{ок}}{2} = \frac{41,25 + 35,5}{2} = 38,375 \text{ мм},$$

$$R_{ш} = \frac{R_{еш} + R_{ош}}{2} = \frac{36 + 30,25}{2} = 33,125 \text{ мм}.$$

Знаходимо число обертів колеса за хвилину  $n_к$

$$n_к = \frac{R_{ш}}{R_к} \cdot n_{ш} = \frac{33,125}{38,375} \cdot 6350 = 5481 \text{ об / хв}.$$

Тоді кутова швидкість колеса буде:

$$\omega_K = \frac{2\pi \cdot n_K}{60} = \frac{6,28 \cdot 5481}{60} = 573,7 \text{ 1/с.}$$

Знайдемо лінійну швидкість колеса в найбільш навантаженій точці  $K_1'$

$$U_{KK_1'} = R_{KK_1'} \cdot \omega_K \cdot 10^{-3} = 20,1 \cdot 573,7 \cdot 10^{-3} = 11,54 \text{ м/с.}$$

За формулою (5.37) визначимо значення коефіцієнта тертя в точці  $K_1'$ . Відзначимо, що в цю формулу значення динамічної в'язкості  $\eta_0$  підставляється, виходячи з об'ємної температури мастила, тобто з  $T_0 = 50^\circ \text{C}$ .

За формулою Вальтера знайдемо кінематичну в'язкість  $\nu_{50}$  при цій температурі:

$$\lg \lg (0,6 + \nu_{20}) = A - B \lg (273 + 20),$$

$$\lg \lg (0,6 + \nu_{100}) = A - B \lg (273 + 100).$$

З цієї системи визначимо значення коефіцієнтів  $A$  та  $B$

$$\lg \lg (0,6 + 1400) = A - B \lg 293,$$

$$\lg \lg (0,6 + 20) = A - B \lg 373.$$

Звідси

$$A = 9,42140, B = 3,61738.$$

Тоді кінематична в'язкість  $\nu_{50}$  дорівнює:

$$\lg \lg (0,6 + \nu_{50}) = A - B \lg (273 + 50),$$

$$\nu_{50} = 132 \text{ мм}^2/\text{с.}$$

Визначимо динамічну в'язкість мастила при температурі  $T_0 = 50^\circ \text{C}$ .

$$\eta_{50} = \rho \nu_{50} = 897 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1}{9,81} \cdot 162 = 1,48 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{мм}^2/\text{с.}$$

За формулою (5.37) визначимо коефіцієнт тертя в точці  $K_1'$ :

$$f = \frac{0,0316}{\sqrt[4]{\left[1,48 \cdot 10^{-8} \left(11,54 \cdot 10^3\right)^2 - \left(6,73 \cdot 10^{-3}\right)^2\right]}} = 0,03.$$

Розрахуємо приріст температури мастильної плівки біля точки  $K_1'$  за формулою (5.36):

$$\Delta t = 0,185 \cdot 0,03 \cdot \sqrt[4]{\left[\left(10^4\right)^3 \cdot 1,48 \cdot 10^2\right]} \cdot \left[\sqrt{11,54} - \sqrt{6,73}\right] = 15^\circ \text{C.}$$

$$K = \frac{P}{B} = \frac{1000}{0,1} = 10^4 \text{ кг/м.}$$

Відповідно до формул (5.39) та (5.40)



$$\lambda_{\text{Ш}, \text{к}_1} \pm \lambda_{\text{к}_1} = 1,48 \cdot 10^2 \text{ л/м},$$

$$\frac{1}{\rho_{\text{Пр}, \text{к}_1}} = \frac{1}{\rho_{\text{Ш}, \text{к}_1}} + \frac{1}{\rho_{\text{к}_1}} = \frac{1}{10,14 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{20,1 \cdot 10^{-3}} = 10^3 \cdot 0,148 = 1,48 \cdot 10^2$$

л/м.

Визначимо температуру мастила біля точки  $\text{К}'_1$

$$T = T_0 + \Delta t = 50 + 15 = 65 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Визначимо кінематичну в'язкість при цій температурі:

$$\lg \lg (0,6 + \nu_{65}) = A - B \lg 338,$$

$$\nu_{65} = 74,6 \text{ мм}^2/\text{с}.$$

Визначимо динамічну в'язкість

$$\eta_{65} = \rho \nu_{65} = 897 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1}{9,81} \cdot 74,6 = 0,68 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{мм}^2/\text{с}.$$

Визначимо товщину прошарку мастила в найбільш навантаженій точці  $\text{К}'_1$

$$h_0 = \frac{3,17 \left[ 0,68 \cdot 10^{-8} \cdot 18270 \right]^{0,75} \cdot 0,15^{0,6}}{\left( \frac{1000}{100} \right)^{0,15} \cdot (1,48 \cdot 0,1)^{0,4}} = 0,002 \text{ мм} = 2 \text{ мкм}.$$

При такій товщині плівки мастила для рівнів шорсткості поверхні зубців, які забезпечуються сучасними методами виготовлення, режим змащування буде відповідати гідродинамічному.

### 5.3 Елементи контактної гідродинаміки в дослідженні товщини мастильної плівки

Залежності, наведені в попередньому розділі, характерні для випадку легко навантаженого контакту, який реалізується при гідродинамічному режимі змащування. При зростанні навантажень відбувається перехід до режиму пружно гідродинамічного режиму змащування, який іноді називають контактно-гідродинамічним. Відмінністю цього режиму змащування є наявність пружних деформацій поверхонь. Крім цього, якщо тиск в робочій зоні достатньо високий, щоб викликати пружні деформації, то необхідно враховувати і зміну в'язкості мастильної речовини від дії такого тиску.

Розглянемо зміну зазору між поверхнями від дії тиску. При зосередженому навантаженні, коли сила умовно прикладена в одній точці, пружну деформацію поверхні можна описати рівнянням [50]

$$d\delta(x) = -\frac{2 \cdot (1 - \nu^2) p}{\pi E} \ln|x| + C \quad (5.42)$$

де  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона;  
 $E$  - модуль пружності;  
 $C$  - стала.

Це рівняння являє собою функцію Гріна, яка дає в точці прикладання сили значення переміщення (деформації), що наближається до безкінечності. Це не відповідає дійсності, так само як і прикладання сили в одній точці. Для подолання цього протиріччя задаються певною деформацією на ділянці достатньо віддаленій від точки прикладання сили, і позначивши її  $x_r$ , визначають величину деформації поверхні

$$d\delta(x) = d\delta^a(x) - d\delta^a(x_r) = -\frac{2(1-\nu^2)p}{\pi \cdot E} \ln \left| \frac{x}{x_r} \right|. \quad (5.43)$$

Для розподіленої сили, тобто сили, яка діє на певній поверхні, інтегруючи вираз ( 5.43 ), можемо отримати розподіл пружної деформації у вигляді

$$\delta(x) = -\frac{2(1-\nu^2)p}{\pi \cdot E} \int_{\Omega} \ln \left( \frac{\zeta - x}{\zeta - x_r} \right) \cdot p(\zeta) d\zeta, \quad (5.44)$$

де  $\Omega$  - область поверхні, по якій розподілене навантаження;  
 $\zeta$  - відстань від краю області розподілення навантаження до площини, що розглядається (лише для області дії тиску).

Використовуючи еквівалентний модуль пружності, який визначають з рівняння  $\frac{2}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ , отримаємо

$$\delta(x) = \frac{4}{\pi \cdot E'} \int \ln \left| \frac{\zeta - x}{\zeta - x_r} \right| \cdot p(\zeta) d\zeta. \quad (5.45)$$

Таким чином, з урахуванням пружних деформацій поверхонь зазор між ними можна представити у вигляді

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2 \cdot R} + \delta, \quad (5.46)$$

де  $R$  - приведений радіус кривизни поверхонь.

Приведений радіус визначають із співвідношення  $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ .

Зміну в'язкості мастильної речовини від дії тиску у більшості випадків визначають за залежністю Баруса

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\theta \cdot p}, \quad (5.47)$$

де  $\theta$  - п'єзокоефіцієнт в'язкості.

Пружні деформації призводять до зміни геометрії зазору в зоні гідродинамічної взаємодії поверхонь, як це показано на рисунку 5.2.

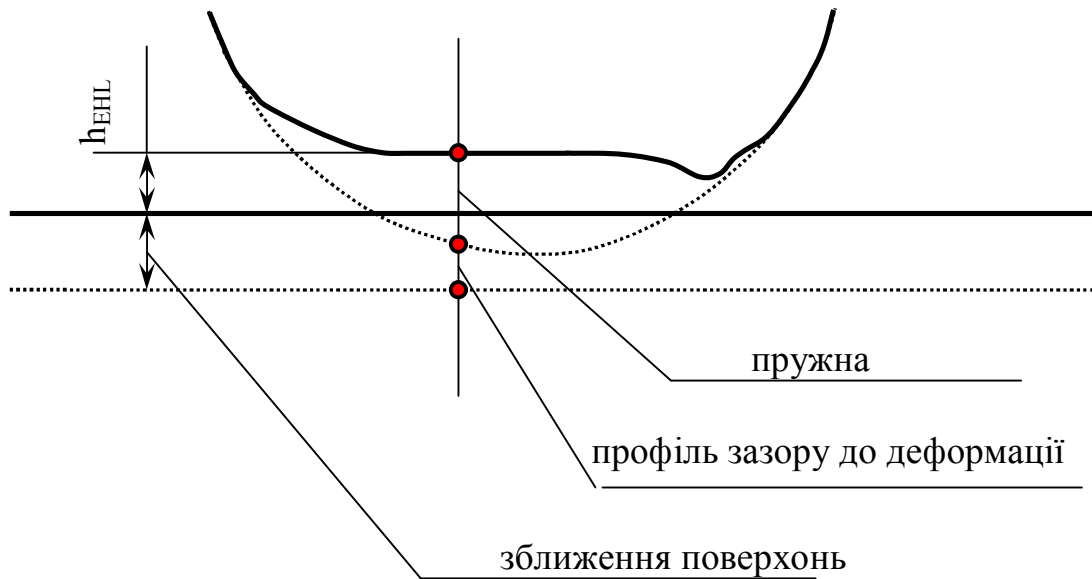


Рисунок 5.3 – Профіль зазору до та після пружного деформування

Як видно з рисунку, гідродинамічний тиск, створений мастильною речовиною, змінює профіль зазору. Зважаючи на профіль розподілення гідродинамічного тиску та кривизну поверхні циліндру, пружкі деформації призводять до утворення майже постійного зазору в робочій зоні. Поверхні взаємодіючих тіл розташовуються майже паралельно. При цьому зона дії гідродинамічного тиску збільшується, а самі поверхні зближуються на відстань  $\Delta$ . Чим більше гідродинамічний тиск, тим більші пружкі деформації і тим на більшу площу буде розподілятися зовнішнє навантаження. У такий спосіб відбувається регулювання профілю зазору відповідно до умов у робочій зоні і властивостей мастила.

Для прикладу на рисунках 5.4 та 5.5 показано особливості профілю зазору для закритого гідродинамічного підшипника ковзання.

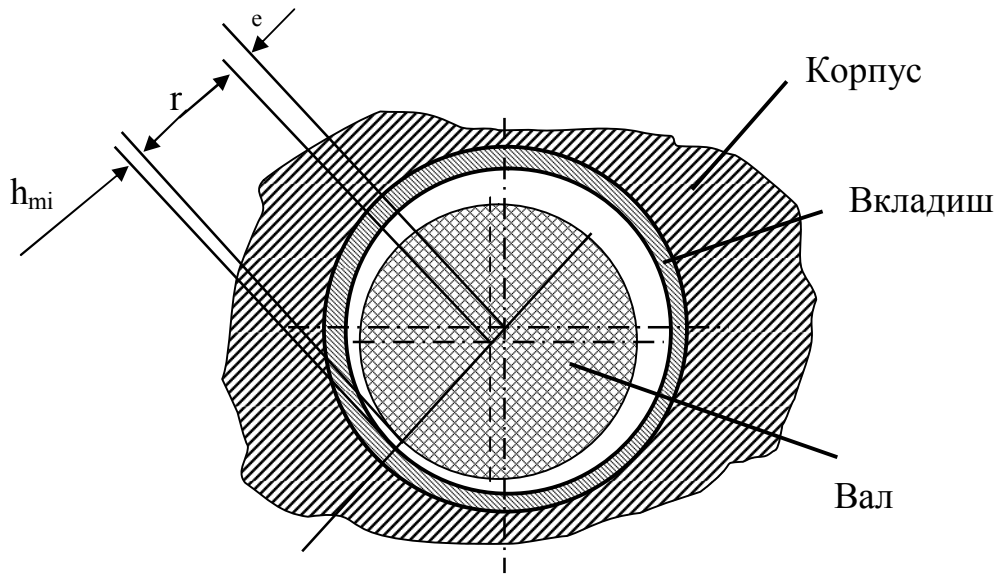


Рисунок 5.4 – Схема розташування валу і вкладишу (укладка) при гідродинамічному режимі змащування

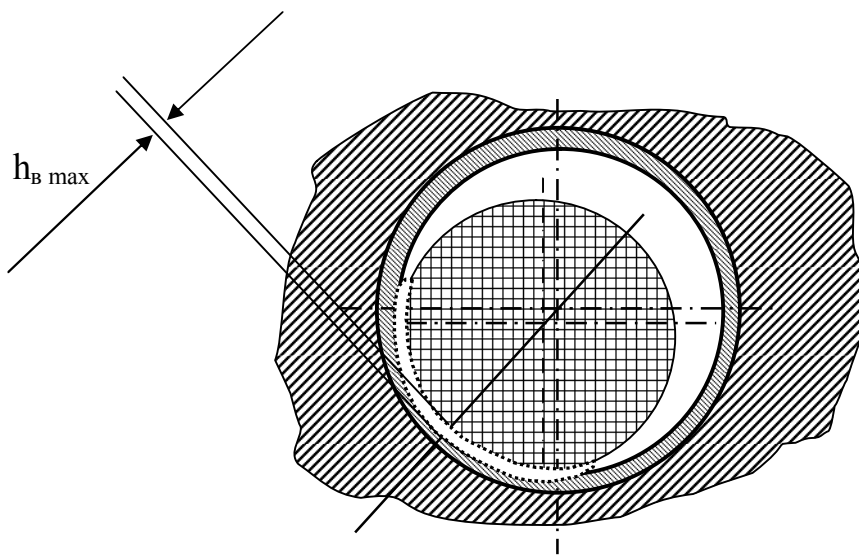


Рисунок 5.5 – Схема розташування валу та вкладишу (укладки) при пружно-гідродинамічному режимі змащування

Отже, використовуючи рівняння Рейнольдса, залежність в'язкості від тиску та вираз для визначення пружних деформацій поверхонь, можемо розв'язати пружно-гідродинамічну задачу. Спільне розв'язання рівнянь (5.25) та (5.34) аналітично отримати не вдається, тому використовуються різні математичні методи. Найбільш відомим серед таких рішень є розв'язок Кодніра [51], який представлено у вигляді математичної моделі, реалізованої на ЕОМ, і в якій використано метод послідовних наближень. Використовуючи цю програму та статистичні методи обробки результатів, І.Д.Ратнер отримав приблизну

залежність для визначення товщини плівки мастила в зубчастих передачах та підшипниках ковзання:

$$h_0 = 3,17(\eta_0 \cdot v_\Sigma)^{0,75} \cdot \theta^{0,6} \cdot R_{np}^{0,4} \cdot q_H^{-0,15}, \quad (5.36)$$

де  $R_{np}$  – приведений радіус кривизни;

$q_H$  – лінійне навантаження, Н/м.

Аналогічні за структурою залежності отримані й іншими авторами, наприклад, розв'язок запропонований Даусоном-Тойотою (1979) [50] для лінійного контакту

$$H_c = 3,06 \cdot U^{0,69} \cdot G^{0,56} \cdot W^{-0,1}, \quad (5.37)$$

де  $H_c, U, G, W$  - безрозмірні критерії, відповідно, товщини плівки мастила, швидкості, матеріалів та навантаження.

Безрозмірні критерії визначають з співвідношень

$$H_c = \frac{h_{\min}}{R}; \quad U = \frac{\eta_0 \cdot U}{E' \cdot R}; \quad G = \theta \cdot E'; \quad W = \frac{W}{E' \cdot R \cdot B}; \quad U = \frac{U_1 + U_2}{2}; \quad R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Аналогічні залежності отримані і для процесів змащування робочого інструменту при обробці металів тиском [52 - 56], наприклад

$$h_0 = 3,6 \cdot \Delta h \cdot \left( \frac{\eta_0 \cdot (v_0 + v_B)}{\sigma_T \cdot \Delta h \cdot \alpha} \right)^{0,7} \cdot (\theta \cdot \sigma_T)^{0,6} \cdot \left( \frac{\sigma_T}{2 \cdot E_{np}} \right) \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\theta \cdot \sigma_T)}$$

де  $\Delta h$  – абсолютне обтиснення при прокатуванні, мм;

$\alpha$  - кут захвату при прокатуванні, рад;

$\sigma_T$  – межа текучості прокатуваного металу, Н/мм<sup>2</sup>.

## 5.4 Питання для самоконтролю

5.4.1 Спрощене виведення рівняння Рейнольдса.

5.4.2 Як впливають основні гідродинамічні фактори на вантажопідйомність підшипників ковзання?

5.4.3 Які переваги має режим пружно гідродинамічного змащування?

5.4.4 Які параметри підшипників та яким чином впливають на товщину плівки мастила?

5.4.5 Як впливають параметри прокатування на товщину плівки мастила?

## 6 ПРОЦЕСИ ЗНОШУВАННЯ

### 6.1 Види зношення

Терміном "зношення" позначають процес зміни мікро- або макрогеометрії поверхонь у результаті тертя.

Такі зміни можуть супроводжуватись відділенням часток металу з поверхні з відповідною втратою маси деталі або відбуватись без втрати маси. В більшості випадків при зношенні деталей можуть спостерігатися такі явища:

- 1) від поверхонь у результаті механічного впливу відділяються частки металу або його окислів – продукти зношення. Вони можуть виноситись з зони тертя мастильною речовиною, або, залишаючись в зоні тертя, "переноситись", тобто налипати на поверхню тертя, залишаючись у робочій зоні;
- 2) під дією локальних високих нормальних напружень та високих температур на ділянках фактичного контакту поверхні, що труться, піддаються пластичним мікродеформаціям; це явище може відбуватись у всіх деталей, в тому числі і загартованих до високої твердості, та може стимулюватися адсорбційною пластифікацією поверхневих прошарків;
- 3) під дією термічного впливу відбуваються структурні зміни в металі поверхневих прошарків та зміни їх хімічного складу (окислення, дифузія вуглецю з мастил, втрата легуючих елементів).

Відповідно до умов в зоні тертя можуть виникати ті чи інші вказані явища або їх одночасне поєднання. Через це одні й ті ж види зношення можуть по-різному проявлятись на деталях з різних матеріалів або в різних вузлах тертя, що ускладнює класифікацію видів зношення. Крім того, різні види зношення можуть відбуватись одночасно з іншими явищами, наприклад, пошкодженням поверхні корозією.

Стосовно деталей машин, які працюють із застосуванням мастильних речовин, виділяють три категорії зношення, в залежності від його виникнення:

- 1) фізичне зношення, яке проявляється у механічному відділенні часток матеріалу або його пластичній деформації (без відділення часток) на окремих ділянках взаємодії мікро- або макромасштабу;
- 2) хімічне зношення, яке проявляється у формуванні плівок на поверхні деталей, як результат хімічних реакцій матеріалу деталей з компонентами рідини або газу, та наступним руйнуванням цих плівок під дією сил тертя;
- 3) абразивне зношення, яке проявляється у відділенні часток деталей внаслідок механічного впливу абразивних часток в зоні тертя (різновид фізичного зношення, який відрізняється наявністю часток абразиву).

У залежності від механізму зміни макро- та мікрогеометрії зношуваних деталей відрізняють такі види фізичного зношення:

- 1) механічний, з відділенням часток при їх зрізанні, відшаруванні через втомлюваність металу, крихкому руйнуванні або без відділення часток при пластичному деформуванні поверхневих прошарків;
- 2) адгезійний, від мікро- або макрозварювання по окремих ділянках, з наступним руйнуванням такого з'єднання, яке супроводжується вириванням часток металу, їх відділенням або переносом.

Механізм хімічного зношення ґрунтується на переході атомів металу поверхні у нові хімічні з'єднання (окисли, мило, сульфідні, хлориди та інше) з утворенням поверхневих плівок, які в подальшому відділяються з поверхні під дією сил тертя за одним з наведених механізмів фізичного зношення.

За зовнішніми проявами види зношення можна розділити на дві категорії: мікрозношення або макрозношення.

Мікрозношення проявляється як стирання поверхні. Причини такого стирання можуть бути досить різноманітні, тому виявити їх можна лише застосувавши спеціальні методи дослідження. Наявність такого стирання не перешкоджає нормальній роботі механізмів. Більш того, стирання поверхні в початковий період роботи механізму, яке називають "притиранням" або "приробкою", буває навіть корисним для подовження загального часу роботи механізму. Стирання вважають "нормальним" видом зношення у тих випадках, коли неможливо забезпечити рідинне тертя між деталями механізму.

Макрозношення зовнішньо проявляється у вигляді значного пошкодження поверхонь тертя, які фіксуються візуально.

Механізми макрозношення часто бувають однаковими з мікрозношенням, але перехід від мікрозношення до макрозношення призводить до якісної зміни стану поверхні взаємодіючих деталей, коли пошкодження стають незворотними і деталі виходять з ладу. Виняток становлять початкові стадії деяких видів макрозношення, коли пошкодження незначні і не отримують подальшого розвитку. Але, як правило, макрозношення має катастрофічні наслідки, тому є неприйнятним і його прагнуть уникати.

На рисунку 6.1 показано схему класифікації видів зношення з урахуванням властивостей мастильних речовин. Як і будь-яка класифікація складних явищ, представлена класифікація має формальний характер, тому що ґрунтується на відокремленні одних явищ зношення від інших. В дійсності, як буде доведено далі, більшість видів зношення взаємопов'язані. За відповідних умов тертя можлива трансформація (перехід) одних видів зношення в інші. Окремі види зношення, однакові за

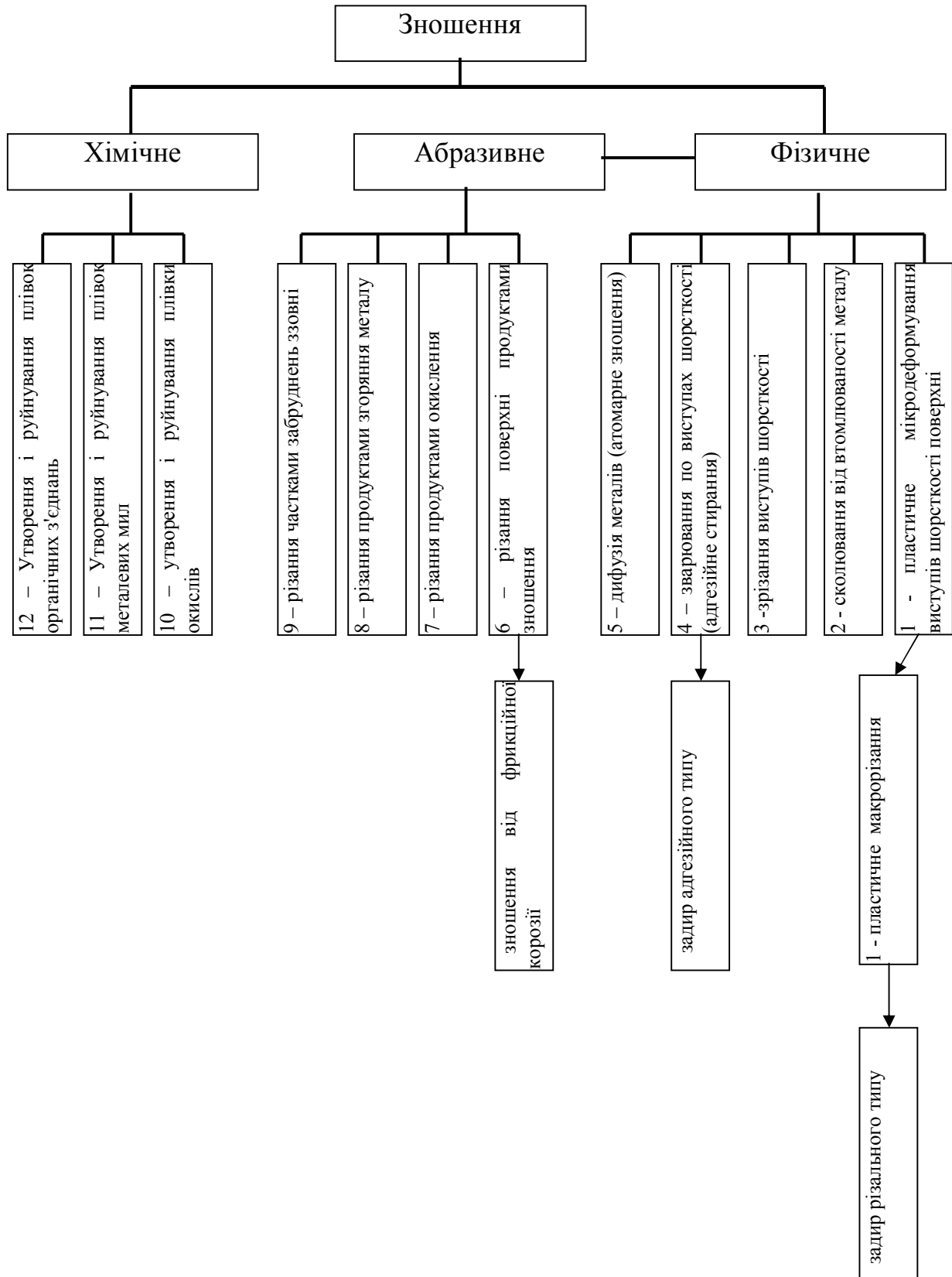


Рисунок 6.1 – Класифікація видів зношення



природою, можуть мати різні зовнішні прояви або різні перехідні стадії. Тому не можна абсолютизувати класифікацію видів зношення.

## 6.2 Мікрозношення (стирання)

Стирання, під яким розуміють різні види мікрозношення, являє собою найбільш розповсюджену форму зношення деталей машин. Воно зустрічається в тій чи іншій формі у всіх деталях машин при їх взаємному переміщенні, тобто в деталях, які рухаються, утворюючи пари тертя. Виділяють декілька різновидів стирання, зокрема фізичне та абразивне мікрозношення.

Фізичне мікрозношення розділяють на такі види:

1) Пластичне деформування виступів шорсткості поверхні без їх відділення. При цьому поверхня вирівнюється, змінюється її мікрорельєф, але маса деталі не змінюється, що свідчить про відсутність відділення окремих часток. Пластичне деформування нерівностей стимулюється адсорбційною пластифікацією поверхневих прошарків металу (ефект Ребіндера). У процесі пластичної деформації при взаємодії нерівностей один з виступів заглиблюється в протилежну поверхню і "проорюючи" її формує бічні виступи – "задирки" (заусенці). Внаслідок такого деформування повтореного багаторазово відбувається наклеп поверхні тертя.

2) Пругке або пластичне багаторазове передеформування поверхневих мікронерівностей з відділенням часток, як наслідок втоми металу.

3) Різання поверхні мікронерівностями: більш твердий виступ нерівності зрізає, подібно мікрорізцю, виступ нерівності більш м'якого матеріалу. При однаковій твердості поверхонь такий вид зношення напевне не реалізується.

4) Зварювання (схвачування) контактуючих мікронерівностей з наступним їх руйнуванням при переміщенні деталей (за Боуденом та Тейбором). Руйнування такого з'єднання мікровиступів відбувається по найбільш слабкому місцю. Ним може бути площина зварювання або виступ нерівності більш м'якого матеріалу. В останньому випадку частка більш м'якого матеріалу переноситься на більш тверду поверхню. Цей вид адгезійного мікрозношення в макромасштабі перетворюється в "задир" адгезійного типу.

5) Атомарне зношення – специфічний вид мікрозношення, основним механізмом якого є дифузія атомів металу з однієї поверхні на іншу.

Абразивне мікрозношення розділяють на :

6) Різання продуктами зношення. Продукти зношення металевих поверхонь у більшості випадків мають достатньо високу твердість, набуту в результаті накопичення пластичної деформації, відповідно вони мають абразивні властивості. Маючи більш високу твердість у порівнянні з

основним металом деталей, такі частки інтенсивно взаємодіють (пошкоджують поверхню деталей).

7) Різання продуктами окислення та карбонізації мастил. У процесі роботи механізмів при підвищених температурах відбувається окислення поверхні металевих деталей. В мастильних речовинах високі температури викликають процеси карбонізації – утворення твердих вуглецевих часток, які називають карбенами або карбоїдами. Такі частки утворюють твердий нагар на робочих поверхнях деталей або суспензії в мастилах. Частки нагару, руйнуючись, також потрапляють в мастильні речовини і разом з карбоїдами мастил можуть проявляти абразивні властивості.

8) Різання поверхні продуктами згоряння присадок мастил. Присадки до мастильних речовин можуть містити сполуки, до складу яких входять такі метали як кальцій, барій, цинк. Окислюючись (згоряючи), такі присадки також можуть утворювати абразивні частки.

9) Різання мінеральними частками. Мінеральні частки, які в більшості мають високу твердість, потрапляють в мастильні речовини ззовні. Наприклад, частки піску з розмірами менше 0,1 мм мають достатню летючість, щоб утримуватись потоком повітря і потрапляти спочатку в мастило, а потім в робочу зону механізмів.

У більшості випадків в процесі мікрозношення спостерігається порівняно гладка робоча поверхня деталей машин. Лише в окремих випадках абразивного мікрозношення можна спостерігати окремі подряпини, видимі неозброєним оком. Такі явища вже виходять за межі поняття "мікрозношення".

Хімічне мікрозношення розділяють на такі підвиди:

10) Утворення та руйнування плівок окислів. Неперервний процес руйнування та відновлення граничних окисних плівок в процесі тертя призводить до стирання робочих поверхонь. Цей процес інтенсифікується утворенням в мастильних речовинах низькомолекулярних кислот, а також попаданням в мастило води або інших корозійно-агресивних речовин.

11) Утворення та руйнування плівок мил на робочій поверхні деталей. Присутні в мастилах високомолекулярні кислоти (їх вводять в мастило як присадки або вони утворюються в мастилах під впливом температури) можуть вступати в хімічну реакцію з металевою поверхнею, утворюючи металеві мила. Подальше руйнування плівок таких мил призводить до поступового зношення поверхні.

12) Утворення плівок органічних з'єднань. Присутні в мастилах органічні сполуки сірки, фосфору, хлору, кальцію та деяких інших елементів за певних умов можуть вступати в хімічні реакції, утворюючи органічні з'єднання на робочих поверхнях деталей.

Наведені види зношення нерівнозначні за інтенсивністю.

При терті в умовах відсутності мастил виключені види зношення 7, 8, 11 та 12, а види зношення 6 та 9 можливі лише за умови, що абразивні частки затримуються в робочій зоні тертя. Домінуючим видом зношення за цих умов є зношення виду 10. Певне значення мають також 2 та 4 види зношення.

При терті змащених поверхонь переважають 11 та 12 види хімічного мікрозношення. Види зношення 1 – 4 спостерігаються на поверхнях, що змащуються мастилами з антизношувальними присадками або нелегованими мастилами.

Вид мікрозношування 5 є досить специфічним, відбувається з переносом металу і зустрічається лише за певних умов. Наприклад, при терті мідних сплавів по сталі в присутності гліцерину та інших мастил, здатних відновлювати окисли міді до чистої міді.

Абразивне зношення змащених поверхонь слід розглядати як аномальне явище, порушення нормальної роботи механізму. Такий вид зношення можливий при недостатньому змащуванні або при забрудненні мастила і недостатній (або неможливості) фільтрації мастил від забруднень.

Вплив мастильних речовин на мікрозношення стиранням проявляється через такі ефекти:

- створення режиму гідродинамічного змащування, який характеризується мінімальним зношенням або відсутністю зношення;
- створення межових плівок – адсорбованих або хімічно з'єднаних з поверхнею деталей, які зменшують зношення при відсутності режиму рідинного тертя;
- нейтралізації дії корозійно-агресивних речовин, які потрапляють у мастило ззовні або утворюються в процесі роботи мастил;
- забезпечення регульованого зношення на етапі приробки деталей (за допомогою відповідних присадок);

### **6.3 Задир (зварювання, схвачування)**

Задир поверхонь, як результаті їх взаємодії у процесі тертя, виникає при їх перевантаженні, перегріві або недостатній кількості мастила. При задири спостерігається значне пошкодження поверхні, яке часто робить неможливим подальшу роботу деталей машин – катастрофічне зношення з наступних виходом з ладу деталей або всього механізму.

Терміном "задир" позначають вид макрозношення, який характеризується значним пошкодженням поверхні в глибину у напрямку ковзання, переважно у вигляді борозен, виривів металу. На початковій стадії задир може мати форму дрібних рисок, які при подовженні дії факторів переходять у подряпини значної довжини, а потім у борозни по всій поверхні контакту.

Якщо дія фактору, який викликав перші прояви задиру, послаблюється або припиняється, дрібні риси не отримують подальшого розвитку і можуть зберігатись тривалий час, не впливаючи на нормальну роботу механізму. В деяких випадках дрібні риси, що виникли як наслідок початкової стадії задиру і не отримали подальшого розвитку, можуть вигладжуватись. Тобто, заDIR у слабкій формі може розглядатись як зворотній процес.

У відповідності зі схемою, наведеною на рисунку 6.1 відрізняють заDIR "адгезійного" та "різального" типу.

ЗаDIR адгезійного типу.

Такий вид задиру спостерігається в двох різновидах:

1) заDIRи мають форму глибоких борозен з виступами по краях та частками зношення, які деформуються на таких виступах і через це можуть налипати на поверхню деталі. Така форма задиру характерна при порівняно невисоких швидкостях і відповідно низьких температурах у робочій зоні, тому отримала назву "холодного задиру адгезійного типу".

2) заDIR набуває форми рівномірних дрібних рисок, часто із слідами оплавлення. Така форма зношення характерна для високих швидкостей ковзання та порівняно високих температур в зоні фактичного контакту. В подальшому таку форму зношення будемо називати "гарячим заDIRом адгезійного типу".

Процес розвитку задиру адгезійного типу складається з таких трьох фаз:

1 фаза – пластична, переважно зсувна деформація, поверхневого прошарку металу деталі. Така деформація повинна бути достатньо інтенсивною, щоб зруйнувати всі поверхневі плівки і забезпечити утворення "ювенільних" поверхонь на достатній площі в зоні контактування. Цей процес інтенсифікується зі зростанням навантаження та температури в зоні контактування. Наприклад, при зростанні температури, від зростання швидкості ковзання знижується межа текучості металу, особливо на ділянках фактичного контакту.

2 фаза – зварювання (схвачування, адгезія, заDIR), характеризується утворенням локальних металевих зв'язків по ділянках фактичного контактування попередньо утворених ювенільних поверхонь. Зварювання відбувається при зближенні поверхонь на відстань, достатню для утворення такого металевого зв'язку. Варто відзначити, що при звичайному зближенні металевих поверхонь на відстань у кілька мікрометрів виникають Ван-дер-Ваальсові сили, але їх недостатньо для утворення металевого зв'язку. Лише при відповідних навантаженнях на ділянках фактичного контакту руйнуються плівки окислів і чисті поверхні можуть зблизитись на відстань, достатню для утворення металевого зв'язку. До того ж відповідне навантаження необхідне для збільшення площі фактичного контакту. При помірних навантаженнях фактична площа контактування шорстких поверхонь порівняно незначна і не може утворити значимі металеві зв'язки.

При зростанні навантажень до рівня виникнення пластичної деформації виступів шорсткості фактична площа контактування зростає і стає достатньою для утворення металевих зв'язків, що призводить до виникнення адгезійного задиру. Схильність поверхонь до схвачування тим більша, чим вище енергія атомів у кристалічній решітці металів. Цю енергію значно підвищує температура, а також, в незначній мірі, зміцнення та пружка деформація.

3 фаза - руйнування металевих зв'язків при взаємному переміщенні деталей, що утворюють пару тертя.

При адгезійному задирі однакових металів з однаковою мікроструктурою поверхневих прошарків утворюються металеві зв'язки, міцність яких приблизно відповідає міцності основного металу. В дійсності, через багаторазове пластичне деформування виступів нерівностей поверхонь, спостерігається значне зміцнення таких ділянок. З цієї причини міцність з'єднання на ділянках схвачування буває значно більшою за міцність основного металу. Тому руйнування металевого зв'язку відбувається не по площині схвачування, а по основному металу з виривом певної кількості менш міцного металу. Глибина такого вириву, тобто розміри частки, визначаються градієнтом механічних властивостей металу. Цей процес характеризують як перенос основного металу з однієї поверхні на іншу.

#### **6.4 Оцінка зношення робочих поверхонь**

Вивчення процесів тертя та зношення має значну практичну цінність. Але вивчення цих процесів в реальних умовах, на діючих механізмах, майже неможливе через високу вартість таких досліджень та небезпеку виведення механізмів з ладу. Тому на практиці обмежуються констатацією кінцевого зношення під час ремонту механізмів. Дослідження процесів зношення в більшості випадків проводять на моделюючих установках.

Теоретичною базою для такого моделювання є теорія подібності. Згідно з теорією подібності функціональну залежність між параметрами представляють у вигляді критеріального рівняння, що складається з безрозмірних комплексів. З накопиченого практичного досвіду відомо, що інтенсивність зношування залежить від таких факторів: тиск в робочій зоні; твердість матеріалів; характеристики міцності більш м'якого матеріалу, зокрема, межі втомлюваності цього металу; параметрів шорсткості поверхонь; швидкості ковзання; температурних умов; наявності та розміру абразивних часток; властивостей мастильних речовин та ін. Врахувати вплив всіх факторів неможливо, тому обмежуються найбільш значимими. Наприклад, використовуючи такі інтегральні параметри, тобто такі, що відображають вплив інших факторів, як коефіцієнт тертя та товщина плівки мастила в робочій зоні, можемо представити залежність для інтенсивності зношення у вигляді критеріального рівняння виду [56]:

$$I_{hm} = \frac{h_u}{S_{mp}} = K_m \cdot \Pi_a^m \cdot \Pi_{cm}^n \cdot \Pi_y^p \cdot \Pi_{ш}^c, \quad (6.1)$$

де  $I_{hm}$  - показник інтенсивності зношення поверхні;

$h_u$  - абсолютна величина зношення, м;

$S_{mp}$  - шлях тертя, м;

$K_m, m, n, p, c$  - показники, які визначають з експериментів;

$\Pi_a$  - показник (критерій), який характеризує напружений стан та безрозмірну площу контактування поверхонь пари тертя;

$\Pi_{cm}$  - показник, що характеризує відносну товщину плівки мастила;

$\Pi_y$  - показник, що характеризує втомлюваність менш міцного металу;

$\Pi_{ш}$  - показник, що характеризує вплив шорсткості поверхонь.

Складові критеріального рівняння визначаємо із співвідношень

$$\Pi_a = \frac{f \cdot P}{HB}; \quad \Pi_{cm} = \frac{\xi_{cp}}{\chi}; \quad \Pi_y = \frac{f_1 \cdot P}{\sigma_0}; \quad \Pi_{ш} = \frac{R_{\max}}{r \cdot b_1^{1/k}},$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя ковзання в робочій зоні;

$P$  - тиск, Па;

$HB$  - твердість матеріалу (менше значення для різнотипних матеріалів);

$\xi_{cp}$  - середня товщина плівки мастила, м;

$\chi$  - характерний розмір абразивної частки, наприклад її діаметр, м;

$f_1$  - коефіцієнт, який залежить від умов тертя і напруженого стану в робочій зоні;

$\sigma_0$  - межа втомлюваності більш м'якого матеріалу, Па;

$R_{\max}$  - найбільша висота мікро нерівностей поверхонь, м;

$r$  - приведена висота нерівностей, м;

$b_1, k$  - коефіцієнти, що визначають вплив шорсткості на зношування.

У випадках фізико-хімічної взаємодії в робочій зоні необхідно включати у критеріальне рівняння додаткові складові, такі як кінетичний, адгезійний, хімічної модифікації та часу.

За умов визначального впливу теплових явищ використовують комплекси, які враховують відносну температуру, вплив температурного

градієнту і теплового граничного прошарку, а також комплекс, що враховує теплонапруженість поверхневих прошарків.

Розглянемо особливості зношення робочих поверхонь валків при сортовому та листовому прокатуванні та вплив мастильних речовин на величину зношення. Процес зношення прокатних валків відбувається під дією таких самих трибологічних механізмів, що й при звичайному зношенні деталей машин. Особливості зношення прокатних валків обумовлені межами зміни робочих параметрів та їх взаємним впливом.

Так, у процесі деформування металу валки сприймають значні механічні та теплові навантаження. Наприклад, при гарячому прокатуванні в осередку деформування нормальні напруження досягають значень  $500 - 600 \text{ Н/мм}^2$ , а при холодному прокатуванні легованих сталей –  $1500 - 2500 \text{ Н/мм}^2$ . Крім цього, для багатовалкових станів у місцях контактування валків теж виникають напруження, які можуть перевищувати напруження в осередку деформування.

Наведені значення нормальних напружень обумовлюють порівняно високі напруження зсуву, тобто напруження тертя. Швидкість ковзання в осередку деформування визначається технологічними параметрами. Але навіть при порівняно невисоких швидкостях ковзання значні напруження тертя призводять до відносно високої інтенсивності зношення.

При гарячому прокатуванні температура металу становить  $950-1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Проходячи через осередок деформування за доли секунди, метал розігріває поверхню валків. У поверхневих прошарках температура валків може досягати температури металу. По виході з осередку деформування поверхня валків різко охолоджується водою. Системи охолодження валків прокатних станів повинні забезпечувати температуру поверхні валків на рівні  $50 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Але такі постійно повторювані теплові удари призводять до зменшення твердості поверхневих прошарків (відпал), що сприяє зношенню. Крім цього, теплові удари супроводжуються окисленням поверхні, вигорянням вуглецю та інших легуючих елементів у поверхневих прошарках валків, утворенням термічних тріщин. Умови роботи поверхні валків також ускладнюють газодинамічні явища, викликані вибуховим випаровуванням води, яка потрапляє в осередок деформування. Комплексна дія наведених факторів призводить до утворення та розвитку сітки розгару – довільно розташованих тріщин. Але основною причиною заміни валків (перевалки) є втрата потрібної геометричної форми калібрів або листових валків через зношення.

Використання мастильних речовин забезпечує зменшення напружень тертя та екрануючу дію (теплоізолюючий ефект), що суттєво зменшує інтенсивність зношення. Наприклад, на рисунку 6.1 наведено профілі зношення валків чистової кліті лінійного стану 550 заводу Петровського при прокатуванні швелера. Як видно з рисунку, при прокатуванні без застосування мастил величина зношення досягала  $1 \text{ мм}$  по радіусу, після чого валки заміняли. Використання мастильних речовин у вигляді  $10 \%$  -ної

емульсії (стандартні емульсоли на основі мастила I-20A) забезпечило зменшення інтенсивності зношення. Завдяки цьому, при однаковій допустимій величині зношення в 1 мм, на одному комплекті валків вдалося прокатати майже в два рази більшу кількість металу – 632 т замість 381 т.

Аналогічні результати отримані і при використанні мастильних речовин на листових станах гарячого прокатування. Наприклад, на неперервному стані 1680 комбінату „Запоріжсталь” при звичайному прокатуванні зношення робочих валків за 4 години роботи становило близько 0,15 мм (рисунок 6.2). Використання 5%-ної емульсії полімеризованого „бавовняного” мастила забезпечило величину зношення на рівні 0,05 – 0,1 мм за той же час роботи. При цьому показники шорсткості поверхні робочих валків відрізнялися майже у два рази: валки, що працювали без мастила мали шорсткість  $R_z=8,2 - 8,5$  мкм, а для валків з подачею мастила  $R_z=3,5 - 4,4$  мкм.

Крім зменшення зношення робочих валків, спостерігалось значне зменшення зношення опорних валків – приблизно у 2 – 3 рази. Якщо при звичайному прокатуванні максимальна величина зношення досягала 0,76 мм по діаметру, то при застосуванні емульсії величина зношення не перевищувала 0,27 мм (рисунок 6.3).

Прокатування металу в холодному стані здійснюється з обов'язковим використанням мастильних речовин. Без мастильних речовин процес холодного прокатування неможливий з таких причин:

- через високі значення коефіцієнту тертя енергосилові параметри процесу можуть перевищувати можливості обладнання;
- значне погіршення якості поверхні прокату;
- пошкодження поверхні валків.

В якості мастильних речовин застосовують емульсії мінеральних та рослинних олій різної в'язкості, водно-масляні суміші або мастила в чистому вигляді.

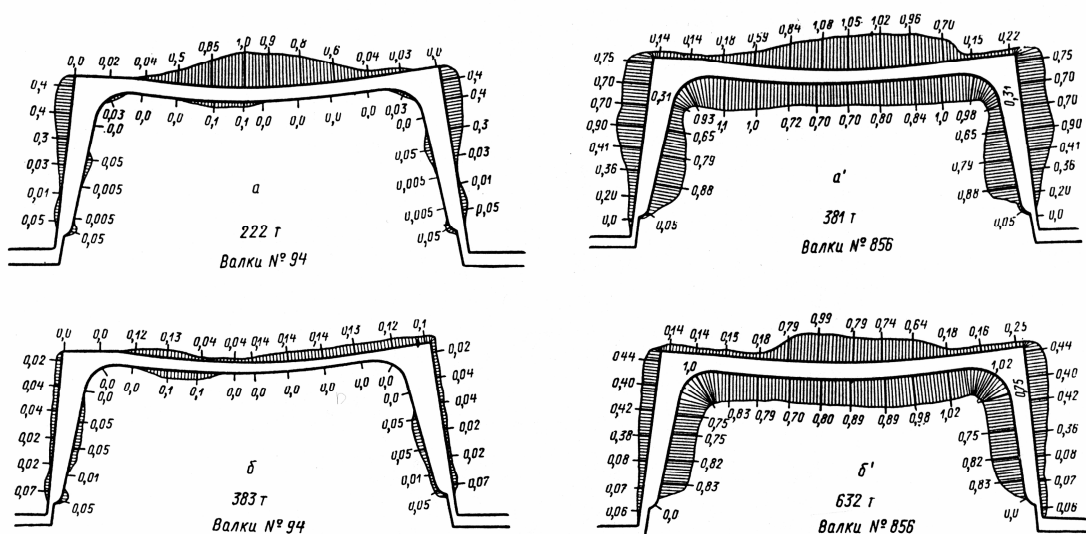




Рисунок 6.1 – Профілі зношення валків чистової кліти стану 550 при прокатуванні швелера №12

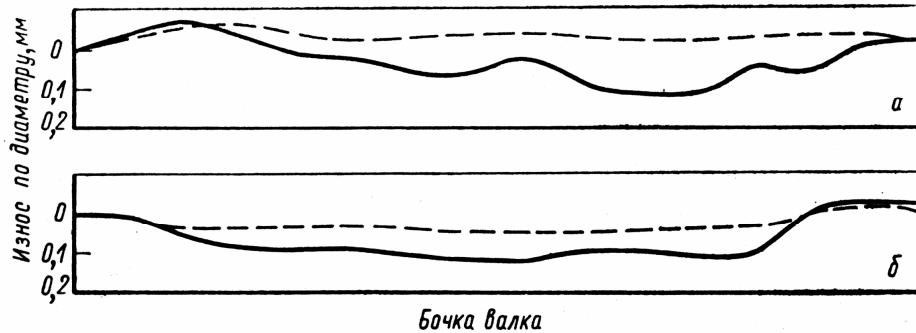


Рисунок 6.2 – Зношення нижнього робочого валка кліти №5 стану 1680 за одну установку

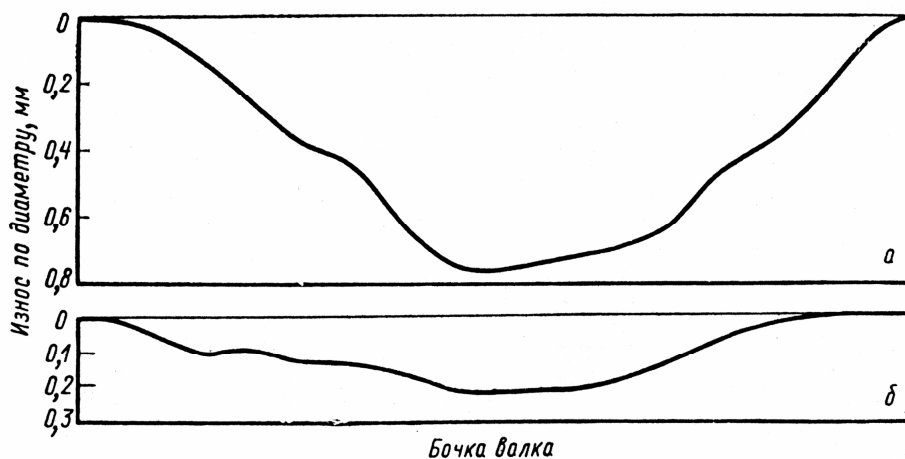


Рисунок 6.3 – Зношення нижнього опорного валка кліти №6 стану 1680 за одну установку

Зношення поверхні робочих валків за кампанію їх роботи (одну установку в кліть) незначне і не перевищує 0,12 мм по радіусу. Заміну робочих валків станів холодного прокатування здійснюють не через зношення або втрату геометрії, а переважно через зміну топографії поверхні – в процесі прокатування шорсткість поверхні зменшується. Для відновлення характеристик шорсткості поверхні, а також для зняття наклепаного поверхневого прошарку робочі валки необхідно перешліфувати і обробити на дробометних установках.

Рівномірність зношення можна забезпечити за рахунок оптимізації профілювання валків. Зазвичай при холодному прокатуванні листів верхній робочий валок має випукле профілювання, а нижній – увігнуте. Така особливість профілювання призводить до нерівномірного зношення опорних

валків. Наприклад, на рисунку 6.4 показані профілі зношених опорних валків кліті №1 чотириклітьового стану 1680.

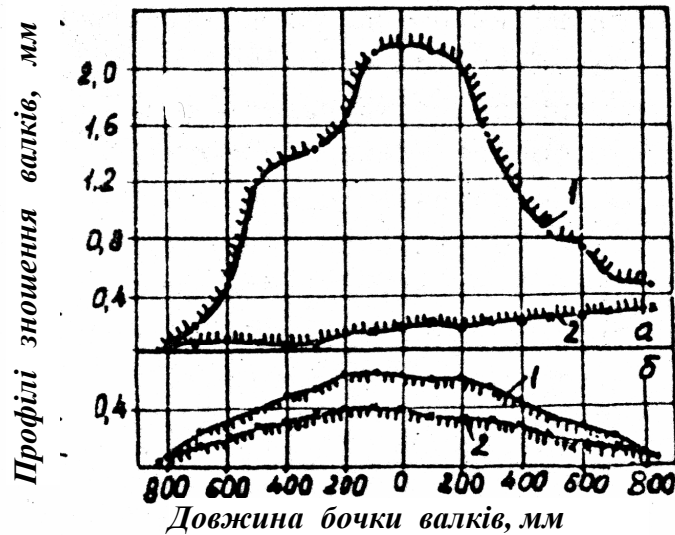


Рисунок 6.4 – Профілі зношення верхніх (а) та нижніх (б) опорних валків кліті №1 стану 1680 холодного прокатування за відсутності профілювання (1) та з використанням змінного профілювання (2).

Як видно з наведених даних, найбільше зношення спостерігається по середині бочки опорних валків. Це пов'язано з тим, що максимум міжвалкового тиску приходить саме на ці ділянки бочки валків. Слід відзначити, що таке саме розподілення має і тиск металу в осередку деформування, тобто робочі валки пропорційно передають тиск на опорні валки. Крім цього, можна відзначити, що верхні опорні валки зношуються значно інтенсивніше за нижні. Це пояснюється тим, що верхній опорний валок має випукле профілювання, а нижній – увігнуте. Через це зношення верхнього опорного валка може досягати кількох міліметрів.

У випадках застосування іншого профілювання отримують протилежну картину зношення. Так, для другої та третьої клітей цього ж стану 1680 спостерігалось більш інтенсивне зношення по краях бочки.

Отже, як для прокатних валків, так і для деталей машин і механізмів, підвищення їх зносостійкості є актуальною задачею. Під терміном „зносостійкість” розуміють властивість матеріалів протистояти зношенню за певних умов тертя. Зносостійкість визначають як величину, зворотну швидкості зношення (або його інтенсивності). Одним з напрямків збільшення зносостійкості, крім застосування мастил та підтримання певних робочих умов (охолодження, конструктивні параметри та ін.), є вибір

матеріалів для деталей або інструменту. Для збільшення зносостійкості використовують сталі, леговані марганцем, хромом., а також матеріали на основі карбідів вольфраму, титану, хрому (тверді сплави). Прикладом таких зносостійких матеріалів є сплав **Ж425Х3**. Це конструкційна хромиста сталь, яка містить 0,6 – 0,7 % вуглецю та 2,3 – 3,0 % хрому, що виготовляється методами порошкової металургії.

Для збільшення зносостійкості використовують також методи нанесення покриттів, наприклад напилення матеріалів, що містять хром. Створення зносостійких покриттів на поверхні деталей машин економічно і технічно досить ефективно.

Не менш важливе значення має і відновлення деталей машин і робочого інструменту. Особливості відновлення деталей буде розглянуто в розділі 8.

### **6.5 Питання для самоконтролю**

- 6.5.1 Наведіть класифікацію процесів зношування.
- 6.5.2 Які основні механізми зношення поверхонь в процесі тертя?
- 6.5.3 Роль мастильних речовин та температурних умов в процесах зношення?
- 6.5.4 Які показники використовують для оцінки зношення?
- 6.5.5 Які основні способи підвищення зносостійкості деталей машин та робочого інструменту?

## 7 СИСТЕМИ ЗМАЩУВАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ МАШИН

### 7.1 Класифікація систем змащування

Більшість вузлів металургійних машин для виконання своїх функцій потребують змащування. Прикладами таких вузлів є різноманітні підшипникові опори, зубчасті передачі (редуктори, шестеренні кліти та інше), передачі гвинт-гайка, різноманітні направляючі (плоскі підшипники ковзання), ланцюгові передачі і так далі. Винятком є пари колесо-рейка на транспортних засобах, гальмівні механізми.

Ефективність роботи механізмів та технологічних процесів значною мірою залежать від властивостей мастильних речовин та конструктивних особливостей змащувальних пристроїв. Тому, при проектуванні або удосконаленні машин і механізмів системам змащування приділяється не менше уваги, ніж основним вузлам металургійних машин.

Системи змащування удосконалюються одночасно з іншими об'єктами техніки, у тому числі і металургійними машинами, забезпечуючи розширення їх технічних можливостей. Розвиток систем змащування відбувався в таких напрямках [58]:

- від ручної періодичної подачі до автоматизованого змащування;
- від індивідуального змащування кожного окремого вузла до централізованого змащування для певного комплексу механізмів;
- від подачі мастил за принципом "чим більше, тим краще" до точно дозованої періодичної подачі із забезпеченням оптимальної витрати мастил.

Для сучасної техніки характерно використання типових підшипникових вузлів, особливо підшипників кочення. Але системи змащування проектуються для забезпечення певних параметрів роботи цих підшипникових вузлів і значною мірою визначаються потрібними технічними характеристиками цих механізмів. Тому системи змащування відрізняються значною конструктивною різноманітністю. Крім того, в експлуатації одночасно знаходяться механізми різних, умовно кажучи, поколінь. Наприклад, неперервний широкосмуговий стан 1680 комбінату "Запоріжсталь" введено в експлуатацію в 1933 році і за минулі роки стан неодноразово реконструювали та переоснащували. Відповідно, на стані використовуються різноманітні системи змащування, від морально застарілих, до сучасних високотехнологічних. Все це значно ускладнює класифікацію систем змащування металургійних машин.

Для класифікації використовують такі основні критерії :

- за видом змащувальної речовини;
- за способом дозування;
- за принципом дії;
- за способом подачі та періодичності та ін.

За видом змащувальної рідини відрізняють системи для рідинних мастильних речовин (oil lubricant) та для пластичних мастил (grease lubricant). Але сучасні системи змащування здебільшого конструктивно дозволяють використовувати обидва типи мастил. Більше того, для сучасних мастил можуть використовувати олії з різними типами згущувачів, що збільшує в'язкість рідинних мастил до рівня пластичних.

За принципом дії пристрої для змащування можна розділити на індивідуальні та централізовані, проточні та циркуляційні.

Індивідуальні змащувальні пристрої призначені для змащування лише одного вузла тертя. Всі інші пристрої можна назвати системами змащування. Наприклад, коли одночасно здійснюється змащування кількох вузлів тертя з одного пристрою, така система називається централізованою.

Враховуючи, що будь-яка класифікація є достатньо умовною, використаємо класифікацію, запропоновану фірмою FAG [59], яку представлено на рисунку 7.1.

## **7.2 Індивідуальні пристрої для змащування**

Найпростішим способом змащування густими мастилами є використання закритих кулькових або роликів підшипників [59]. Такі підшипники мають з обох боків пластини (кришки), які утворюють закриту порожнину, і в яку при виготовленні нагнітають певну кількість пластичного мастила (рисунок 7.2). Кількість та властивості мастила розраховуються таким чином, щоб забезпечити надійну роботу такого підшипникового вузла певний час. По завершенню цього періоду роботи мастило повинно бути повністю замінено, для чого потрібно розібрати підшипниковий вузол.

Для забезпечення періодичного поповнення мастил використовують різноманітні конструктивні рішення. Наприклад, прес-маслянки [59] (рисунок 7.3). Такі порівняно прості рішення дозволяють значно подовжити період роботи підшипникового вузла.

Конструкції індивідуальних пристроїв для змащування окремих вузлів тертя рідинними мастилами передбачають використання різних фізичних явищ (сила тяжіння, капілярний тиск, в'язкісне тертя, відцентрові сили та інше) і можуть мати різноманітні типи конструктивного виконання [60], приклади яких наведено на рисунках 7.4 – 7.7.

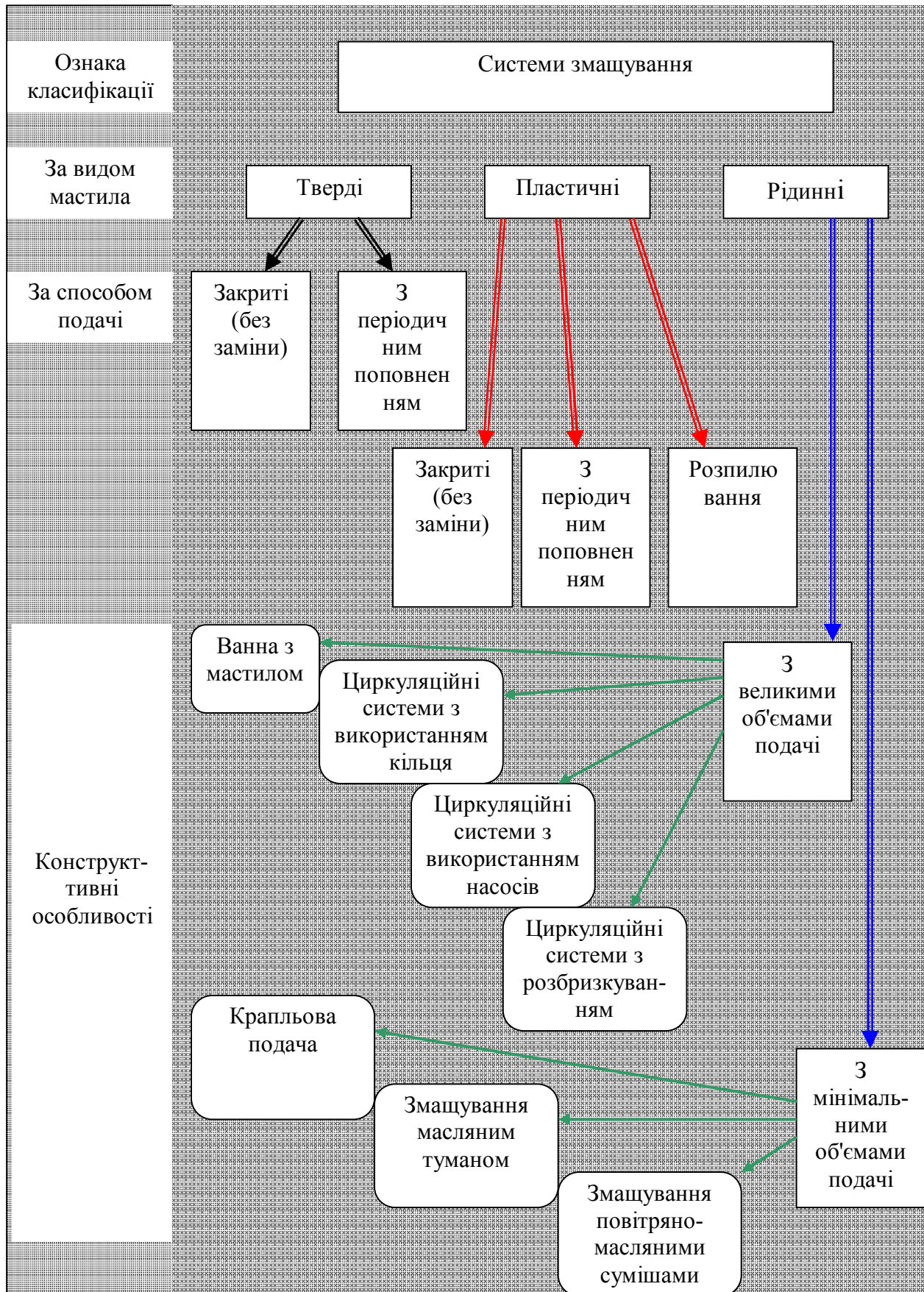


Рисунок 7.1 – Класифікація систем змащування



Рисунок 7.2 – Закритий підшипник кочення

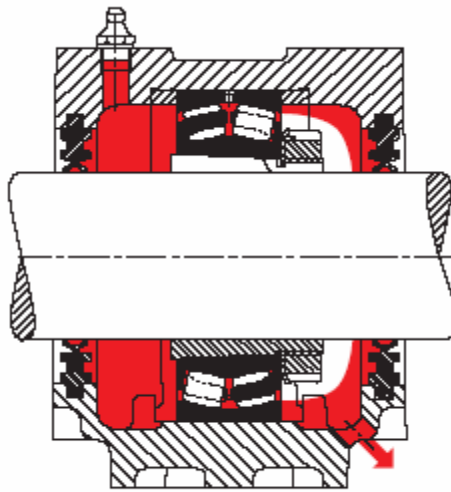


Рисунок 7.3 – Підшипниковий вузол з прес-маслянкою

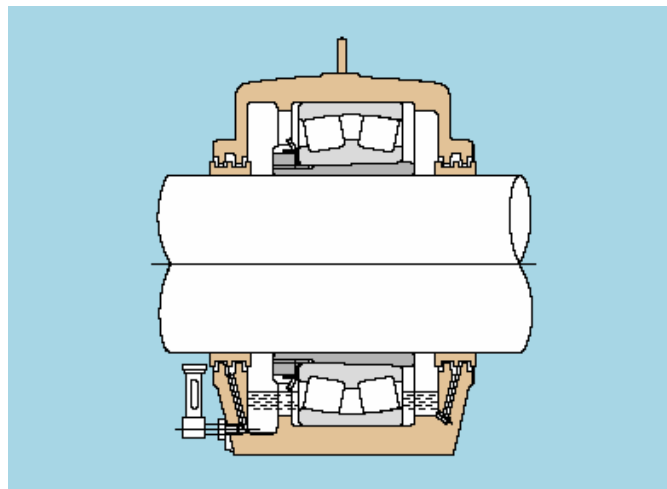


Рисунок 7.4 - Ванна з мастилом

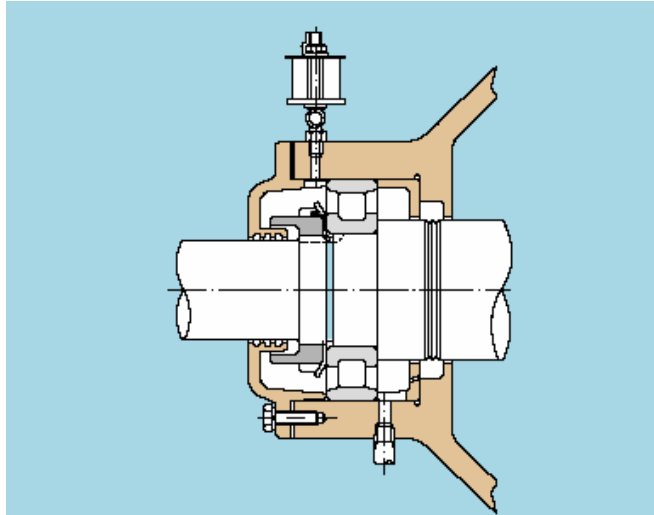


Рисунок 7.5 - Крапельова або фітільна подача

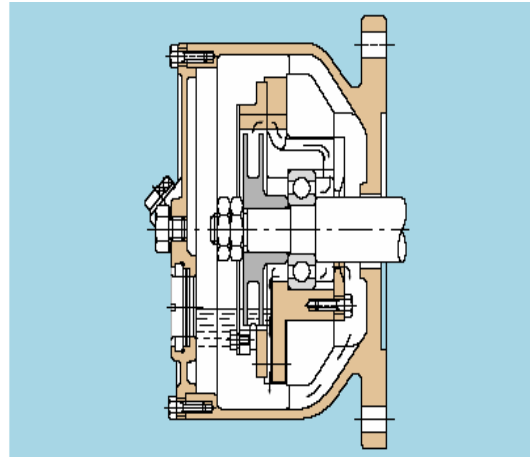
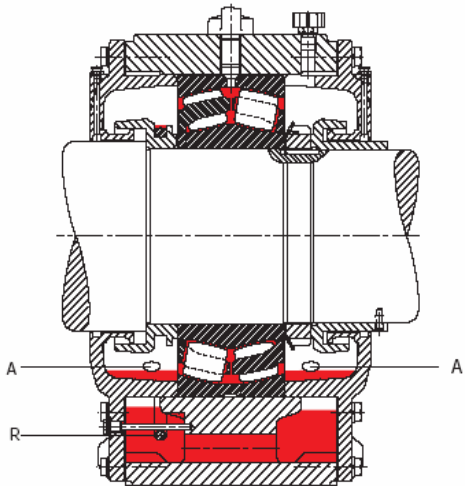


Рисунок 7.6 - Подача диском або кільцем

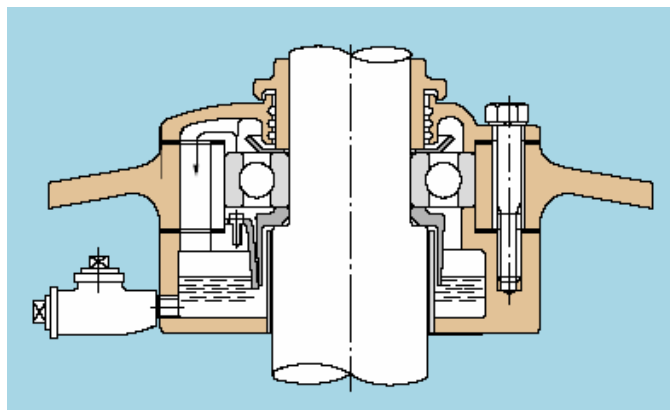


Рисунок 7.7 - Розбризуванням



### 7.3 Системи змащування

Система змащування – сукупність пристроїв, що забезпечує подачу змащувальної речовини у вузол тертя.

Система класифікується як **централізована**, якщо вона забезпечує змащування кількох вузлів тертя. Якщо повернення мастильних речовин для повторного використання не передбачено, така система називається **проточною**. Якщо система має пристосування для повернення мастил у ємність для подальшого використання або зберігання, вона класифікується як **циркуляційна**.

На металургійних підприємствах значна кількість обладнання оснащена системами централізованого змащування періодичної дії (з використанням принципу періодичного поповнення). В таких системах усі підшипникові вузли одного агрегату або групи з'єднуються трубопроводами з центральною станцією змащування. Звідтіля ручним насосом або насосом з електроприводом періодично (наприклад, один раз за зміну) здійснюється поповнення підшипникових вузлів мастилом.

Наприклад, **проточна централізована** система подачі рідинних мастил (рисунок 7.8, [59]) складається з насосу 1, який закріплено на ємності з мастилом, головного маслопроводу 2, дозаторів 3, вторинних маслопроводів 4, форсунок 5 та контрольно-вимірювальних пристроїв 6. Кожен дозатор (дросель) налагоджується на подачу певної кількості мастила через форсунку до відповідного вузла тертя.

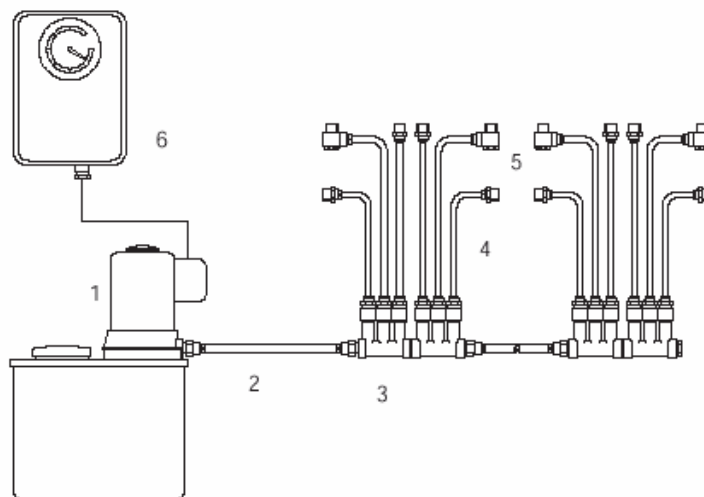


Рисунок 7.8 – Схема проточної централізованої системи змащування рідинним мастилом [59]

Різновидом таких систем є широко розповсюджені "лубрикатори" - проточні централізовані системи змащування, оснащені насосами з ручним приводом та багатовідвідні насоси з електричним приводом [58].

Періодичність дії таких систем визначається включенням насосу на певний час або включенням насосу засобами автоматизації за певною програмою.

Суттєвим недоліком таких конструкцій є забруднення оточуючого середовища, тому що при постійному поповненні зайве мастило видавлюється через ущільнення.

Більш досконаліми змащувальними системами є **проточні централізовані послідовні** системи, головна відмінність яких – наявність живильників (*питателей*). Конструкція живильників складається з уніфікованих деталей, що дозволяє вибирати потрібну їх кількість в залежності від наявних точок змащування. Такі живильники збираються в блоки і при включенні подачі мастила забезпечують послідовну подачу порцій мастила до відповідних вузлів тертя.

Для прикладу, розглянемо схему роботи живильників конструкції фірми "Lincoln" [ 61 ]. Верхній та нижній елементи кожного блоку відмінні, а всі проміжні елементи однакові. На рисунку 7.9 показано живильний блок з чотирма робочими елементами, які забезпечують змащування восьми точок. Головним конструктивним елементом кожного робочого блоку є трисекційний поршень, який, переміщуючись під дією тиску, перекриває або відкриває відповідні отвори, забезпечуючи подачу порції мастила по вторинному трубопроводу до точки змащування.

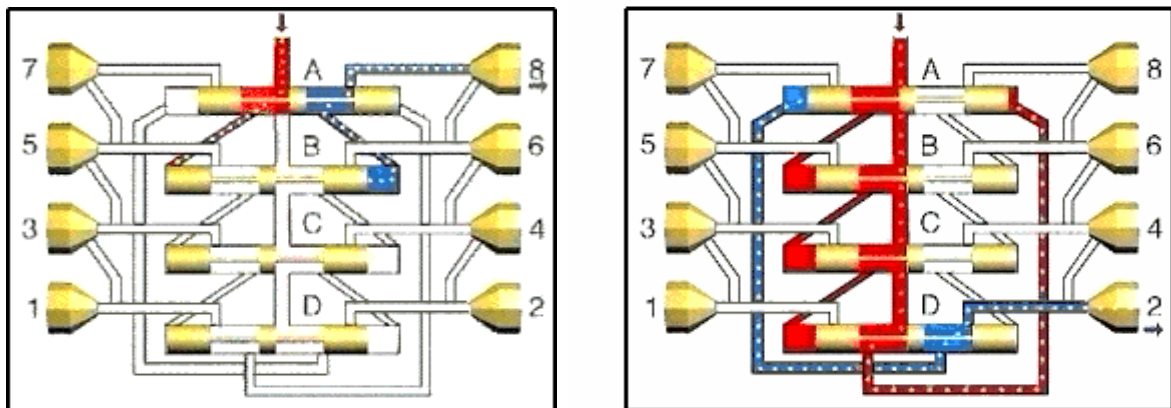
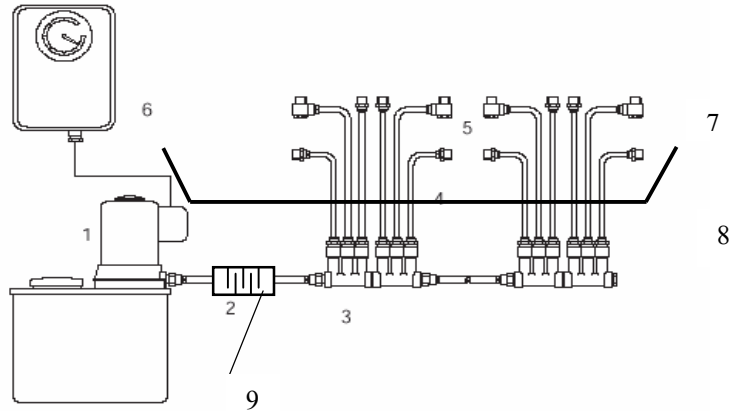


Рисунок 7.9 – Схема роботи живильників проточної послідовної одномагістральної централізованої системи

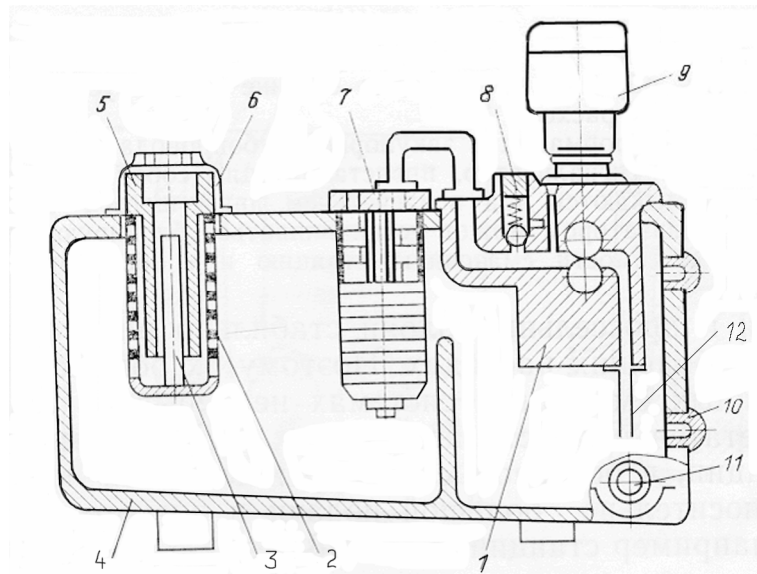
Якщо проточну централізовану систему доповнити пристроями для збирання мастил, які пройшли через вузол тертя, їх фільтрації та накопичення для подальшого використання, то така система стане **циркуляційною**. Приклад такого переоснащення наведено на рисунку 7.10.



7- ємність для збирання відпрацьованого мастила; 8 – зворотний трубопровід;  
9 – фільтр.

Рисунок 7.10 – Схема циркуляційної централізованої системи змащування рідинним мастилом

Циркуляційні системи з дросельним дозуванням стало працюють лише при відносно великих об'ємах подачі мастил. Такі системи досить поширені і використовуються для подачі як мастильних речовин, так і змащувально-охолоджуючих рідин. Наприклад [58], відома насосна станція С48, яка складається з баку місткістю 10 л, шестеренного насоса, електродвигуна потужністю 120 Вт і забезпечує подачу від 0,5 до 3 л/хв при тиску до 0,63 МПа (рисунок 7.11).



- |                          |                            |                         |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1 – шестеренний насос;   | 5 – заливний фільтр;       | 9 – електродвигун;      |
| 2 - сітчастий стакан;    | 6 – повітряний фільтр;     | 10 – індикатор рівня;   |
| 3 – магнітний патрон;    | 7 – фільтр тонкої очистки; | 11 – зливна пробка;     |
| 4 – ємність для мастила; | 8 – запобіжний клапан;     | 12 – забірний патрубок. |

Рисунок 7.11 – Змащувальна станція С48

Для зменшення витрат мастил розроблено **системи змащування масляним туманом**. Такі системи переважно є циркуляційними, тобто конструктивно передбачають збирання мастила для повторного використання, тому що масляний туман забруднює атмосферу. Головною конструктивною особливістю таких систем є наявність джерела стисненого повітря та генератора масляного туману. Для утворення масляного туману використовують очищене стиснене повітря та мастила класу в'язкості до 460 мм<sup>2</sup>/с. При потребі забезпечують підігрівання мастила для забезпечення в'язкості близько 300 мм<sup>2</sup>/с. У більшості систем використовують генератори масляного туману на основі трубки Вентурі. Принцип роботи таких генераторів показано на рисунку 7.12. Утворений масляний туман з розмірами часток мастила від 0,5 до 2 мкм потоком повітря транспортується до точок змащування. Безпосередньо перед подачею у підшипник (вузол тертя), масляний туман проходить через насадку - трубку меншого діаметру певної довжини, яку ще називають голкою. Така насадка виконує функцію збільшення розмірів часток мастила, тому що частки мікронних розмірів мають погану адгезію до металевих поверхонь.

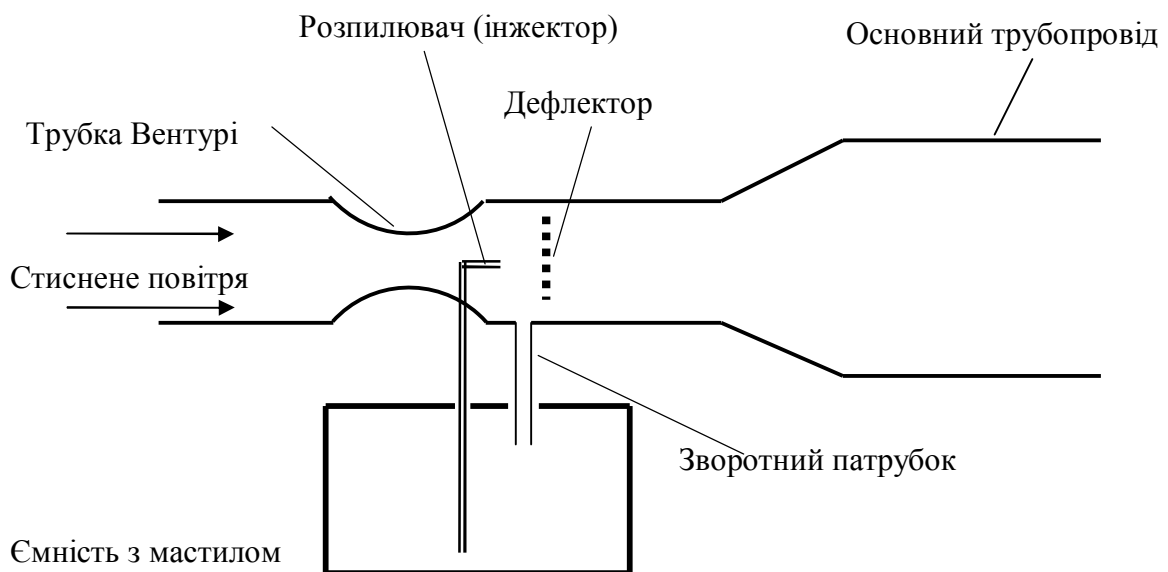
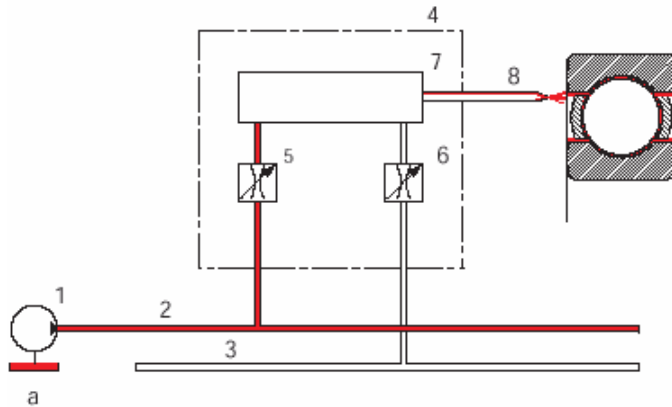


Рисунок 7.12 – Схема генератора масляного туману

Недоліки, притаманні системам змащування масляним туманом, такі як погана адгезія, забруднення повітря, складнощі з поверненням мастил для повторного використання та інші, обумовили розробку **систем змащування повітряно-масляними сумішами**. Головна перевага таких систем – формування не масляного туману, а суміші повітря з частками мастила значно більших розмірів, які мають значно кращі адгезійні властивості. Крім

того, такі системи можуть працювати з рідинними мастилами класу в'язкості до 1500 (до 1650 мм<sup>2</sup>/с). Приклад такої системи наведено на рисунку 7.13 та 7.14 [ 59 ].



1 – насос; 2 – трубопровід мастила; 3 – трубопровід повітря; 4 – блок керування; 5 – дросель мастила; 6 – дросель повітря; 7 – генератор суміші; 8 – голка.

Рисунок 7.13 – Система змащування повітряно-масляною сумішшю

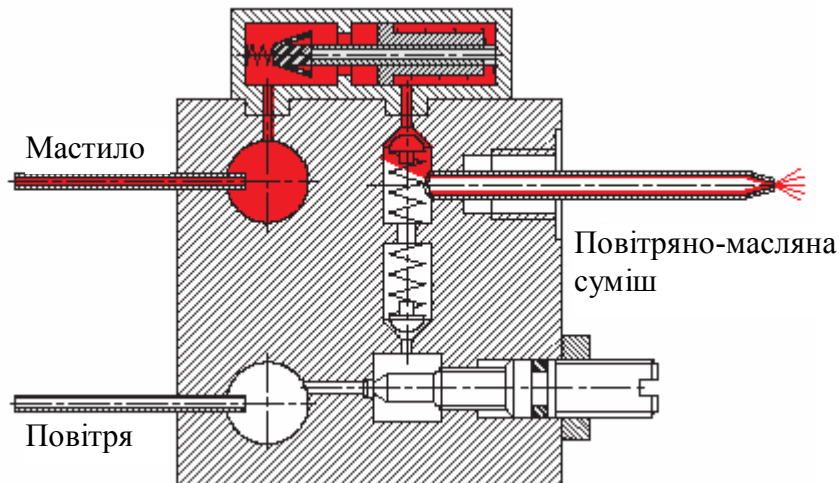


Рисунок 7.14 – Схема генератора повітряно-масляної суміші

Розпилювання використовують також і для густих (пластичних) мастил (рисунок 7.15, [59]). Такий спосіб подачі забезпечує суттєве зменшення витрат мастила та зменшення забруднення, але може використовуватись лише для проточних систем (циркуляція мастила виключається).

Для густих (пластичних) мастил розроблено **двомагістральні централізовані системи**, які також можуть використовуватись і для рідинних мастил. Такі системи забезпечують зменшення непродуктивних витрат мастил та їх забруднення.

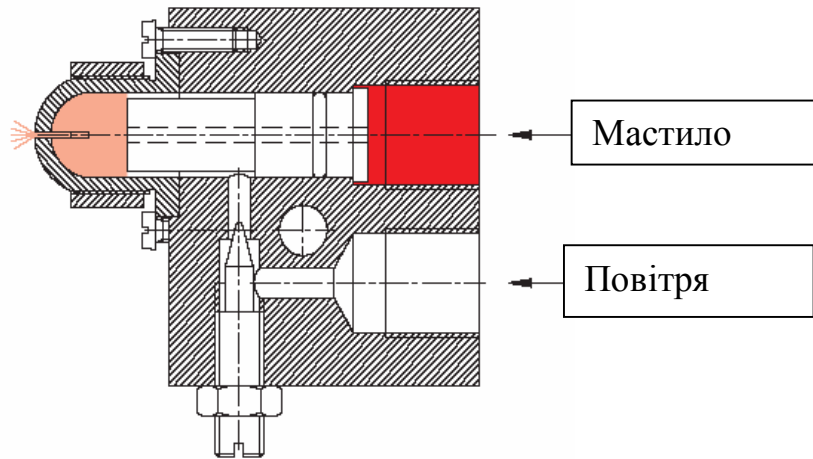


Рисунок 7.15 – Система змащування розпилюванням густих (пластичних або рідинних) мастил

Приклад такої системи та двомагістрального живильника наведено на рисунках 7.16 та 7.17. Блок керування з заданою періодичністю видає команду на включення двигуна 1, який через насос 2 забезпечує подачу мастила з ємності 3 до двомагістрального трубопроводу 5. В залежності від положення перемикача напрямку 4, мастило може надходити в прямому або зворотному напрямках. При подачі тиску в один із трубопроводів, живильник забезпечує подачу порції мастила до вузла тертя і перекриває подальшу подачу мастила. Зайве мастило повертається назад в ємність. Головна перевага таких систем у тому, що мастильні речовини не застоюються в трубопроводах, втрачаючи свої властивості, а постійно циркулюють, оновлюються, та витрачається лише потрібна кількість.

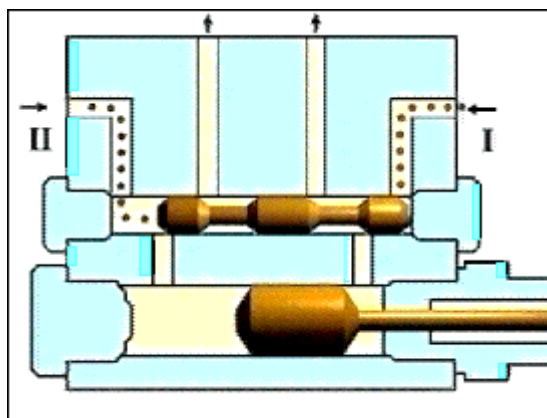
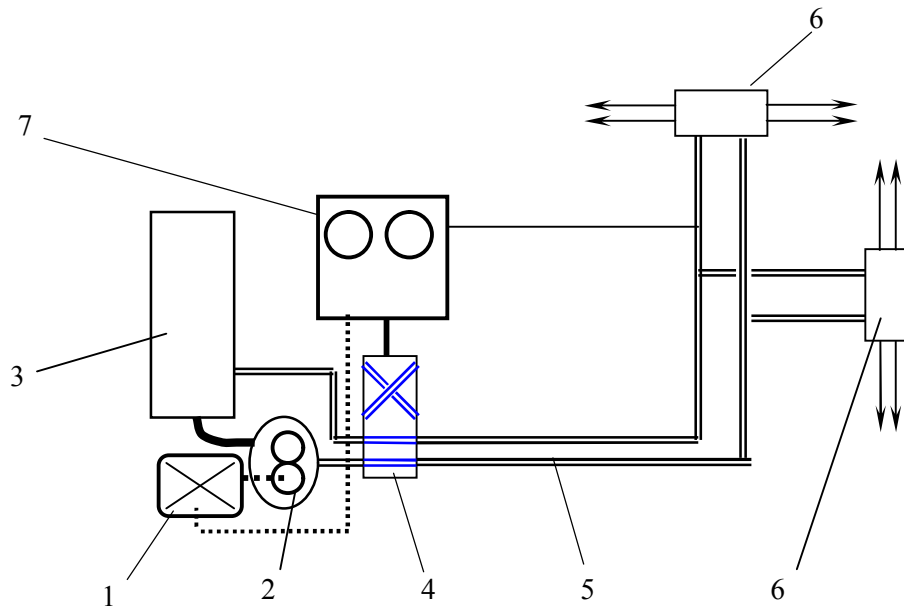


Рисунок 7.16 – Схема двомагістрального живильника з індикатором [61]



- |                         |                                  |
|-------------------------|----------------------------------|
| 1 - електричний двигун; | 5 – двомагістральний трубопровід |
| 2 - насос для мастила;  | 6 – блоки живильників;           |
| 3 – ємність з мастилом; | 7 – блок керування.              |
| 4 – перемикач напрямку; |                                  |

Рисунок 7.17 – Схема двомагістральної системи змащування

#### 7.4 Системи подачі технологічних мастил

Разом із системами змащування механічного обладнання на металургійних підприємствах широко використовуються системи подачі технологічних мастил. Такі мастила отримали назву "технологічних" тому, що їх використовують для забезпечення певних значень технологічних параметрів у виробничих процесах.

Зокрема, деякі процеси обробки металів тиском неможливо здійснити без застосування мастильних речовин. Наприклад, холодне прокатування листів, жерсті, фольги або фасоних профілів, волочіння, пресування, глибоке витягування (штампування). Для інших процесів використання мастил не є критично важливим, але дозволяє досягти певних техніко-економічних переваг. Так, застосування мастил при гарячому прокатуванні тонких листів дозволяє зменшити витрати електроенергії, зношення валків та поліпшити якість поверхні прокату.

Технологічні мастила виконують таку саму функцію, що й звичайні мастила при змащуванні вузлів тертя машин та механізмів, а саме – зменшення тертя та зношення. Відповідно механізми змащувальної дії і інші трибологічні процеси теж однакові. У більшості процесів обробки металів тиском з застосуванням мастил реалізується режим змішаного тертя. Для процесів гарячого прокатування характерно граничне тертя. При холодному

прокатуванні листів на сучасних високошвидкісних станах можливий перехід до гідродинамічного або пружно-гідродинамічного режиму змащування.

Головні відмінності у використанні технологічних мастил зводяться до значного різномайття речовин, які використовують для змащування, та незворотніх втрат цих речовин з обробленим металом. Крім традиційних мастил на основі мінеральних олій, використовуються речовини, які мають потрібні трибологічні характеристики при робочих параметрах відповідного процесу. Наприклад, при тонкому волочинні (діаметр менше 1,8 мм) застосовують водомасляні емульсії, а при грубосередньому волочинні – мило (жирні кислоти). При прокатуванні жерсті використовують мастила в чистому вигляді (низьков'язкі мінеральні олії, гас) або емульсії "індустріальних" мастил. При гарячому пресуванні сталі та сплавів використовують порошки скла, металургійні шлаки, кам'яне литво. При гарячому прокатуванні використовують емульсії або водо-масляні суміші. При штампуванні розпилюють пластичні мастильні речовини.

Відповідно конструктивні особливості кожної такої системи подачі технологічних мастил визначаються, перш за все, видом технологічного процесу та особливостями робочого інструменту. По-друге, системи проектують з урахуванням властивостей використовуваних мастильних речовин. Тому системи подачі технологічних мастил мають різноманітні конструктивні виконання.

Як приклад однієї з таких систем технологічного змащування, розглянемо систему змащування стану 2030 холодного прокатування смуг.

П'ятиклітьовий стан кварто має робочі валки діаметром 600 мм, опорні валки діаметром 1600 мм при довжині бочки 2030 мм. Сортамент стану включає смуги з вуглецевих сталей та автолист товщиною від 0,3 до 2 мм і шириною від 800 до 1800 мм. Стан оснащено циркуляційною системою подачі емульсії. Система включає два баки 1 для стабільної емульсії місткістю по 300 м<sup>3</sup>, два баки 2 по 150 м<sup>3</sup> та один бак 3 для миючої рідини на 150 м<sup>3</sup> (рисунок 7.18). Крім цього, система має бак на 60 м<sup>3</sup> для емульсолу, бак на 40 м<sup>3</sup> для технологічного мастила, бак на 50 м<sup>3</sup> для конденсату, та на 5 м<sup>3</sup> для інгібіторів. Подачу емульсії забезпечують сім насосів 4 з продуктивністю по 7400 л/хв. кожний. Емульсія проходить через фільтри 7 та охолоджувальні пристрої 9. Емульсія подається на валки через колектори, як це показано на рисунку 7.19. При цьому, для регулювання теплового профілю валків колектори клітей № 1 та 2 розділено на три автономні зони подачі, колектори клітей №3 та 4 - на 5 зон, а чистової кліті №5 – на 9 зон. Відпрацьована емульсія потрапляє у збірні камери 10 і за допомогою п'яти насосів 6 продуктивністю по 8140 л/хв., повертається в ємності 1 – 3. Для видалення механічних забруднень емульсія постійно прокачується насосами 6 через магнітні фільтри 8, що забезпечує підтримання рівня механічних забруднень емульсії не більше 0,05% .



Система подачі емульсії оснащено засобами автоматики, що дозволяє здійснювати роботу по одній з 10 програм. Концентрація мастильних речовин в емульсії може підтримуватись на рівні від 2 до 10 %. Емульсія подається на валки під тиском до 1,2 МПа. Колектори забезпечують витрату емульсії до 7724 л/хв на кожну з клітей № 1 - №4, а для кліти № 5 – 6451 л/хв. Тобто кратність загальної місткості резервуарів до продуктивності насосів становить приблизно 35.

### 7.5 Запитання для самоконтролю

7.5.1 Які критерії класифікації використовують для пристроїв та систем змащування?

7.5.2 Чим відрізняються індивідуальні пристрої для змащування та системи змащування?

7.5.3 Чим відрізняються системи змащування масляним туманом та повітряномасляними сумішами?

7.5.4 Які переваги забезпечують двомагістральні системи змащування?

7.5.5 Які особливості мають системи подачі технологічних мастил?

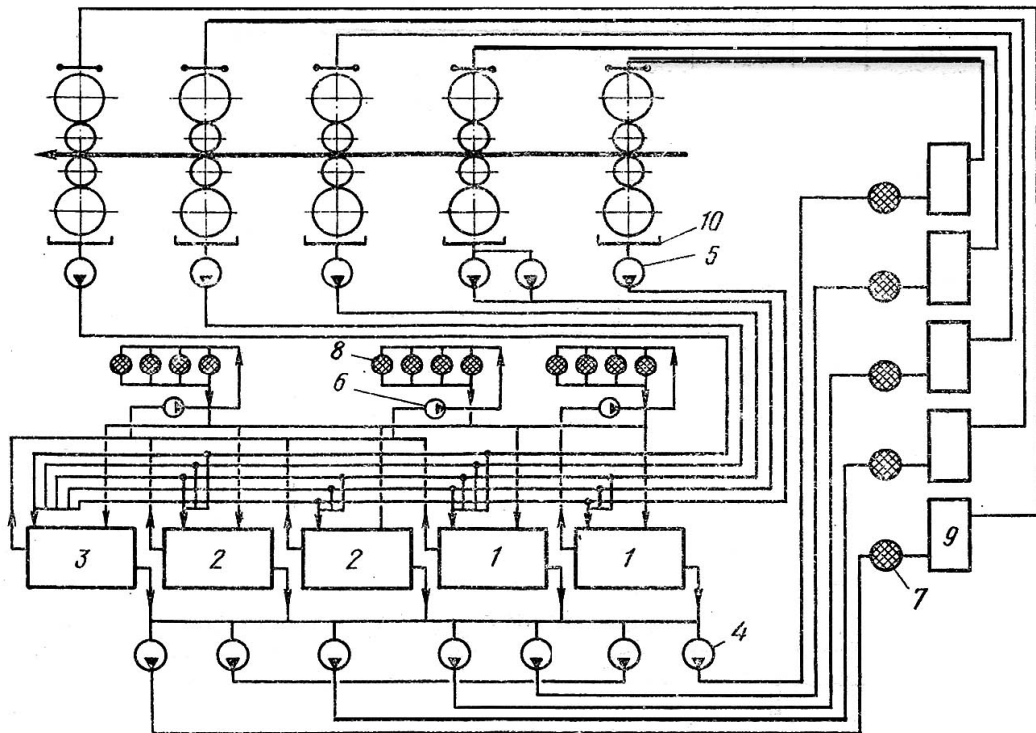


Рисунок 7.18 – Система подачі емульсії стану 2030

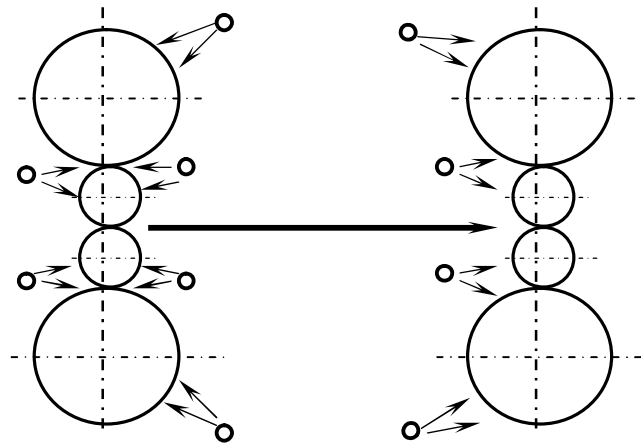


Рисунок 7.19 – Схема подачі емульсії для клітей № 1 – 4 та емульсії і миючого розчину в кліті № 5

## 8 ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО УСТАТКУВАННЯ

### 8.1 Види та способи відновлення

Зношення та дефекти порушують нормальну роботу машин та механізмів. Подальша експлуатація таких машин без ремонту стає неможливою. Відновлення деталей має на меті повернути їм необхідні розміри та забезпечити початкову або навіть підвищену працездатність. При відновленні широко використовують наплавлення, металізацію напиленням, хромування, залізнення, електроіскрове нанесення металу, деформування деталей тощо.

При виборі способу відновлення слід враховувати особливості способів та застосовність їх до відновлення тих чи інших деталей. Важливо також відновити деталь, щоб її міцність та зносостійкість по можливості не були знижені у порівнянні з невідновленою деталлю.

У виробничих умовах розроблені та реалізовані десятки різних способів відновлення деталей. Вибір найбільш прийняттого способу складається у технічному, економічному та організаційному аналізах вимог до відновлених деталей з урахуванням умов роботи їх у сполученнях, виробничої програми, оснащеності підприємств, забезпеченості матеріалами, енергією, робочою силою тощо. Технічні можливості різних способів відновлення та рекомендована область їх застосування наведені у таблиці 8.1 [62].

**Таблиця 8.1 - Способи відновлення деталей**

Спосіб відновлення	Область застосування
1	2
<b><i>Зварювання:</i></b>	
ручне дугове	Заварка тріщин, обломів, приварювання накладок, вставок, заплат, наплавлення зносостійких матеріалів
автоматичне та механізоване дугове	Заварка тріщин, обломів, приварювання накладок, вставок, заплат, наплавлення зносостійких матеріалів
аргонодугове	Зварювання та наплавлення алюмінію та корозійностійкої сталі
газове	Зварювання тріщин, приварювання обломів, зварювання тонколистового матеріалу
контактне	Зварювання тонколистового матеріалу
тертям	Стикове зварювання деталей та їх елементів різної конфігурації при підвищених вимогах до якості зварного з'єднання
термітне	Зварювання великогабаритних та масивних деталей
електрошлакове	Приварювання обломів, зварювання великогабаритних деталей
1	2

електронно-променево	Зварювання відповідальних деталей з високою точністю
ультразвукове	Зварювання кольорових металів, сталі, негабаритних деталей
високочастотне	Зварювання корозійностійкої сталі
магнітно-імпульсне	Зварювання різнорідних матеріалів
вибухом	Зварювання різнорідних матеріалів
тиском	Зварювання деталей та їх елементів, різних за конфігурацією
дифузійне у вакуумі	Зварювання дрібних відповідальних деталей з високою точністю
ковальське	Зварювання невідповідальних деталей з невисокою точністю при підвищених вимогах до міцності зварного з'єднання
<b>Наплавлення:</b>	
дугове під флюсом	Наплавлення деталей діаметром понад 50 мм при підвищених вимогах до якості наплавленого матеріалу з товщиною наплавленого шару понад 1 мм
дугове у вуглекислому газі	Наплавлення сталевих деталей діаметром понад 16 мм широкою номенклатури, що працюють у різних умовах
дугове з газополуменевим захистом	Наплавлення сталевих та чавунних деталей, що працюють у різних умовах
вібродугове	Наплавлення сталевих деталей, що працюють у різних умовах при невисоких вимогах до опору втомленості
дугове порошковим дротом або стрічкою	Наплавлення зносостійких шарів на деталях, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування, ударних навантажень, у вузлах тертя
дугове в аргоні	Наплавлення алюмінієвих деталей і деталей з корозійностійкої сталі
контактне	Наплавлення гладких циліндричних зовнішніх та внутрішніх поверхонь із зношенням не більше 1 мм
газове	Наплавлення циліндричних та профільних поверхонь з місцевим зношенням при підвищених вимогах до зносостійкості
плазмове	Наплавлення відповідальних деталей при підвищених вимогах до зносостійкості та опору втомленості
багатоелектродне під флюсом	Наплавлення деталей із значним зносом за величиною та площею
лежачим електродом	Наплавлення плоских поверхонь та поверхонь складної конфігурації із значним зносом
електроімпульсне	Наплавлення зовнішніх циліндричних поверхонь із зносом до 0,5 мм з обмеженням температури нагрівання деталі
електроіскрове	Нарощування та зміцнення поверхонь із зносом до 0,02 мм при невисоких вимогах до суцільності покриття
електрошлакове	Наплавлення деталей із значними зносами, що перевищують 6 мм по товщині
1	2

рідким металом	Наплавлення деталей із значними зносами (не менше 3 мм) при підвищених вимогах до зносостійкості та знижених вимогах до ударних навантажень
з одночасним деформуванням	Наплавлення деталей переважно із зовнішнім шліцьовим профілем
з одночасним різанням	Наплавлення та обробка зносостійких матеріалів у нагрітому стані, обробка яких у холодному стані ускладнена
лазерне	Наплавлення зносостійких матеріалів на відповідальні деталі та деталі із складним профілем
високочастотне	Наплавлення зносостійких матеріалів на робочі органи та леза
високочастотне у вогнетривкому середовищі	Наплавлення проушин та цівок ланцюгів гусениць
<b><i>Нанесення газотермічних покриттів:</i></b>	
полуменеве порошковими матеріалами без оплавлення	Зовнішні та внутрішні циліндричні поверхні нерухомих сполук при невисоких вимогах до міцності зчеплення з основним матеріалом
полуменеве порошковими матеріалами з оплавленням	Зовнішні та внутрішні циліндричні та профільні поверхні при підвищених вимогах до зносостійкості та міцності зчеплення з основним матеріалом
плазмове порошкових матеріалів	Зовнішні та внутрішні циліндричні поверхні
плазмове дротом суцільного перерізу	Те саме
іонно-плазмове	Нанесення зносостійких та захисних покриттів з особливими властивостями товщиною до 0,02 мм
детонаційне	Нанесення зносостійких покриттів з особливими властивостями
дугове	Зовнішні та внутрішні циліндричні поверхні з невисокими вимогами до міцності зчеплення
високочастотне	Те саме
<b><i>Холодне пластичне деформування:</i></b>	
роздача	Відновлення зовнішніх поверхонь порожнистих деталей з нежорсткими вимогами до внутрішнього розміру
роздача з одночасним розтягуванням	Відновлення спеціальним деформувальним інструментом зовнішніх поверхонь та довжини порожнистих деталей з нежорсткими вимогами до внутрішнього розміру
витягування	Відновлення довжини деталей з нежорсткими вимогами до зовнішніх розмірів
розкочування	Закріплення додаткових ремонтних деталей в отворах (наприклад, згорнутих кілець), зміцнення
дорнування та калібрування	Відновлення поверхонь отворів після осадження або термічного впливу. Зміцнення та вигладжування
протягування	Те саме
осадження	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей при нежорстких вимогах до довжини
1	2

правка	Відновлення форми
накочування	Відновлення поверхні невідповідальних деталей, відновлення рифленої та шліцьової поверхонь
обтискання	Відновлення внутрішніх поверхонь деталей при нежорстких вимогах до зовнішніх
чеканка	Відновлення форми деталей, зміцнення зварних швів
<b>Гаряче пластичне деформування:</b>	
тиснення у закритому штампі	Відновлення форми та елементів деталей за рахунок перерозподілу металу з неробочих поверхонь на робочі для компенсації зносу
гідротермічне роздавання	Відновлення зовнішніх поверхонь порожнистих деталей з нежорсткими вимогами до внутрішнього розміру
термоциклювання	Відновлення, переважно внутрішніх поверхонь порожнистих деталей
термопластичне обтискання	Відновлення внутрішніх поверхонь порожнистих деталей
накочування	Відновлення зубчастих профілів шестерень та зірочок
ротаційне деформування	Відновлення зубчастих та шліцьових поверхонь
обтискання	Відновлення внутрішніх розмірів деталей при нежорстких вимогах до зовнішніх
правка	Відновлення форми
витягування	Відновлення довжини деталей з нежорсткими вимогами до зовнішніх розмірів
осадження	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей при нежорстких вимогах до довжини
роздача	Відновлення зовнішніх поверхонь порожнистих деталей з нежорсткими вимогами до внутрішнього розміру
видавлювання	Місцеве деформування з метою відновлення профілю та розмірів робочих поверхонь
відтяжка	Відновлення форми робочих поверхонь та різальних кромок робочих органів
термомеханічна обробка	Відновлення фізико-механічних характеристик. Зміцнення
<b>Гальванічні процеси:</b>	
залізнення: на постійному та асиметричному струмові, у спокійному та проточному електролітах; позаванне	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей переважно із зносом до 0,2 – 0,5 мм, високою поверхневою твердістю та при нежорстких вимогах до міцності зчеплення покриття з основним металом
хромування: при постійному струмі, у спокійному або проточному електроліті; розмірне	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей із зносом до 0,2 мм та високими вимогами по зносостійкості відновлених поверхонь
хімічне та електролітичне нікелювання	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей із зносом до 0,05 мм
цинкування	Захисне покриття від корозії
міднення	Відновлення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей, виготовлених з міді та її сплавів
1	2

електролітичне натирання цинком та залізоцинковими сплавами	Відновлення зовнішніх та внутрішніх циліндричних поверхонь деталей при нежорстких вимогах до твердості поверхневого шару
нанесення гальвано-полімерних покриттів	Відновлення зовнішніх та внутрішніх циліндричних поверхонь деталей
кадмування	Захисні антикорозійні покриття
<b><i>Нанесення полімерних матеріалів:</i></b>	
напиленням: газоплуменевим, у електростатичному полі, у псевдозрідженому шарі, доцентровим намазуванням (шпателем, щіткою, валиком)	Відновлення форми поверхонь облицювок та оперення, відновлення антифрикційних, електроізоляційних та декоративних покриттів. Відновлення посадкових поверхонь нерухомих сполук, зароблювання тріщин, пробоїн
литвом: під тиском, опресовкою	Відновлення антифрикційних, електроізоляційних та декоративних покриттів, виготовлення деталей
намазуванням рідких прокладок, герметиків	Відновлення герметичності з'єднань
<b><i>Застосування ремонтних розмірів:</i></b>	
індивідуальних	Відновлення форми та посадок поверхонь обробкою більш дорогої деталі до зникнення слідів зносу та виготовленням, підгонкою менш дефіцитної та дорогої деталі за розмірами основної із забезпеченням заданої посадки
категорійних	Обробка деталі під заданий ремонтний розмір сполученої деталі з ремонтними стандартними розмірами
<b><i>Застосування додаткових деталей:</i></b>	
обрізання та приварювання елементів, що швидко зношуються	Відновлення робочих органів машин
бандажування	Відновлення зовнішніх поверхонь деталей із попередньою механічною обробкою та без неї
приварювання елементів та вкладишів	Відновлення розмірів профільних поверхонь
поставлення втулок та компенсаційних шайб	Відновлення отворів, розмірних кіл
поставлення звертуваних кілець із закріплювальним розкочуванням	Відновлення отворів
постановляння різьбових спіральних вставок	Відновлення різьбових з'єднань
постановляння фігурних вставок, стяжок та галенів	Усунення тріщин, відновлення герметичності
приварювання та приклеювання накладок, латок, у т.ч. клейозварним способом	Усунення тріщин, пробоїн, відновлення герметичності

1	2
<b>Проведення хіміко-термічних процесів:</b>	
цементація та нітроцементація	Поверхнєве зміцнення
повторне азотування	Відновлення поверхонь деталей із зносом до 0,02 мм, поверхнєве зміцнення
дифузійне хромування у вакуумі та парогазове	Відновлення деталей із зносом до 0,05 мм, поверхнєве зміцнення
сульфохромування	Відновлення поверхонь деталей із зносом до 0,01 мм, поверхнєве зміцнення
дифузійне цинкування	Відновлення деталей із мідних сплавів із зносом до 0,8 мм
дифузійне борування	Поверхнєве зміцнення
<b>Електромеханічна обробка:</b>	
висаджування та вигладжування	Відновлення поверхонь нерухомих сполук із зносом до 0,2 мм
<b>Електрофізична обробка:</b>	
електроконтактна підводна, електроабразивна, анодно-механічна, електроерозійна	Обробка наплавлених поверхонь з високою твердістю, видалення залишків обламаних інструментів
<b>Електрохімічна обробка:</b>	
абразивним або металевим інструментом з примусовою подачею електроліту	Обробка наплавлених поверхонь з високою твердістю
<b>Паяння:</b>	
легко – та тугоплавкими припоями, пайко-зварювання	Відновлення герметичності з'єднань та трубопроводів, відновлення інструмента
<b>Термічна обробка:</b>	
відпуск, нормалізація, відпал, гартування, покращення	Відновлення фізико-механічних характеристик та структури матеріалу, зміцнення

Аналіз показує, що металургія – це та галузь промисловості, в якій найширше використовують наплавлення. Велику роль при виборі способу відновлення деталей, як уже зазначалось, відіграє економіка. Якщо середню вартість ручного дугового наплавлення прийняти за 100%, то автоматичне наплавлення під флюсом складає 74%, автоматичне вібродугове наплавлення 82%, металізація напиленням 80%, хромування 148% [63]. Середня вартість відновлення ручним дуговим наплавленням складає 25...35% від вартості виготовлення нових деталей.

До основних способів електродугового механізованого наплавлення відносяться наступні:

- автоматичне під флюсом (одно-, дво- та багатоелектродне суцільним або порошковим дротом, електродною стрічкою);



- автоматичне (одно-, дво- та багатоелектродне) та механізоване самозахисним порошковим дротом;
- автоматичне самозахисною порошковою стрічкою (одним або двома електродами);
- автоматичне та механізоване у захисних газах.

Найбільш широко у металургійній промисловості використовують автоматичне наплавлення під флюсом одним дротом (суцільним, порошковим) або стрічкою (холоднокатаною, порошковою, спеченою). Це достатньо універсальний спосіб, що забезпечує хороше формування та високу якість наплавленого металу. Легування наплавленого металу при цьому способі відновлення відбувається, як правило, через електродний матеріал, легувальні флюси використовуються рідко.

Значне поширення отримало дугове наплавлення самозахисними порошковими дротами та стрічками. Стабілізація дуги, легування та захист розплавленого металу від азоту та кисню повітря забезпечується за рахунок компонентів осердя електродного матеріалу. Наплавлення самозахисним дротом вимагає суворого додержання рекомендованих для даного дроту режимів, особливо напруги на дузі. При підвищенні напруги погіршується захист наплавленого металу від навколишньої атмосфери, метал насичується азотом, в результаті утворюються пори. Кожній марці дроту відповідає певний діапазон напруг, при якому пори не утворюються.

Дугове наплавлення у середовищі захисних газів у металургії застосовують достатньо рідко. В якості захисних газів використовують двоокис вуглецю, аргон, гелій або їх суміші, до яких можуть додавати також кисень.

Багатодугове або багатоелектродне наплавлення застосовують з метою підвищення продуктивності праці.

До числа спільних переваг механізованих способів електродугового наплавлення можна віднести універсальність, високу продуктивність, можливість одержання наплавленого металу практично будь-якої системи легування. Велике проплавлення основного металу, особливо при наплавленні дротами, є головним недоліком дугових методів наплавлення. З цієї причини необхідний склад наплавленого металу вдається одержати лише у 3 – 5-му шарі. Частка основного металу в наплавленому шарі залежить від способу та режиму наплавлення (див. таблицю 8.2, [64]).

Таблиця 8.2 - Порівняльні характеристики деяких способів наплавлення

Спосіб	Продуктивність, кг/год	Доля основного металу в наплавленому, %	Товщина наплавленого шару, мм (один прохід)
Газове з присадкою дротиків або дроту	0,5 – 1,5	1 – 3	0,8 – 5,0
Газопорошкове	0,5 – 3,0	1 – 3	0,3 – 3,0
Аргонодугове неплавким електродом	1,0 – 7,0	10 – 30	2,5 – 5,0
Плавким електродом у захисному газі	1,5 – 9,0	30 – 60	3,0 – 5,0
Ручне дугове покритими електродами	0,8 – 3,0	20 – 50	2,0 – 5,0
Під флюсом одним дротом	2,0 – 12,0	30 – 60	3,0 – 5,0
Під флюсом багатоелектродне	5,0 – 40,0	15 – 30	5,0 – 8,0
Під флюсом стрічкою	5,0 – 40,0	10 – 20	2,5 – 5,0
Дугове самозахисним дротом	2,0 – 9,0	25 – 50	2,5 – 5,0
Дугове самозахисною стрічкою	10,0 – 20,0	15 – 40	2,5 – 5,0
Електрошлакове двома електродними стрічками	10,0 – 60,0	5 – 15	1,5 – 50,0
Електрошлакове електродними дротами	20,0 – 60,0	10 – 20	6,0 – 50,0
Електрошлакове зернистими присадним матеріалом	20,0 – 200,0	5 – 10	15,0 – 50,0
Плазмово-порошкове	0,8 – 6,0	5 – 15	0,3 – 6,0
Індукційне	2,0 – 15,0	5 – 15	0,4 – 3,0

## 8.2. Технологія наплавлення

### 8.2.1. Легування наплавленого металу

Уведення до металу добавок різних елементів для покращення або надання йому особливих механічних або фізико-хімічних властивостей (жаростійкість, кислототривкість, зносостійкість тощо) називають легуванням. У якості легуючих добавок використовують вуглець, хром, марганець, кремній, нікель. Молібден, вольфрам, ванадій та інші елементи. Найчастіше легують одночасно декількома елементами.

Уведення до складу наплавленого металу легуючих добавок виконують чотирма способами. При *першому* способі застосовують легований електродний дріт або стрічку з використанням у якості захисту звичайних флюсів або інертних газів. *Другий* спосіб характеризується введенням легуючих добавок через порошкові дроти або стрічки. При *третьому* способі використовують легуючі флюси у поєднанні з низьковуглецевими електродними дротами або стрічками. При четвертому способі на наплавлювальну поверхню виробу наносять легуючі добавки – порошки, пасти та т. ін., потім наплавлення виконують електродними дротами, досягаючи повного розплавлення легувальних матеріалів.

Надійність способу легування визначається діапазоном режимів, при яких склад наплавленого металу виходить у межах припустимих відхилень. Перший та другий способи легування забезпечують припустимі відхилення у складі наплавленого металу при значних коливаннях сили струму та напруги на дузі. Третій спосіб забезпечує припустимі відхилення у складі наплавленого металу лише при додержанні вузького діапазону режиму наплавлення. При четвертому способі легування заданий склад наплавленого металу виходить у дуже вузькому діапазоні режиму.

При ручному дуговому напавленні легуючі елементи вводять до електродного стержня, покриття електрода або до стержня та покриття одночасно. Легування при дуговому напавленні під флюсом виконують застосуванням легованих дротів або стрічок, введенням легувальних елементів через порошкові дроти, стрічки або флюси (керамічні) у поєднанні з низьковуглецевими дротами, стрічками та проведенням напавлення по нерухомій присадці. При електрошлаковому напавленні легування виконують електродними дротами, стрічками або зернистим присадним металом. При плазмовому напавлення легування виконують вдуванням порошоків до плазми або струмоведучими та присадними дротами чи напавленням по нерухомій присадці. Ці ж способи легування застосовують при індукційному та газовому напавленні.

Важливим результатом легування повинно бути рівномірне розподілення легуючих елементів у наплавленому металі, що забезпечує однорідність його хімічного складу. Найбільш однорідний хімічний склад металу отримують при напавленні легованими електродними дротами або стрічками, найменш – при напавленні по шару гранульованих порошоків.

Спосіб легування обирають у залежності від способу наплавлення та вимог до однорідності наплавленого металу.

### 8.2.2. Техніка наплавлення

Техніка наплавлення повинна забезпечувати хороше формування наплавленого металу, відсутність у ньому дефектів, мінімальне проплавлення основного металу та максимально можливу продуктивність процесу.

Кожен вид наплавлення має свої основні параметри режиму, що впливають на продуктивність та якість процесу. Для дугового наплавлення основними параметрами є сила струму, напруга та швидкість переміщення дуги, виліт та число електродів, крок наплавлення, а також зміщення електрода з zenіту при наплавленні тіл обертання.

Наплавлення звичайно ведуть на постійному стумі, який забезпечує високу стабільність процесу. Струм дуги при наплавленні залежить від швидкості подавання електродного дроту. Зі збільшенням швидкості подавання зростає сила струму, а, отже, і продуктивність наплавлення. Проте, зі збільшенням струму дуги збільшується глибина проплавлення і доля основного металу в наплавленому. Крім того, утворюються вузькі та високі валики, погіршується формування наплавленого металу. Тому струм дуги обмежується умовами якості наплавлення. Напруга на дузі визначає форму наплавленого валика. Підвищення напруги на дузі збільшує ширину і зменшує висоту валика, при цьому зростає довжина дуги й окислюваність легуючих добавок, особливо вуглецю. У зв'язку з цим намагаються напругу зменшувати, погоджуючи її зі струмом дуги. За дуже малої напруги отримують вузький і високий валик з поганим формуванням. Збільшення напруги та зменшення струму дуги підсилює взаємодію шлаку та металу, підвищує окислюваність вуглецю, хрому, титану та ін. Звичайно наплавлення ведуть при напрузі 28...32 В та силі струму 300...450 А для електродного дроту діаметром 3 – 4 мм.

Швидкість переміщення дуги, що впливає на форму наплавленого валика та його формування, обирають у межах 20 – 40 м/год. Виліт електроду – ділянку, обмежену нижньою контактною точкою мундштука та дугою, – приймають 30...40 мм у залежності від діаметру та матеріалу електрода. Число електродів впливає на продуктивність процесу та форму ванни. При наплавленні одним та двома електродами використовують зворотну полярність (плюс на електроді), яка забезпечує оптимальне формування наплавленого металу. Наплавлення трьома та більше електродами з метою підвищення швидкості їх плавлення виконують на прямій полярності. Зі збільшенням числа електродів, що подаються у загальну ванну, зростає ширина валика і зменшується глибина проплавлення.

При наплавленні стрічкою також досягається мала глибина проплавлення, а доля основного металу в наплавленому першому шарі може бути зниженою до 20%. Для зниження долі основного металу в наплавленому

зменшують крок наплавлення. Найбільш якісне наплавлення досягається при крокові 0,4...0,75 ширини наплавленого валика. Зміщення електрода з zenіту при наплавленні тіл обертання також впливає на формування наплавленого шару. Зміщують електрод з zenіту у бік, протилежний напрямку обертання виробу. Величина зміщення повинна бути такою, щоб тиск дуги та гідростатичний тиск рідкої ванни були врівноваженими. Величину зміщення з zenіту звичайно обирають рівною довжині зварювальної ванни.

При плазмовому наплавленні забезпечується можливість широкого регулювання долі основного металу за рахунок зміни струму плазмового струменя.

При наплавленні газовим полум'ям нагрівання та плавлення металу відбуваються значно повільніше, ніж при дуговому процесі, тому що тепловий потік, який створюється ацетиленокисневим полум'ям, у 8...12 разів менше теплового потоку від відкритої зварювальної дуги [65]. Ефективна теплова потужність полум'я – кількість теплоти, що введена у метал за одиницю часу і затрачена на його нагрівання, – залежить від витрати газу, співвідношення кисню та горючого газу у полум'ї, від кута нахилу осі полум'я до поверхні металу, швидкості наплавлення, маси виробу та його теплофізичних властивостей. Зі збільшенням витрати газу ефективна теплова потужність полум'я зростає. Витрату газу змінюють шляхом використання наконечників з різним діаметром сопла мундштука.

При електрошлаковому наплавленні глибину проплавлення основного металу зменшують за рахунок зниження напруги, збільшення швидкості наплавлення, підвищення електропровідності флюсу, збільшення сили струму та глибини шлакової ванни.

При індукційному наплавленні глибина проплавлення основного металу зменшується зі збільшенням частоти струму в індукторі.

Техніка наплавлення передбачає різні прийоми проведення робіт при наплавленні тіл обертання, плоских поверхонь та деталей складної форми. Мета їх одна – одержання якісного наплавленого шару заданих властивостей та мінімальна деформація виробу.

Автоматичне наплавлення тіл обертання звичайно виконують або за гвинтовою лінією, або за кільцевою схемою з переміщенням електрода після замикання кільцевого валика на крок наплавлення. Таке наплавлення характеризується неперервністю процесу та симетричністю по відношенню до осі виробу зварювальних напружень, у результаті чого деформації або відсутні, або досить незначні.

При наплавленні плоских деталей у зв'язку з несиметричністю зварювальних напружень виникають деформації. Для їх зменшення застосовують способи наплавлення з мінімальною погонною енергією, що забезпечують незначну глибину проплавлення основного металу (зокрема, електродною стрічкою). У деяких випадках виріб після наплавлення рихтують.

Вироби складної форми наплавляють з мінімальною погонною енергією способами, при яких не ускладнюється візуальний контроль наплавлюваної поверхні. Деталі складної форми часто наплавляють напівавтоматами у середовищі захисних газів, використовують плазмове, газопорошкове наплавлення. Для невеликих виробів застосовують газопорошкове наплавлення або газополуменеве напилення з наступним оплавленням.

### 8.2.3. Вибір хімічного складу наплавленого металу

Для відновлення та зміцнення деталей застосовуються різноманітні наплавні матеріали, які здатні чинити опір різним видам зношення. З метою полегшення їх вибору наплавні матеріали класифікують за видом та загальною кількістю легуючих добавок.

*Низьковуглецеві низьколеговані сталі* використовують для відновлювального наплавлення різних роликів, коліс електромостових кранів, посадкових місць під підшипники, осей, валів та багатьох інших деталей, а також для створення підшару при напавленні зносостійкими сплавами. Хімічний склад (у відсотках) наплавленого металу та його твердість після напавлення наведено у таблиці 8.3 [65].

Таблиця 8.3

№ з/ч	Тип металу	C	Si	Mn	Cr	Твердість після напавлення, HB
1	10Г2	0,10	–	2,0	–	230–260
2	11Г3	0,11	–	3,0	–	280–310
3	12Г4	0,12	–	4,0	–	320–360
4	15Г2ХС	0,15	1,2	1,7	0,7	220–270
5	30Х4Г	0,30	0,5	1,4	4,0	350–450

Напавлення сталей цієї групи виконують ручним, механізованим, автоматичним під флюсом та у захисних газах способами. Метали № 1,2 та 3 наплавляють вручну електродами марок ОЗН-250У, ОЗН-300У та ОЗН-350У відповідно, автоматично стандартними зварювальними дротами марок Св-08ГА та Св-10Г2 під флюсом. Метали №4 та 5 наносять автоматично під флюсом дротами марок Нп-30ГСА, Нп-30Х5 відповідно або зварювальним дротом Св-08А під керамічним флюсом АНК-18 з попереднім підігрівом до 200...300°C з наступним повільним охолодженням. При напавленні масивних деталей, незалежно від хімічного складу наплавлювального металу, потрібен попередній підігрів до зазначених температур. При напавленні деталей з підвищеним вмістом вуглецю (понад 0,4%) та сірки (понад 0,03%) для запобігання кристалізаційних тріщин процес необхідно вести з мінімальним пропавленням основного металу для зменшення його долі у напавленому. Оптимальну структуру та твердість напавленого металу цієї групи одержують при попередньому підігріві деталі до 200...250°C.

*Високомарганцеві аустенітні сталі*, що містять до 13%Mn, мають високу стійкість проти ударів та здатністю наклепуватися, в результаті чого твердість їх поверхні зростає до *HB* 450...500, при цьому серцевина залишається в'язкою. Цими сталями наплавляють деталі дробильно-розмольного устаткування, залізничні хрестовини та інші вироби, що працюють в умовах абразивного зносу з ударними навантаженнями. Хімічний склад (у відсотках) наплавленого металу та твердість наведені у таблиці 8.4.

Таблиця 8.4

№ з/ч	Тип металу	C	Si	Mn	Cr	Ni	Твердість <i>HB</i>	
							після наплавлення	після наклепу
6	Г13	1,0	0,6	13,0	–	–	220–280	450–500
7	Г13Н4	0,8	0,5	13,0	–	4,0	170–230	400–450
8	Г13Х25Н3	0,8	0,4	14,0	25	3,0	220–320	–

Метал №6 наплавляють під флюсом електродним дротом Нп—Г13А, №7 – самозахисним порошковим дротом ПП-АН105, №8 – вручну електродами ЦНІІН-4. Щоб реалізувати унікальні властивості сталей цієї групи – пластичність серцевини та високу твердість на робочій поверхні – необхідні отримання аустенітної структури та наступна дія на робочу поверхню ударів та тиску, що спричиняють пластичне деформування. У протилежному разі наплавлений метал не буде мати переваг перед низьковуглецевими сталями. Наплавлення високомарганцевих аустенітних сталей повинне супроводжуватися достатньо високою швидкістю охолодження в інтервалі температур 800...500°C з метою фіксації аустенітної структури. Повільне охолодження наплавленого металу призводить до розпаду аустеніту та виділення карбідів по границях зерен. При цьому наплавлений метал виходить крихким та схильним до утворення тріщин. У зв'язку з розпадом аустеніту при нагріванні сталі цієї групи не призначені для роботи при високих температурах.

*Хромисті сталі*, що мають високу стійкість проти корозії та міцність при підвищених температурах, застосовуються для наплавлення ущільнюючих поверхонь засувок для пару та води, плунжерів гідропресів та інших деталей. У таблиці 8.5 наведено середній хімічний склад (у відсотках) наплавленого металу та твердість після наплавлення.

Таблиця 8.5

№ з/ч	Тип металу	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Ti
9	1X13	0,10	1,0	0,4	13,0	–	–	–	–
10	3X13	0,25	0,4	0,4	13,0	–	–	–	–
11	1X17Т	0,12	0,4	0,4	17,0	–	–	–	0,2
12	120X12М	1,20	0,3	0,3	12,0	0,7	–	–	–
13	200X12ВФ	2,00	0,3	0,4	12,5	–	1,2	0,2	–

Метал №9 наплавляють самозахисним порошковим дротом ПП-АН106, №10 – стандартними наплавними дротами Нп-30X13 та Нп-40X13, №11 – зварювальним дротом Св-10X17Т. Метали №12 та 13 наплавляють порошковими дротами ПП-АН103 та ПП-АН104. Для попередження утворення пор наплавлення хромистих сталей виконують на найкоротшій дузі при напрузі 24...26 В. Наплавлений метал схильний до утворення тріщин, тому наплавлення ведуть з попереднім та супутнім підігрівом деталі до 150...250°C. Особливі складнощі виникають при наплавленні металів №12 та 13 через підвищену схильність до утворення гарячих та холодних тріщин. Виникнення холодних тріщин вдається попередити попереднім підігрівом деталі до 500°C з наступним уповільненим охолодженням. Кристалізаційні тріщини найчастіше виникають при наплавленні на низьковуглецеву сталь у результаті дифузії вуглецю з наплавленого металу в основний. Для попередження тріщин наплавлення необхідно вести з мінімальною глибиною проплавлення основного металу. Що краще всього досягається при індукційному наплавленні з рідким присадним металом.

*Хромовольфрамкові та хромомолібденові сталі, що мають високу стійкість до термічної втомленості та зношенню, використовуються для наплавлення валків гарячої прокатки, штампів гарячого штампування та ін. деталей. Середній хімічний склад (у відсотках) наплавленого металу та твердість наведено в таблиці 8.6.*



Таблиця 8.6

№ з/ч	Тип металу	С	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Твердість HRC при температурі, °С	
									20	600
14	25X5ФМС	0,25	1,1	0,6	5,2	–	1,2	0,4	40–46	26–30
15	3X2В8	0,32	0,6	0,8	2,5	8,5	–	0,3	44–50	34–40
16	3X3В3М3Ф	0,30	1,0	0,7	3,2	2,5	2,4	0,7	44–48	33–36
17	5X4В3Ф	0,50	0,5	0,8	4,0	3,5	–	0,4	40–44	–
18	110X14В12Ф2	1,20	0,5	0,7	14,5	13,0	–	1,7	40–55	–

Метали №14, 15 та 16 наплавляють порошковими дротами ПП-25X5ФМС, ПП-3X2В8 та ПП-АН132 відповідно, №17 – спеченою стрічкою ЛС-5X4В3ФС та №18 – покритими електродами ВСН-6. Для попередження тріщин наплавлення ведуть при температурі деталі 350...400°С з наступним уповільненим охолодженням.

Масивні деталі необхідно відпускати при температурі 450...550°С та уповільнено охолоджувати разом з піччю. Для наплавлення внутрішніх поверхонь застосовують самозахисні порошкові дроти, наприклад марки ПП-АН130. У цьому випадку слід використовувати джерело живлення з жорсткою зовнішньою характеристикою.

*Високохромисті чавуни* застосовують для наплавлення деталей, що працюють в умовах абразивного, гідро - та газоабразивного зносу при звичайних та високих температурах. Наприклад, деталі засипних апаратів доменних печей. Броньові плити лотків, валки коксових дробарок, ножі бульдозерів, зуби ковшів екскаваторів тощо. Хімічний склад (у відсотках) напавленого металу та твердість наведено у таблиці 8.7

Метали №19, 20, 22 та 23 наплавляють порошками зі сплавів або сумішами порошків газополуменевим та плазмовим способами, а також дуговим – невитратними електродами, метал № 21 – покритими електродами дуговим способом. Для наплавлення металу № 20 застосовують порошкові дріт Пп-АН101 та стрічку ПЛ-АН101. Напавлений метал цієї групи має високу схильність до утворення холодних тріщин, попередити які майже неможливо. Навіть попередній підігрів до 600°С і уповільнене охолодження не виключають виникнення тріщин. Тому зміцнені деталі експлуатують з тріщинами у напавленому шарі, які не спричиняють суттєвого впливу на зносостійкість. Головна умова високої зносостійкості – відсутність тріщин вздовж потоку абразивних часток.

Таблиця 8.7

№ з/п	Тип металу	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	B	Твердість HRC
19	250X30CP	2,4	2,0	1,0	26,0	–	–	–	–	17	54– 58
20	300X28H4C4	3,0	3,5	1,8	28,0	4,0	–	–	–	–	48– 54
21	320X23C2GTP	3,2	2,3	1,3	23,0	–	–	–	1,0	1,0	55– 62
22	400X28H2C2BM	3,9	1,0	1,0	27,0	1,8	0,3	0,1	–	–	52– 56
23	500X38CGH	4,9	2,1	2,0	38,0	1,4	–	–	–	–	55– 60

Практика показала, що для зменшення утворення тріщин наплавлення високохромистими чавунами доцільно виконувати на метал з максимально низькою межею текучості. З цією метою часто використовують підшари, наплавлені зварювальним дротом Св-08А. Для збереження високої зносостійкості при наплавленні високохромистих чавунів необхідно забезпечувати мінімальну частку основного металу в наплавленому, бо розчинення наплавленого металу основним різко знижує його зносостійкість.

### 8.3. Матеріали для наплавлення

*Дроти суцільного перерізу.* Передбачено випуск сталюого наплавного дроту (Нп) діаметром 0,3–6,0 мм (використовують переважно діаметром 2,0–4,0 мм), а також катанки діаметром 6,5–8,0 мм. Хімічний склад, твердість наплавленого металу та призначення наплавних дротів, що використовуються для відновлення та зміцнення деталей металургійного устаткування, наведені у таблиці Х.8. Для відновного наплавлення та наплавлення проміжних шарів використовуються також декілька марок сталюого зварного дроту (Св) суцільного перерізу. Усі ці дроти призначені для наплавлення під флюсом або у середовищі захисних газів.

*Порошкові дроти.* За допомогою порошкового дроту, який складається з оболонки (м'якої сталеві, нікелевої або подібної стрічки) та осердя з порошків легуючих компонентів (феросплавів, чистих металів, карбідів, боридів тощо). Досить легко забезпечується отримання високолегованих електродних матеріалів. У самозахисних порошкових дротах, при використанні яких не потрібні флюс або захисний газ, до шихти осердя додають газо- та шлакоутворювальні компоненти, розкислювачі та елементи, що мають велику хімічну спорідненість до азоту.

Найчастіше використовують порошкові дроти діаметром 3,6 мм для наплавлення під флюсом та 2,0–3,0 мм для наплавлення відкритою дугою. Для наплавлення під флюсом великогабаритних деталей застосовують дріт діаметром 5,0–6,0 мм. У таблиці X.9 наведено хімічний склад наплавленого металу та призначення порошкових дротів, розроблених у ІЕЗ ім. Є.О.Патона для наплавлення деталей металургійного устаткування [64].

*Холоднокатані, порошкові та спечені стрічки.* Наплавлення електродною стрічкою характеризується високою продуктивністю процесу, малим проплавленням основного металу, великою шириною наплавленого валика. Разом з тим, цей процес недоцільний для відновлення малогабаритних деталей та тих, що мають складну поверхню. В таблиці 8.10 наведено хімічний склад стрічок для електродугового наплавлення та зазначені типові об'єкти їх використання.

Сталеву холоднокатану стрічку для наплавлення під флюсом виготовляють зі стандартних сталей – конструкційних, інструментальних та пружинних. Як правило, товщина стрічки становить 0,4–1,0 мм, ширина 20–100 мм.

*Флюси.* Для наплавлення застосовують плавлені та керамічні флюси.

Плавлені флюси легують метал несуттєво, їх використовують у поєднанні з легованим електродним дротом (стрічкою). Як і при зварюванні, якість наплавленого шару у багатьох випадках визначається правильним вибором типу та складу флюсу. Хімічний склад найчастіше вживаних при наплавленні плавлених флюсів наведено у таблиці 8.11.

Високоактивні флюси АН-348А та АН-60 із великим вмістом  $\text{SiO}_2$  та  $\text{MnO}$  використовують для наплавлення низьковуглецевих та низьколегованих сталей. Ці флюси забезпечують хороше формування наплавленого валика, малу схильність до утворення пор та хорошу здатність шлакової кірки відділятися. Пемзоподібний флюс АН-60 рекомендується також для наплавлення електродною стрічкою та багатоелектродного наплавлення.

Активний безмарганцевий флюс АН-26 використовують в основному для наплавлення аустенітних хромонікелевих сталей, а також інших легованих та високолегованих сталей. Перевага цього флюсу – відмінне формування наплавленого валика та дуже мала схильність до пор.

Найпоширенішим при наплавленні низько- та середньолегованих сталей є низькокремнистий флюс АН-20. Він забезпечує досить задовільне формування наплавлювальної поверхні та легку відділимість шлакової кірки з поверхні як холодного так і нагрітого до 300...400 °С металу.

Пемзоподібний низькокремнистий флюс АН-70 більш тугоплавкий, ніж АН-20, забезпечує можливість наплавлення циліндричних поверхонь відносно малих діаметрів.

Нейтральні безмарганцеві флюси марок АН-15, АН-28, ОФ-10 застосовують для наплавлення середньо- та високолегованих сталей та сплавів. Ці флюси характеризуються малою окислювальною здатністю,

забезпечують хороше формування наплавленого валика. Недоліком цих флюсів є погана відділимість шлакової корки з поверхні швів, які містять ванадій та ніобій [66]. Вони також мають підвищену гігроскопічність, що вимагає обов'язкового високотемпературного прожарювання перед використанням [67].

Фторидні флюси АН-72 та АН-90 використовують при електродуговому та електрошлаковому наплавленні легованих та високолегованих сталей та сплавів. До позитивних якостей цих флюсів слід віднести відмінну відділимість шлакової корки, хороші формувальні та рафінувальні властивості.

Керамічні флюси відносяться до числа неплавлених. Їх виготовляють із суміші порошкоподібних матеріалів, скріплених за допомогою клейких речовин, головним чином рідкого скла. Сучасні керамічні флюси для наплавлення створені на магнезійно-алюмінатній основі й забезпечують отримання наплавленого металу будь-якої необхідної твердості. В основному це досягається шляхом його легування хромом та вуглецем через флюс. Середній хімічний склад металу, наплавленого зварювальним дротом Св-08, та отримувана при цьому твердість наведені у таблиці Х.12 [66].

Варто підкреслити, що у випадку використання керамічного флюсу необхідно суворо додержуватися оптимального діапазону режимів наплавлення, інакше невідворотним буде значне відхилення складу наплавленого металу від заданого [68].

Таблиця 8.8 Сталеві наплавні (Нп) та зварювальні (Св) дроти суцільного перерізу, що використовуються для наплавлення деталей металургійного устаткування

Марка	Масова частка, %						Твердість після наплавлення	Типові об'єкти наплавлення
	С	Mn	Si	Cr	Ni	Інші		
Нп-30	0,27–0,35	0,5–0,8	0,2–0,4	≤0,25	≤0,3	–	160–220НВ	Осі, вали, шпинделі
Нп-45	0,42–0,50	0,5–0,8	0,2–0,4	≤0,25	≤0,3	–	160–220НВ	Те саме
Нп-50	0,45–0,55	0,5–0,8	0,2–0,4	≤0,25	≤0,3	–	180–240НВ	Опорні ролики, вали, осі
Нп-65	0,60–0,70	0,5–0,8	0,2–0,4	≤0,25	≤0,3	–	220–300НВ	Те саме
Нп-40Г	0,35–0,45	0,7–1,0	0,2–0,4	≤0,30	≤0,3	–	180–240НВ	Осі, вали, шпинделі
Нп-65Г	0,60–0,70	0,9–1,2	0,2–0,4	≤0,30	≤0,3	–	230–310НВ	Опорні ролики, кранові колеса, вали
Нп-30ХГСА	0,27–0,35	0,8–1,1	0,9–1,2	0,8–1,1	≤0,4	–	220–300НВ	Обтискні прокатні валки, кранові колеса
Нп-50Х6ФМС	0,45–0,55	0,3–0,6	0,8–1,2	5,5–6,5	≤0,4	0,4-0,6V, 1,2-1,6Mo	42–48 HRC <sub>e</sub>	Штампи, валки сортопрокатних та обтискних станів
Нп-40Х13	0,35–0,45	≤0,8	≤0,8	12,0–14,0	≤0,6		45–52 HRC <sub>e</sub>	Різні ножі, штампи
Нп-30Х10Г10Т	0,27–0,35	10,0–12,0	≤0,4	10,0–12,0	≤0,6		200–220НВ	Кранові колеса, плунжери гідропресів

Нп-45Х4В3Ф	0,40–0,50	0,8–1,2	0,7–1,0	3,6–4,6	≤0,6	2,5-3,0W, 0,2-0,4V	38–45 HRC <sub>e</sub>	Штампи, валки сорто- та листопрокатних станів
Нп-45В8Х2Ф	0,40–0,50	1,0–1,4	0,4–0,7	2,2–3,0	≤0,6	8,0-9,5W, 0,3-0,5V	40–46 HRC <sub>e</sub>	Штампи, валки сорто- та листопрокатних станів, ножі
Нп-60В10Х3Ф	0,55–0,65	1,3–1,8	0,4–0,7	2,6–3,6	≤0,4	9,0-10,5W, 0,2-0,4V	42–50 HRC <sub>e</sub>	Штампи, валки сорто- та листопрокатних станів
СВ-08	≤0,10	0,35–0,60	≤0,03	≤0,15	≤0,3	–	120–160НВ	Осі, вали, підшар
СВ-08Г2С	0,05–0,11	1,80–2,10	0,70–0,95	≤0,20	≤0,25	–	180–210НВ	Те саме
СВ-18ХГС	0,15–0,22	0,80–1,10	0,90–1,20	0,8–1,1	≤0,3	–	240–300НВ	Осі, вали

Таблиця 8.9 - Порошкові наплавні дроти для наплавлення деталей металургійного устаткування

Марка дроту (флюсу)	масова частка елементів у наплавленому металі, %							твердість на плавки	типові об'єкти наплавлення
	С	Mn	Si	Cr	Mo	V	інші		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПП-Нп-200Х12М (АН-15М, АН-20)	1,9	0,3	0,3	12,0	0,55	–	–	40-46 HRC <sub>e</sub> (60-62 HRC <sub>e</sub> після т/о)	ножі холодного різання, керни кліщових кранів

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПП-Нп-200X12ВФ (АН-15М, АН-20)	2,0	0,3	0,4	12,0	–	0,25	1,2W	40-46 HRC <sub>e</sub> (60- 62 HRC <sub>e</sub> після т/о)	те саме
ПП-Нп-200X15С1ГРТ самозахисна	2,0	1,0	1,5	15,0	–	–	0,7В, 0,6Тi	50-56 HRC <sub>e</sub>	молотки роторних та валки коксових дробарок
ПП-Нп-250X10Б8С2Т самозахисна	2,5	–	2,0	10,0	–	–	8,0Nb, 1,0Тi	50-58 HRC <sub>e</sub>	те саме
ПП-На-300X22МР2Т самозахисна	3,0	1,0	1,0	22,0	0,8	–	1,8В, 0,6Тi	56-63 HRC <sub>e</sub>	те саме
ПП-Нп-18X1Г1М (АН-348А, АН-60)	0,18	1,4	0,8	1,4	0,4	–	–	320- 380НВ	кранові колеса, ролики рольгангів
ПП-Нп-12X14НЗ самозахисна	0,12	0,6	0,8	14,0	–	–	3,0Ni	42-48 HRC <sub>e</sub>	плунжери гідропресів
ПП-Нп-15X13 (АН-26П, АН-26СП)	0,15	0,6	0,8	13,0	–	–	–	38-48 HRC <sub>e</sub>	ролики МНЛЗ (горизонтальних ділянок)
ПП-Нп-12X13Н2МФА (АН-26П, АН-26СП)	0,12	0,8	0,6	13,0	0,8	0,2	1,6Ni, 0,06N	38-52 HRC <sub>e</sub>	ролики МНЛЗ (криволінійних ділянок)
ПП-Нп-50X6СГРТ самозахисна	0,5	0,5	1,2	8,0	–	–	0,7В, 0,2Тi	57-62 HRC <sub>e</sub>	обрізні та вирубні штампи
ПП-Нп- 80X12К4Ф3В2М2НР	0,8	–	–	12,0	2,0	3,0	4,0Co; 2,0W; 1,0Ni; 0,1В	57-60 HRC <sub>e</sub>	те саме

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПП-Нп-25Х5ФМС (АН-15)	0,25	0,6	1,0	5,0	1,1	0,4	–	40-46 HRC <sub>e</sub> (47- 50 HRC <sub>e</sub> після т/о)	валки гарячої прокатки, ножі та штампи гарячого штампування
ПП-Нп-30Х4В2М2ФС (АН-20)	0,30	0,8	0,9	4,0	2,2	0,5	2,5W	47-51 HRC <sub>e</sub>	те саме
ПП-Нп-35В9Х3СФ (АН-20)	0,35	0,9	0,8	3,0	–	0,3	9,0W	44-50 HRC <sub>e</sub>	те саме
ПП-Нп-30Х2М2ФН (АН-20)	0,3	0,8	1,0	2,5	2,4	0,5	1,0Ni	42-48 HRC <sub>e</sub>	те саме
ПП-Нп-Н12Х3М2Д самозахисна (АН-20)	≤0,1	0,5	0,5	3,0	2,0	–	12,0Ni, 1,0Cu	32-35 HRC <sub>e</sub> (48- 52 HRC <sub>e</sub> після старіння)	те саме
ПП-Нп-45В9Х3СФ (АН-20)	0,45	0,9	0,8	3,0	–	0,3	9,0W	44-50 HRC <sub>e</sub>	те саме
ПП-Нп-90Г13Н4 самозахисна	0,8	13,0	0,2	–	–	–	4,0Ni	160- 240НВ	хрестовини стрілочних переводів, литво зі сталі Г13Л
ПП-Нп-14СТ самозахисна	0,14	0,5	0,6	–	–	–	0,4Ti	240- 260НВ	робочі колеса кранів, осі, вали
ПП-Нп-19СТ самозахисна	0,19	0,5	0,6	0,4	–	–	0,6Ti	300- 310НВ	те саме



Таблиця 8.10 - Стрічки для електродугового наплавлення деталей металургійного устаткування

Марка стрічки (флюсу)	Масова доля, %								Твердість наплавк и	Типові об'єкти наплавлення
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	Mo	Інші		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Сталеві холоднокатані</i>										
50Г (АН-60)	0,5	1,0	0,3	0,3	0,3	–	–	–	230 – 280 НВ	Опорні ролики, кранові колеса, вали
65Г (АН-60)	0,65	1,0	0,3	0,3	0,3	–	–	–	230–310 НВ	Те саме
50ХФА (АН-60)	0,5	1,0	0,3	1,0	0,4	–	–	0,2V	52-56 HRC <sub>e</sub>	Ножі та штампи гарячого штампування
25Х5ФМС (АН-60)	0,25	1,0	1,0	5,0	–	–	–	0,5V	40-46 HRC <sub>e</sub>	Валки гарячої прокатки, ножі та штампи гарячого штампування
<i>Порошкові</i>										
ПЛ-Нп- 40Х2Н6Г2С2М2ФБ (АН-60)	0,4	2,0	2,0	2,0	6,0	–	2,0	1,0Nb, 1,0V	50–56 HRC <sub>e</sub>	Ножі гарячого різання
ПЛ-Нп- 120Х22Р3Г2С самозахисна	1,2	2,0	1,0	22,0	–	1,0	–	3,0В	54–60 HRC <sub>e</sub>	Молотки дробарок, конуси та чаші доменних печей
ПЛ-Нп- 300Х25С3Г2Н2 (АН- 60)	3,0	2,0	3,0	25,0	2,0	–	–	–	50–54 HRC <sub>e</sub>	Те саме

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ПЛ-Нп- 400Х25С3Г2МН самозахисна	4,0	2,0	3,0	25,0	1,0	–	1,0	–	50–58 HRC <sub>e</sub>	Молотки дробарок
ПЛ-Нп- 400Х20Б7М7Н5В2Ф самозахисна	4,5	–	–	20,0	5,0	–	7,0	2,0W, 1,0V, 7,0Nb	54–60 HRC <sub>e</sub>	Конуси та чаші доменних печей
ПЛ-Нп- 500Х40Н40С2РЦ самозахисна	5,0	1,0	2,0	40,0	40,0	–	–	0,2В	50–56 HRC <sub>e</sub>	Те саме
<i>Спечені</i>										
ЛС-50Х4В3ФС (АН- 60)	0,7	0,4	0,5	5,0	–	–	–	4,0W, 0,7V	42–46 HRC <sub>e</sub>	Валки гарячої прокатки, ножі гарячого різання, штампи гарячого штампування
ЛС-45Х4В3ФС (АН-26П)	0,6	0,5	0,9	4,2	–	–	–	0,6W, 0,6V	42–46 HRC <sub>e</sub>	Те саме
ЛС-25Х5ФМС (АН- 60)	0,4	0,4	0,7	6,2	–	–	1,5	0,8V	38–44 HRC <sub>e</sub>	Те саме
ЛС-18ХГСА (АН-60)	0,3	0,7	0,9	1,1	–	–	–	–	24-32 HRC <sub>e</sub>	Обтискні валки прокатних станів, кранові колеса
ЛС-12Х13Н2МФА (АН-26П)	0,12	0,8	0,6	13,0	1,6	–	0,8	0,1N, 0,2V	38–52 HRC <sub>e</sub>	Роли МНЛЗ

Таблиця 8.11 - Хімічний склад плавлених флюсів для наплавлення

марка флюсу	масова частка, %								
	SiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	інші
<b>АН-348А</b>	42,0	36,0	≤6,5	6,0	≤4,5	4,5	≤2,0	–	–
<b>АН-60</b>	42,0	38,0	6,0	2,0	≤5,0	6,0	≤1,5	–	–
<b>АН-26</b>	30,0	3,0	6,0	17,0	21,0	22,0	≤1,5	–	–
<b>АН-20</b>	20,0	≤0,5	7,0	11,0	30,0	29,0	≤1,0	2,5	–
<b>АН-15М</b>	10,0	≤1,0	30,0	≤2,0	35,0	18,0	≤1,0	–	4,0NaF
<b>АН-28</b>	8,0	≤1,0	38,0	≤2,0	38,0	10,0	≤2,0	1,5	–
<b>АН-70</b>	7,0	–	30,0	–	30,0	30,0	1,0	2,0	–
<b>АН-72</b>	8,0	≤1,0	30,0	–	20,0	30,0	≤2,0	–	10,0ZrO <sub>2</sub>
<b>ОФ-6</b>	≤4,0	≤0,3	20,0	3,0	22,0	52,0	1,5	–	–
<b>ОФ-10</b>	11,0	–	≤8,0	12,0	30,0	40,0	≤1,0	–	–

Таблиця 8.12 - Хімічний склад та твердість металу, наплавленого дротом Св-08 під різними керамічними флюсами

марка флюсу	масова частка, %							твердість, HRC <sub>e</sub>
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Cu	
ЖСН-1	0,5	0,6	2,0	5,4	–	–	–	45-50
ЖСН-2	0,3	0,3	1,2	2,8	–	–	–	33-38
ЖСН-4	1,1	0,6	0,6	5,0	–	–	–	40-43
ЖСН-5	0,2	0,3	0,3	6,2	0,7	0,3	–	35-38
ЖСН-6	0,3	0,6	3,8	5,5	0,7	0,6	1,5	40-43
АНК-18	0,3	0,2	1,4	3,5	–	–	–	35-40
АНК-19	0,6	0,3	0,8	4,5	–	–	–	50-55
АНК-40	0,2	0,8	1,2	1,2	–	–	–	25-30

#### 8.4 Устаткування для наплавлення

Ручне наплавлення, як правило, виконується у стаціонарних умовах. До комплекту устаткування поста входять: джерело живлення, стіл або маніпулятор виробу, електродотримач, зварювальні проводи, захисні пристрої, допоміжний інструмент (зубило, молоток, сталеві щітки). Робоче місце наплавника обладнується припливно-витяжною вентиляцією.

Для механізованого наплавлення застосовують напівавтомати та автомати (див. таблиці 8.13 та 8.14). Останніми звичайно комплектують універсальні та спеціалізовані наплавлювальні верстати та станки (див. таблиці 8.15 та 8.16). До комплекту установки може входити допоміжне устаткування (формувальні пристрої, індуктори або газові пальники для підігріву деталей та засоби контролю процесу наплавлення).

Таблиця 8.13 - Напівавтомати для електродугового наплавлення суцільним та порошковим дротом

тип напівавтомату (джерело живлення)	номінальний струм, А	швидкість подавання дроту, м/год	діаметр дроту, мм	маса, кг
ПШ-107В (ВДУ-506, ВС-600)	500	100-700	суцільного 1,6 – 2,0, порошкового 1,6 – 3,0	20
ПДО-517 (ВДУ-506)	500	115-750	те ж	61
А-1197 (ВДУ-506)	500	118-782	те ж	35

## 8.5 Застосування наплавлення

### 8.5.1 Наплавлення тіл обертання

Найбільш характерні деталі тіл обертання – листопрокатні валки, колеса кранів, ролики рольгангів, конуси та чаші завантажувальних пристроїв доменних печей тощо.

*Валки листопрокатних станів* наплавляють суцільними електродними дротами або стрічками, порошковими дротами або стрічками, спеченими стрічками [69-71]. Наплавлений метал в основному типу хромвольфрамолібденових інструментальних сталей 25Х5ФМС, 35В9Х3СФ, 30Х4В2М2ФС.

Для підвищення продуктивності процесу відновлення валків великих діаметрів застосовують багатоелектродне наплавлення або використовують порошкові дроти великого діаметра. В якості устаткування для наплавлення випускаються спеціалізовані вальценаплавлювальні верстати КЖ-9705 та КЖ-9709 (див. таблицю 8.16), а також переобладнані вальцетокарні верстати. Попередній та супутній підігрів виконують індукторами промислової частоти або газовими пальниками, уповільнене охолодження або відпал після наплавлення – у печах або термостатах.

Як приклад, нижче наведено процес наплавлення валків ДУО листопрокатного стану 2800. Нанесення покриття виконують на установці з чотирма наплавлювальними апаратами. Перед наплавленням валок нагрівають трьома індукторами до 400°C зі швидкістю, що не перевищує 20 К/с. Для забезпечення рівномірного нагріву індуктори можна переміщувати вздовж осі валка. При відновленні зношених валків виконують попереднє наплавлення підшару дротом НП-30ХГСА діаметром 3-5 мм під шаром флюсу АН-348А на наступному режимі: струм 350-550 А, напруга 30-35 В, швидкість наплавлення 30-40 м/год. При напавленні температура валка не повинна опускатися нижче 200°C. Після нанесення підшару виконують проточку валка під наплавлення робочого шару порошковим дротом ПП-Нп-30Х4В2М2ФС діаметром 6,0 мм під флюсом АН-20 на режимі: струм 580-680 А, напруга 32-36 В, швидкість наплавлення 25-35 м/год. Температура підігріву валка перед нанесенням робочого шару також не повинна бути нижчою 400°C. Товщина напавленого робочого шару 10...15 мм. Загальна продуктивність чотирьох дугової установки складає приблизно 40 кг напавленого металу на годину.

Таблиця 8.14 - Автомати для механізованого дугового наплавлення

Тип автомату (джерела живлення)	Діаметр дроту, мм, суцільного/ порошкового	Максимальний переріз, мм, холоднокатаної (стеченої)/ порошкової стрічки	Номинальний струм, А	Номинальний режим роботи, %	Швидкість переміщення апарату, м/год		Швидкість поперечних коливань, м/год	Швидкість подачі електрода, м/год		Місткість флюсобункера, дм <sup>3</sup>	Витрата повітря, м <sup>3</sup>	Маса апарату, кг
					марш ева	робоча		ступінь I	ступінь II			
АД-231 (ВДУ-1202, ВДУ-1602)	3,6-6,5/ 3,6-6,0	60,0×1,0/ 20,0×4,0	1250	100	800	6-58	29-116	5-50	23-230	55	30	360
А-580М (ВС-600М)	1,0-3,0/ 1,6-3,0	–	500	60	600	12-40	–	49-408	–	11	–	137
А-1406 (ВДУ-1202)	2,0-5,0/ 2,0-3,6	–	1000	100	800	6-58	80-200	17-553	–	40	30	215
А-1416 (ВДУ-1202)	2,0-5,0/ 2,0-3,6	40,0×1,0/ 20,0×2,5	1000	60	600	12- 120	–	47-509	–	55	30	580
А-874Н (ВДУ-1202)	3,6-6,5/ 3,6-6,0	60,0×1,0/ 20,0×4,0	1200	100	160 0	5-116	29-116	9-90	40-400	55	30	420

Таблиця 8.15 - Універсальні установки для електродугового наплавлення

індекс установки та джерела живлення	діаметр дроту, мм, суцільного/ порошкового	максимальний переріз стрічки, мм, холоднокатаної (спеченої)/ порошкової	швидкість обертання планшайби (шпинделя), об/хв.	швидкість переміщення по твірній, мм/хв.	швидкість наплавлення плоских деталей, м/год.	максимальні розміри наплавлених деталей, мм		максимальна маса деталі, кг
						циліндричних (діаметр/довжина)	плоских (ширина/ довжина)	
УД-209 ВДУ-506	2,0-3,0/ 2,6-3,6	-	0,06-6,6	3,0-20,0	1,0-90,0	300/800	250/800	200
У-294 ВДУ-506	2,0-3,0/ 2,6-3,6	-	0,06- 12,5	2,0-10,0	-	360/1100	-	300
УД-305* ВДУ-506	2,0-3,0/ 2,6-3,6	-	0,2-1,6	2,0-4,0	-	100-350**/ 2000	-	4000
УД-420 ВДУ-506 (ВДУ-1202)	2,6-3,2/ 2,6-3,2	-	0,04-3,2	-	3,6-72,0	900/1190	400/900	400
У-653 ВДУ-506 (ВДУ-1202)	2,0-,0/ 2,0-3,6	-	0,03- 10,4	3,0-20,0	0,5-150,0	900/1300	400/ 1200	200
УМН-4 ВДУ-1202	3,0-,5/ 3,0-3,6	40,0x1,0/ 20,0x4,0	0,1-0,8	0,9-13,5	5,4-84,0	1000/3000	750/ 1500	4000
УМН-10 ВДУ-1202	3,0-,5/ 3,0-3,6	40,0x1,0/ 20,0x4,0	0,1-0,75	0,9-13,5	5,4-84,0	2000/4500	750/ 1500	10000

\* - для наплавлення внутрішніх поверхонь;

\*\* - внутрішній діаметр.

Таблиця 8.16- Спеціалізовані установки для наплавлення

Тип установки (джерела живлення)	наплавлювані деталі	Діаметр дроту, мм, суцільного порошкового	максимальний переріз стрічки, мм, холоднокатаної (спеченої)/ порошкової	швидкість обертання планшайби (шпинделя), об/хв.	швидкість переміщення по твірній, мм/хв.	максимальні розміри наплавлюваних деталей, мм		максимальна маса деталі, кг
						циліндричних (діаметр/довжина)	плоских (ширина/довжина)	
У-50М (ВДУ-1601)	конуса та чаші доменних печей	-	-/18,0x4,0	-	30-70,0	5000/-	-	50000
У-75М (ВДУ-1601)	те саме	-	-/18,0x4,0	-	30-70,0	8000/-	-	75000
УД-249 (ВДУ-1601)	плоскі листи	-	-/18,0x4,0	-	30-70,0	-	1120/2100 8-15*	300
У-877 (ВДУ-1601)	била молоткових дробарок	-	18,0x4,0	-	30-70,0	-	150/300	15
У-302 (ВДУ-506)	катки тракторів	2,0-3,0/ 2,6-3,6	-	0,8-2,0	-	220-690/200	-	100
КЖ-50 (ВДУ-1202)	валки пілігримових станів	3,0-6,5/ 3,0-3,6	-	0,135-1,135	-	740/1680	-	2000
КЖ-9705 (ВДУ-1202)	валки блюмінгів та слябінгів	3,0-6,5/ 3,0-3,6	40,0x1,0/ 18,0x4,0	0,135-1,135	-	1400/7000	-	40000
КЖ-9707 (ВДУ-1202)	валки пілігримових станів	3,0-6,5/ 3,0-3,6	-	0,135-1,135	-	925/2460	-	6500
КЖ-9711 (ВДУ-1202)	валки сорто-прокатних станів	3,0-6,5/ 3,0-3,6	40,0x1,0/ 18,0x4,0	0,135-1,135	-	850/4000	-	8000

\*- товщина листа



Наплавлені валки піддають термообробці у електричних печах за наступним режимом: температура нагріву  $500^{\circ}\text{C}$ , швидкість нагріву  $20\text{-}25\text{ K/s}$ , витримка при температурі 16 год., охолодження до кімнатної температури разом з піччю.

Валки листопрокатних станів наплавляють також суцільними дротами марок Св-08А, Св-12ГС, НП-30ХГСА під керамічним флюсом ЖСН-5. Це дозволяє отримати наплавлений метал типу хром молібденової сталі, яка добре опирається циклічним термозмінам.

Крім робочих, наплавленню підлягають і опорні валки, які, як правило, виготовляють із заевтектоїдної сталі типу 9ХФ. Ці валки під час роботи сприймають великі статичні, динамічні та контактні навантаження. Основними причинами виходу опорних валків з ладу є втомлюваність металу і руйнування поверхневих шарів бочки валка (відшарування, викришування), а також зношення при терті металу по металу.

Однією з головних складнощів, що виникає при наплавленні валків із заевтектоїдних сталей, є небезпека утворення кристалізаційних тріщин. Для їх попередження потрібен попередній підігрів валка до температури не нижче  $400^{\circ}\text{C}$ . Нагрів виконують інжекторними безполумєневими газовими пальниками або індукторами, при цьому швидкість нагрівання не повинна перевищувати  $20\text{ K/s}$ .

Для наплавлення проміжного шару (підшару) та заплавлення відшарувань використовують дріт НП-30ХГСА у поєднанні з флюсом АН-348А. При великих значеннях зносу або відшарувань припускається наплавлення перших шарів дротами Св-12ГС, Св-18ХГСА тощо.

Для нанесення робочого шару опорних валків не рекомендується застосовувати метал, що має ударну в'язкість нижче  $25\text{ Дж/см}^2$ , через схильність його до крихкого руйнування, підвищеної твердості та гіршої оброблюваності. У відповідності до цих вимог для наплавлення найчастіше використовують порошковий дріт ПП-Нп-25Х5ФМС [72]. Розроблено загальну технологічну схему, що передбачає нанесення різної кількості шарів металу в залежності від зносу валка.

Наплавлення виконують на постійному струмі зворотної полярності. Після нього для зняття залишкових напружень валки витримують у термостаті при температурі  $450^{\circ}\text{C}$  протягом 15 – 18 год. та повільно охолоджують у цьому ж термостаті до кімнатної температури.

Враховуючи нерівномірні навантаження та, відповідно, нерівномірний знос поверхні великих опорних валків, розроблено спосіб наплавлення шарів змінної зносостійкості [73], що дозволяє збільшити стійкість валків та покращити якість прокату. Для цього використовують технологію двохелектродного наплавлення під керамічним флюсом ЖСН-5. Два електродні дроти, які мають різний хімічний склад, подають в одну зварювальну ванну зі швидкістю, що змінюється за спеціальною програмою. Це дає можливість одержати наплавлений метал типу

15X5ФМС, 17X6ГМФС, 20X6ГМСФ, 25X7ГМФС, 35X7МФС тощо, який відрізняється за твердістю, зносо– та розгаростійкістю, здатністю до зміцнення при наклепі та нагріві, а також за іншими службовими характеристиками [74]. Склад наплавленого металу та його властивості змінюються у відповідності до характеру та величини зношення поверхні валків.

*Валки трубопрокатних станів.* Найпоширенішим є наплавлення валків неперервних трубопрокатних станів. До введення наплавлення в основному використовувалися ковані валки зі сталі 55, стійкість яких була низькою. Натепер валки всіх трубопрокатних станів підлягають наплавленню.

Нові валки, що виготовлені зі сталей 50, 50X, 55, 60X, 60ХН проточують по робочій поверхні на глибину 10...15 мм з такого розрахунку, щоб після механічної обробки наплавленого валка робочим шаром був, як мінімум, третій шар, наплавлений зносостійким сплавом. Потім валки нагрівають до 200...250°C і виконують наплавлення підшару суцільними дротами Св-08А, Св-12ГС або Св-18ХГС під флюсом АН-348А. Після цього валки нагрівають до 300...400°C і виконують багат шарове наплавлення зносостійкого шару порошковим дротом під флюсом АН-20 або АН-26, потім відпуск при температурі 400°C та уповільнене охолодження з піччю або у термостаті.

При повторних наплавленнях зношені валки проточують до повного видалення виявлених дефектів.

Для наплавлення робочого шару валків першої (чорнової) кліті використовують порошковий дріт ПП-Нп-35В9Х3СФ, валки решти клітей наплавляють порошковими дротами ПП-Нп-30Х2М2НФ або ПП-Нп-25Х5ФМС. Пояснюється це тим, що метал, наплавлений дротом ПП-Нп-35В9Х3СФ, має дуже високу стійкість проти стирання при підвищених температурах, але порівняно невисоку термічну стійкість.

Для наплавлення робочих калібрів використовується спеціалізований верстат КЖ-9711. Його оснащено автоматами А-874Н або АД-231, він дозволяє акуратно, з мінімальними припусками на механічну обробку, виконувати наплавлення складних калібрів.

Для покращення захвата при збільшених обтисненнях застосовують електроіскрове легування обробленої після наплавлення поверхні калібру [75]. В якості електроду використовують пластини з твердих сплавів ТК, ВК тощо.

*Валки підгірмних станів.* Ці валки працюють у надзвичайно важких умовах. Гребінь валка сприймає сильні удари, відносно обтиснення металу в осередку деформації вельми велике, внаслідок чого валки зношуються дуже швидко. Для наплавлення таких валків застосовують спеціальний верстат КЖ-9710, що забезпечує високоякісне наплавлення складної поверхні робочої ділянки валка за встановленою програмою. При наплавленні нового

валка для прокатки труб діаметром 8-12 дюймів загальний час нанесення покриття складає 9-14 год. При повторному наплавленні, коли знос валка не перевищує припустимий, цей час відповідно скорочується у 1,5–2 рази [76].

Наплавлення валків пілігримових станів виконують суцільним високолегованим дротом Св-08Х20Н9Г7Т діаметром 3-4 мм під шаром флюсу АН-20 або АН-26П. Товщина наплавленого шару 6-8 мм, твердість до 200НВ. Під час експлуатації валків твердість в результаті наклепу збільшується до 250-270 НВ. Для наплавлення валків цього типу розроблено також порошковий дріт ПП-Нп-07Х12М3Н3Г2. Твердість металу, наплавленого цим дротом під флюсом АН-26П, становить 28-32 НРС<sub>c</sub>. Впровадження зносостійкого наплавлення валків пілігримних станів дозволило суттєво збільшити їх стійкість за одну установку в стан, підвищити на 10% продуктивність прокатки та у декілька разів знизити витрату валків [76].

*Валки сортопрокатних станів.* На відміну від валків з рівною бочкою, сортопрокатні валки наплавляють на спеціальних вальценаплавлувальних верстатах КЖ-9711, що мають можливість встановлювати валок у зручне положення при наплавленні вертикальних стінок калібрів. Для нанесення покриття використовують дроти марок ПП-Нп-35В9Х3СФ, ПП-Нп-25Х5ФМС, ПП-Нп-30Х4В2М2ФС та суцільний дріт НП-30ХГСА. Останнім часом все більше застосування знаходить дріт ПП-Нп-30Х2М2НФ. Метал, наплавлений цим дротом, має дуже високу термостійкість. Тому у багатьох випадках стан робочої поверхні валків після однієї постановки у кліть дозволяє виконувати їх подальшу експлуатацію без повторного наплавлення, обмежуючись перешліфуванням валка. Послідовність наплавлення ромбічного калібру наведено на рисунку 8.1.

Нанесення покриття виконують на стандартних режимах з попереднім підігрівом до 400°C та наступним уповільненим охолодженням після наплавлення у термостаті.

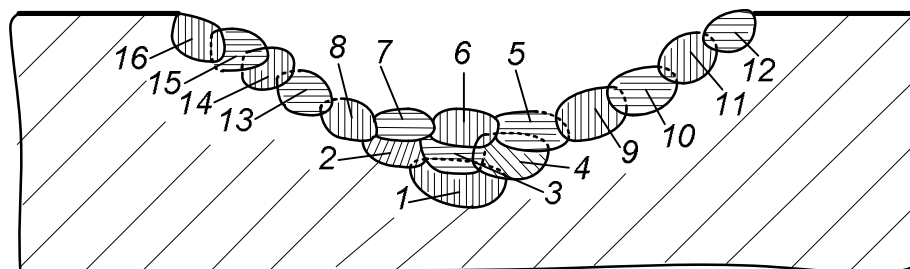


Рисунок 8.1 - Послідовність наплавлення конічних та ромбічних шийок або ручаїв циліндричних деталей

Для наплавлення сортопрокатних валків (в основному сутункових та штрипсових станів) використовують також спечені стрічки ЛС-25Х5ФМС та ЛС-50Х4В2М2ФС у поєднанні з флюсом АН-60 [77]. Нанесення

покриття виконують з попереднім та супутнім підігрівом до 400°C, а також наступним відпуском при температурі 450°C протягом 4-8 год. та уповільненим охолодженням у печі або термостаті. Струм наплавлення постійний, полярність зворотна. Режим наплавлення стрічкою перерізом 1×30мм: струм 360–600 А, напруга 30–34 В; стрічкою перерізом 1×60мм: струм 720–800 А, напруга 30–34. Швидкість наплавлення для стрічок обох розмірів 8–20 м/год. Товщина шару, нанесеного за один прохід, 3–4 мм. Продуктивність наплавлення становить 16–18 кг/год.

*Валки холодної прокатки.* На відміну від валків гарячої прокатки, згадані валки після відновного наплавлення для набуття робочих властивостей (високої твердості та втомної міцності) вимагають складної термічної обробки (гартування у воді та багатогодинний низькотемпературний відпуск). З цієї причини електродугове наплавлення цих валків обмежене. При виготовленні валків холодної прокатки з середньо вуглецевих сталей із використанням наплавлення для робочого шару обирають сталь, що забезпечує високу твердість без складної термічної обробки. Запропоновано, зокрема, використовувати мартенситостаріючі нікелькобальтмолібденові сталі. Наплавлений метал у початковому стані має твердість 43–45 HRC<sub>e</sub>, після старіння (480°C, 5 год.) вона підвищується до 65–68 HRC [78].

Застосовують також наплавлення валків суцільним дротом НП-60Х5В7М4ФГТ [79]. За рахунок оптимального співвідношення у дроті легуючих елементів досягнуто формування найбільш зносостійкої структури металу безпосередньо після наплавлення, яке виконують з попереднім та супутнім підігрівом до 420°C.

Використання для наплавлення сталей високої теплостійкості вимагає додержання температурного режиму. Досвід показав, зокрема, що багатозарове наплавлення на форсованих режимах може призвести до зменшення зносостійкості та зниження експлуатаційної стійкості валків.

*Ролики машин неперервного лиття заготовок (МНЛЗ)* сприймають циклічні термомеханічні навантаження, корозію та абразивне зношення. Ролики, що працюють на криволінійних ділянках, зазнають, крім того, значні згинальні навантаження з боку заготовки, що відливається, які досягають 2000 кН. У залежності від умов експлуатації переважає звичайно один з видів руйнування – термічне розтріскування або абразивно-окисне зношення робочої поверхні.

Для наплавлення радіусних та криволінійних ділянок ролик створено порошковий дріт ПП-Нп-12Х13Н2МФА, для горизонтальних ділянок - ПП-Нп-15Х13. Процес ведуть під пемзоподібним флюсом АН-26П.

Наплавлений метал мартенситного класу (12Х13Н2МФА, 15Х13) характеризується хорошою корозійною стійкістю та підвищеною твердістю, є більш працездатним, ніж метал феритного та ферітно-мартенситного класів (20Х17, 25Х5ФМС) [80].

Ролик перед наплавленням контролюють на наявність тріщин, відколів, відшарувань тощо. Глибоко розташовані дефекти видаляють токарною обробкою з наступним заплавленням до потрібного розміру низьковуглецевими дротами типу Св-08А. Перед наплавленням ролик підігривають до 180–200°C; під час наплавлення температура не повинна опускатися нижче 150°C. При тривалих перервах у нанесенні покриття потрібна теплоізоляція ролика. Наплавлення з суцільним робочим шаром виконують одним або двома дротами за гвинтоподібною лінією або поздовжніми валиками. Відновлені деталі підлягають відпуску за режимом: нагрівання до 450°C зі швидкістю 50°C/с. Витримка при температурі 6 год., охолодження з піччю.

Дослідження показали, що основною причиною появи тріщин термічної втомності роликів є залишкові напруження, які виникають під час наплавлення. Відпуск дозволяє лише знизити їх рівень. Більш сприятливий розподіл напружень та збільшену стійкість забезпечує нова конструкція робочого шару роликів – з переривчастою наплавленою поверхнею. Традиційна технологія передбачає нанесення покриття у 3 – 5 шарів за гвинтовою лінією з перекриттям сусідніх валиків у межах  $\frac{1}{4}$  ...  $\frac{1}{3}$  їхньої ширини. Нова конструкція роликів передбачає наплавлення двох останніх шарів без перекриття, з зазором між сусідніми валиками. Наплавлення виконують від середини до кромки бочки ролика гвинтовими валиками правого та лівого обертання, що досягається зміною напрямку обертання ролика під час наплавлення. Після нанесення покриття виконують відпуск роликів за зазначеними режимами та проточування ролика на заданий розмір за гребнями гвинтових валиків.

*Деталі завантажувальних пристроїв доменних печей* працюють у важких умовах абразивного та газо-абразивного зношування при підвищених температурах та тисках. Зношенню піддаються контактні поверхні конуса та чаші, а також поверхні, за якими сковзає шихта під час завантажування доменної печі.

На переважній більшості підприємств широко шарове наплавлення конусів та чаш виконують на спеціалізованих установках У-50М та У-75М самозахисною порошковою стрічкою з поперечними коливаннями на ширину до 400мм [81]. Наплавлення ведуть вздовж твірної одночасно двома електродними стрічками (кожна із стрічок живиться від окремого джерела). Наплавлювальну деталь за допомогою маніпулятора встановлюють так, щоб твірна конуса була горизонтальною. В момент, коли стрічки займають одне з крайніх положень, маніпулятор повертає деталь на крок наплавлення. Після повного оберту виробу апарат переміщують на ширину наплавленого шару і продовжують процес. Підігрів не використовують через великі розміри та масу деталей. В наплавленому шарі невідворотно утворюються тріщини, але вони

розташовуються перпендикулярно потоку газу та абразивного пилю і не слугують осередками ерозійного руйнування.

Як на конусі, так і на чаші (рисунок 8.2) наплавляють всі три пояси – контактний, проміжний та захисний.

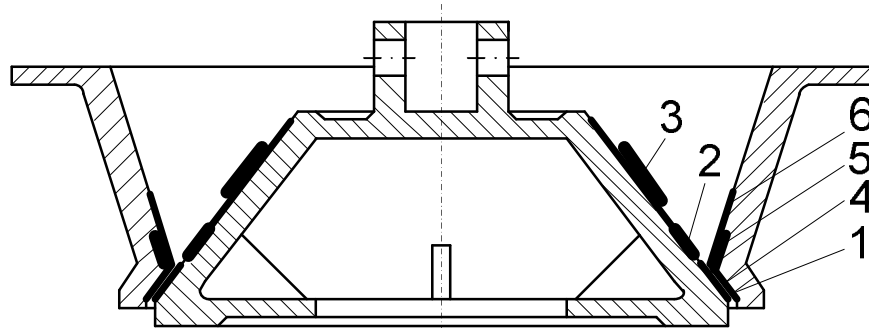


Рисунок 8.2 - Великий конус та чаша засипного апарату доменної печі: 1 – контактний пояс конусу; 2 – проміжний пояс конусу; 3 – захисний пояс конусу; 4 – контактний пояс чаші; 5 – проміжний пояс чаші; 6 – захисний пояс чаші

Контактний пояс повинен забезпечити герметичність у сполученні конуса з чашою, проте теплові деформації через нерівномірний розподіл температур у підконусному просторі домни невідворотно призводять до утворення зазорів. Запилений газовий потік, що спрямовується у зазори, руйнує контактну поверхню. Проміжний пояс також зношується цим потоком та, крім того, шихтою, що ковзає поверхнею конуса при його відкритті. Захисний пояс конусу піддається лише абразивному зношенню. Різний характер зношення поясів вимагає використання різних матеріалів для наплавлення, а також різної товщини та ширини напвлненого шару.

Спочатку наплавляють проміжний пояс, потім захисний, а після механічної обробки – контактний. Для наплавлення контактного поясу конусів та чаш найчастіше використовують порошкові стрічки ПЛ-Нп-500Х40Н40С2РЦ та ПЛ-Нп-400Х20Б7М6Н5В2Ф [82]. Проміжний та захисний пояси наплавляють порошковими стрічками ПЛ-Нп-300Х25С3Н2Г2 та ПЛ-Нп-120Х22Р3Г2С.

Для деталей унікальних засипних апаратів найбільших доменних печей, а також зрівнювальних клапанів та малих конусів успішно застосовують пічне наплавлення композиційними сплавами, що складаються з карбідів вольфраму та зв'язки – марганцевого мельхіору [83]. Зносостійкість деталей, що наплавлені таким матеріалом, у 1,5 – 2,5 рази вище, ніж для деталей наплавлених порошковими стрічками.

*Колеса кранів.* Використовують ковані (при діаметрі до 600мм) або литі (при більших діаметрах) кранові колеса із сталей 65Г, 50Г2 та ін. Під час експлуатації в результаті зношування зменшується діаметр поверхні котіння та тоншає реборда кранового колеса. Оптимальним слід вважати

такі методи відновлення та зміцнення, при яких забезпечується твердість поверхні котіння коліс дещо менша твердості рейок.

Колеса багаторазово відновлюють та зміцнюють автоматичним дуговим наплавленням під флюсом найбільше поширення отримало нанесення покриття суцільним дротом НП-30ХГСА під флюсом АН-348А з попереднім підігрівом до 300°C та уповільненим охолодженням після наплавлення.

Перед наплавленням колеса проточують для видалення тріщин, вм'ятин, відколів тощо. Частково відламані реборди зрізають повністю. Поверхню котіння наплавляють при горизонтальному положенні осі колеса. На початку біля основи реборди наплавляють потовщений валик, а потім виконують нанесення покриття на поверхню котіння за гвинтовою лінією або по кільцю з автоматичним зміщенням електроду на крок після кожного повного оберту виробу. Після відновлення діаметра колеса вісь маніпулятора нахилиють під кутом 20-30° так, щоб наплавлювана стінка реборди зайняла положення, зручне для наплавлення. При відновленні об'єкта реборди необхідно використати флюсоутримуючий пристрій.

#### 8.5.2 Наплавлення плоских деталей

Прикладами деталей з плоскою поверхнею, які наплавляються при виготовленні, можуть бути кернові губки стріперних кранів, вкладиші шпindelних з'єднань приводів клітей прокатних станів, ножі обтискних станів тощо.

Кернові губки зміцнюють плазмовим наплавленням порошком зі сплаву ПГ-С27 (сплав типу сормайт) з розміром часток 0,1-0,5мм. Стійкість деталей, що зміцнені цим способом, виявляється у 2 рази вищою наплавлених вручну електродами ЦС-1. Це пояснюється відсутністю тріщин та інших дефектів у наплавленому шарі, надзвичайно малим проплавленням основного металу.

Для наплавлення використовують установку з приставкою А-1105 конструкції ІЕЗ ім.Є.О.Патона [65], що включає плазмовий пальник, коливальний механізм, живильник для подавання порошку, пульт керування та апаратурна шафа. Режим наплавлення: сила струму 160–180А, напруга 32–35В, витрата газу плазмоутворювального 2–3 л/хв., транспортувального – 4–5 л/хв., захисного – 20–25 л/хв., витрата порошку 1,75–2,00кг/год., частота коливань плазмотрону 40 кол./хв., амплітуда коливань 25мм. Наплавлення виконують без підігріву з охолодженням на повітрі. В якості плазмоутворювального, транспортувального та захисного газів використовують аргон. Твердість наплавленого металу *HRC48–52*.

*Вкладиші шпindelних з'єднань*, що виготовлені зі сталевих поковок, наплавляють бронзою для створення антифрикційного робочого шару. У порівнянні з литими вкладишами з бронзи біметалеві деталі відрізняються підвищеною працездатністю, бо в наплавленому шарі відсутні раковини, рихлоти, пори, газові бульбашки та інші ливарні вади. Для нанесення

покриття використовують апарати А-384МК, закріплені на візках. Наплавляють бронзовим дротом БрАЖМц 10-3-1,5 діаметром 6мм під флюсом АН-60. Перед наплавленням поверхню вкладиша очищають від бруду, масла та окалини сталевією щіткою. З обох торців до наплавлюваних площин приварюють сталеві вивідні планки, після чого деталь нагрівають газовим полум'ям до 300–350°C. Наплавляють у три шари. Режим наплавлення: сила струму 650–750А, напруга 34–36В, швидкість наплавлення 10–12 м/год., швидкість подавання дроту 83 м/год.

Після наплавлення деталь розташовують у термостаті для уповільненого охолодження.

*Ножі обтискних станів* призначаються для порізки металу товщиною до 300мм при температурі 750–1100°C. У момент розрізу на них діють значні динамічні навантаження та високий нагрів, після чого відбувається різке охолодження водою. Ознаками повного зношення є значне округлення різальних кромки та виникнення на них глибоких тріщин. Добре зарекомендували себе на практиці біметалеві ножі з наплавленими під час виготовлення різальними кромками. Найефективніший спосіб отримання таких ножів – механізоване наплавлення порошковим дротом та спеченою стрічкою під флюсом.

Порошковий дріт ПП-3Х2В8 діаметром 3,6мм використовують при одно – або трьохелектродному наплавленні під флюсом АН-20С. Порошковий дріт ПП-АН132 діаметром 6мм використовують при одноелектродному наплавленні під флюсом АН-20С; спечену стрічку ЛС-5Х4В2М2ФС шириною 30мм – при наплавленні під флюсом АН-60. Перед нанесенням покриття ножі нагрівають до 400°C за допомогою індукторів. Газових пальників, електричних або газових печей. Після наплавлення їх піддають відпуску при 400°C з наступним охолодженням у термостаті. Після механічної обробки наплавлені кромки ножів піддають електроіскровому легуванню. У якості електрода використовують пластини твердого сплаву ВК або ТК. Ширина зміцнювальної смуги – 10...12мм.

### 8.5.3 Наплавлення деталей складної форми

Характерними деталями можуть бути лопатки робочих коліс повітродувних машин (ексгаустерів), зношені біла дробарок для подрібнення шихтових матеріалів, хрестовини стрілочних переводів залізничної колії.

Била (молотки) дробарок відновлюються напівавтоматом, самозахисним порошковим дротом, або автоматом, порошковою стрічкою. Порошковим дротом наплавляють, використовуючи метод примусового формування наплавленого металу. З чотирьох боків поверхня, що відновлюється, обмежується мідним водоохолоджувальним кристалізатором. Використовують порошкові дроти марок ПП-Нп-



200X15C1ГРТ, ПП-Нп-250X10Б8С2Т, ПП-Нп-300X22МР2Т. Товщина наплавленого шару 30–40мм, твердість 50–60 НРС.

Автоматичне наплавлення бил порошковою стрічкою ПЛ-Нп-300X25С3Г2Н2 або ПЛ-Нп-400X25С3Г2МН виконують на установці У-877 (див. таблицю Х.16), як правило, в один шар без попереднього підігріву. Спеціальний кантувач дозволяє наплавляти одночасно 15 бил у трьох положеннях – по торцю та боковим поверхням.

Зносостійкість наплавлених бил у 1,5–2,0 рази вище за зносостійкість литих бил з високомарганцевої сталі Г13Л. Можливе неодноразове відновлення зношених бил повторним наплавленням.

*Робочі колеса ексгаустерів.* Зношення деталей робочих коліс спричиняється абразивним впливом твердих часток, завислих у потоці газу, що відсмоктується (газо-абразивне зношення). Деталлями, що зношуються, є лопатки та прилеглі до них площини основного та двох покривних дисків.

Найбільше зношення спостерігається у місці їх прилягання до основного диску з боку входу потоку запиленого газу. В цих місцях утворюються наскрізні свищі, які розташовані вздовж лопаток та повільно звужуються у напрямку руху газового потоку. Основний диск зношується в місцях прилягання до нього полиць лопаток. Найбільшому зносу піддається частина диску між лопатками та маточиною. Покривний диск зношується у місцях прилягання до нього тильного боку лопатки.

Зношені поверхні дисків відновлюють механізованим наплавленням у захисному газі з наступним шліфуванням наплавлених ділянок. Для наплавлення використовують суцільний дріт Св-08Г2С діаметром 1,0мм. Лопатки робочих коліс наплавляють газопорошковим методом, застосовуючи у якості наплавлі вального матеріалу порошки зі сплаву на основі нікелю.

Поширеною є також технологія індукційного наплавлення лопаток з використанням струмів високої частоти. За цим методом на поверхню деталі наносять шар порошкової шихти, після чого за допомогою індуктора нагрівають деталь до повного розплавлення шихтового матеріалу.

Розроблена технологія електроіскрового зміцнення зношених поверхонь лопаток. Для цього використовуються пластини твердих сплавів типу ВК та ТК і установки моделі ЭФИ, що забезпечують продуктивність процесу до 2–3 см<sup>2</sup>/хв. при споживаній потужності 1,6 кВт.

*Хрестовини стрілочних переводів.* Поширення отримала розроблена у ІЕЗ ім. Є.О.Патона технологія механізованого наплавлення у стаціонарних умовах. При підготовці з вусовиків та осердя шліфуванням видаляють пліви, напливи металу та верхній шар, що має мікро тріщини. Окремі дефекти вишліфовують до повного їх видалення. Цим способом можна відновлювати хрестовини з вертикальним зносом вусовика та осердя до

25мм [84]. Для даного вузла розроблено самозахисний порошковий дріт ПП-Нп-90Г13Н4 діаметром 2,8мм. Живлення зварювальним струмом відбувається від джерела з жорсткою зовнішньою характеристикою. Режим наплавлення: струм 200–220А, напруга 22–24В, полярність зворотна. Продуктивність складає 3,5–4,0 кг/год. Твердість металу наплавки 180–200НВ, після наклепа – до 400НВ.

Хрестовини наплавляють з поперечними коливаннями дуги на всю ширину відновлювальної ділянки. Довжина ділянок, що наплавляються за один прохід, не повинна перевищувати 150мм. Висота шару, що виконується за один прохід, складає 4–5мм, перекриття попереднього валика – не менше 2–3мм. Для попередження стікання металу з напавленої кромки хрестовини застосовують мідні формувальні підкладки. При багатошаровому напавленні обов'язковим є проковування кожного шару.

З метою підвищення продуктивності розроблено технологію автоматичного багато електродного напавлення хрестовин під флюсом [85]. За цією технологією можна напавляти шар металу товщиною до 20мм за один прохід. Напавлення виконують порошковим дротом ПП-Нп-Х25Г14Н3Т діаметром 3,8мм під флюсом АН-72. Режим (максимальна кількість електродів – 7): струм 250–300А на один дріт, напруга 32–34В, струм постійний, полярність зворотна. Швидкість напавлення по довжині виробу змінна, від 6 до 25м/год (встановлюється в залежності від профілю зносу). Спочатку напавляють осердя, потім послідовно обидва вусовика.

#### 8.6 Питання для самоконтролю

1. Які способи відновлення найдоцільніше використовувати для збільшення терміну експлуатації прокатних валків, для усунення локальних дефектів литва?
2. У чому особливості техніки напавлення деталей різної геометричної конфігурації?
3. Для яких випадків у якості напавленого металу використовують хромомолібденові сталі, а в яких – високо хромисті чавуни?
4. Які марки флюсів можна рекомендувати для напавлення циліндричних поверхонь малих (великих) діаметрів?
5. Які спеціалізовані установки використовують для напавлення плоских листів, конусів та чаш доменних печей, валків сортопрокатних станів?
6. Які технології напавлення розроблені для відновлення валків трубопрокатних станів (валків холодної прокатки)?

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бауднер Ю. Учет трибологических факторов при техническом обслуживании. // Черные металлы, июль-август, 2004. – с. 68-72.
2. Мур Д. Основы и применение трибоники. –М.: Мир, 1978. – 488 с.
3. История открытий. Энциклопедия. – М.: Росмэн, 1999. – 152 с.
4. Вильфред Дж. Барте История трибологии — мост между древностью и 21-м веком - <http://tribo.ru>
5. Curcija D. Tribological Aspects Of The Use Of Lubricants For The Plastic Forming Of Metals. // Materiali In Tehnologije ,2003(5), N 37, p. 237 – 250. (Internet file: curcija.pdf).
6. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. Пер. с англ. Под ред. И.В.Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 544 с.
7. Marchi J.A. Modeling Of Dynamic Friction, Impact Backlash And Elastic Compliance Nonlinearities In Machine Tools, With Applications To Asymmetric Viscous And Kinetic Friction Identification. - Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 1998. - (Internet file: phdweb.pdf).
8. Даусон Д. Основоположники трибоники. Шарль Огюстен Кулон. // ПТС, 1978, т.100, № 2, с. 5 -9
9. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. М.: Мир, 1982. – 352 с.
10. Гере Ф. Из истории прокатки в средние века и новое время. // Черные металлы, март 1997, с. 37-39.
11. Даусон Д. Основоположники трибоники. Генрих Рудольф Герц. // Проблемы трения, 1979, т, 101, №2, с 1 -2
12. Бургвиц А.Г. Труды Н.П.Петрова и гидродинамическая теория смазки.// Трение и износ, 1984, т. 5, № 3, с. 531-537.
13. Пинкус О. Столетие теории Рейнольдса. Краткая история гидродинамической теории смазки. // Проблемы трения, 1987, №1, с. 3 – 19.
14. Даусон Д. Основоположники трибоники. Бошан Тауэр. // Проблемы трения, 1979, т. 101, №1, с. 4 – 7
15. Даусон Д. Основоположники трибоники. Мейо Дайер Херси. // Проблемы трения, 1980, т. 102, №4, с. 4 - 7
16. Даусон Д. Основоположники трибоники. Уильям Бейт Харди. // Проблемы трения, 1979, т. 101, №4, с. 1 - 3
17. Сери А. Некоторые направления развития теории смазки Рейнольдса. // Проблемы трения, 1987, №1, с. 21-39.
18. Archard J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. //J. Appl. Phys., 1953, № 24 (981).
19. Гринвуд, Трипп. Упругий контакт шероховатых сфер. // Прикладная механика, 1967, №4, с. 7.
20. Леонардо да Винчи. Институт Новых Образовательных технологий. РГГУ. – Москва, 2002.- Интернет файл –

21. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справочник. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с
22. Chi T., Ballinger T., Olds R., Zecchino M. Surface Texture Analysis Using Dektak Stylus Profilers - Veeco: Internet files: AN525\_Dektak\_Surface.pdf
23. ISO 4287:1997; Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters.
24. ASME B46.1-1995; Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay).
25. ISO 13565-2:1996; Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties - Part 2: Height Characterization using the linear material ratio curve.
26. Chapter 2. Lubrication Principles. – EM 1110-2-1424, 28 Feb 1999. – Internet Files: C-2.pdf.
27. Steve Roberts Surfase Engineering. Friction.- Internet Files: frcn2000.pdf.
28. Chapter 3. Lubricating Oils. - EM 1110-2-1424, 28 Feb 1999 – Internet file: c-3.pdf.
29. Viscosity Classifications. Marine Lubricants Information Bulletin No. 6: - Chevron Texaco, Internet file: lubes\_bulletins\_06.pdf.
30. J.Lay Gearing Up for Performance: An Introduction to Synthetic Lubricants. (www.nyelubricants.com) – Internet file: nye\_gear\_tech\_v2.pdf.
31. Матвеевский Р.М., Лашхи В.Л., Буяновский И.А. и др. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.
32. More solutions to sticky problems. - Brookfield Engineering Labs., Inc., 2003. - Internet file: more solutions.pdf – 49 p.
33. Яхно О.М., Желяк В.І. Гідравліка неньютонівських рідин. – К.: Вища школа, 1995. – 199с.
34. Flender E., Lipinski M., Hepp E. New Developments for Process Modeling of Thixotropic Forming Process. Presentation at 1 st International Aluminum Casting Technology Symposium, 13.10.1998 – Internet file: 1\_99\_Thixo.pdf.
35. AQUALON Sodium Carboxymethylcellulose. Product and technical information. Hercules incorporated – Internet file: 250\_10h.pdf.
36. Valdemir Garcia Ferreira, Murilo Francisco Tome, Norberto Mangiavacchi, Fernando Marques Federson, Antonio Castelo Filho, Jose Alberto Cuminato COMPUTATION OF GENERALIZED NEWTONIAN FLUID FLOW PROBLEM – Internet file: cilamce2003last.pdf.

37. Chen X.B., Schoenau G, and. Zhang W.J. Modelling Of Time-Pressure Fluid Dispensing Process - University of Saskatchewan. – Internet file: Fl\_081.pdf.
38. Holdsworth S.D, Rheological Models Used for the Prediction of the Flow Properties of Food Products: a Literature Review, Trans. Institution of Chemical Engineering, 71(C3), 1993,139-179.
39. Besq A., Monnet Ph., Pantet A. FLOW SITUATIONS OF DRILLING MUDS EFFECTS OF THIXOTROPIC PROPERTY – Internet file: fl\_063.pdf.
40. F. Mollet, Contribution à l'étude de l'écoulement d'un fluide thixotrope, PhD thesis, Université Nancy I (France), 1996.
41. Modigell M., Koke J. Time-Dependent Rheological Properties of Semi-Solid Metal Alloys. - Institute of Chemical Engineering, Aachen University of Technology, 1999. – Internet file: Pub\_ivt\_time99.pdf.
42. Lawal Adeniyi, Railkar Sudhir and. Kalyon Dilhan M. Mathematical Modeling Of Three-Dimensional Die Flows Of Viscoplastic Fluids With Wall Slip. - Stevens Institute of Technology. – Internet file: 160.pdf.
43. Гесим Б., Винер В. Влияние предельного напряжения сдвига смазки на толщину УГД-пленки. // Проблемы трения и смазки. Сб. научных трудов ASME – М.: Мир, 1980, т. 102, №2, с. 88-98.
44. Mike Zecchino. Characterizing Surface Quality: Why Average Roughness is Not Enough. – Veeco Instruments Inc.: Internet files: Average\_Roughness\_2003.pdf
45. Заславский Ю. С. Трибология смазочных материалов. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
46. Lulea Tekniska Universitet. – Internet files: handouts\_BL\_ML.pdf.
47. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. – М. Машгиз, 1959. – 403 с.
48. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 315 с.
49. Дерягин Б.В. Что такое трение? – М.: изд. Академии наук СССР, 1963. – 229 с.
50. Chapter 7 introduction to ehl and mixed lubrication theories. - Internet files: mixedlubetheory.pdf.
51. Коднир Д.С., Жильников Е.П., Байбородов Ю.И. Эластогидродинамический расчет деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 160 с.
52. Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Теория прокатки. Гидродинамические эффекты смазки. – М.: Metallurgy, 1989. – 192 с.
53. Грудев А.П., Максименко О.П. Элементы гидродинамической теории смазки при прокатке //Изв. вузов. Черная металлургия. – 1971. –№7. – С. 105 – 109.

- 54.Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
- 55.Чекмарев А.П., Грудев А.П., Беда Н.И., Максименко О.П., Иванов К.А. Смазка контактной зоны рабочего и опорного валков //Сталь. – 1975. –№1. – С. 57 – 60.
- 56.Максименко О.П. Элементы контактной гидродинамики в исследовании толщины смазочной пленки при прокатке //Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. –№2. – С. 23 – 26.
- 57.Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424с.
- 58.Автоматизированные смазочные системы и устройства. /В.Я.Семенов, П.М.Курганский, В.И.Кузьмин и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 176с.
- 59.ROLLING BEARING LUBRICATION. / FAG Kugelfischer Georg Schäfer AG. Industrial Bearings and Services. – Internet file: Rolling bearing lubrication/pdf.
- 60.NTN. 11.Lubrication. - Internet file: lube.pdf.
- 61.Lincoln Industrial Automatic Lubrication - Internet file: Lincoln. pdf.
- 62.Молодык Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин. Справочник.- М.: Машиностроение, 1989.- 480 с.
- 63.Грохольский Н.Ф. Восстановление деталей машин и механизмов сваркой и наплавкой.- М.-Л.: Машиностроение, 1966.- 275 с.
- 64.Рябцев И.А., Кондратьев И.А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования.- К.: Экотехнология, 1999.- 64 с.
- 65.Шехтер С.Я., Резницкий А.М. Наплавка металлов.- М.: Машиностроение, 1982.- 71 с.
- 66.Подгаецкий В.В., Любарец И.И. Сварочные флюсы.- К.: Техніка, 1984.- 166 с.
- 67.Потапов Н.Н. Основы выбора флюсов при сварке сталей.- М.: Машиностроение, 1979.- 168 с.
- 68.Фруммин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка.- Х.: Металлургия, 1961.- 421 с.
- 69.Шехтер С.Я., Шварцер А.Я. Наплавка деталей металлургического оборудования.- М.: Металлургия, 1981.- 160 с.
- 70.Наплавка валков листопрокатного стана порошковой лентой/Ю.А.Зеленкин, А.М.Рыков, Е.Ф.Белоусов, Л.Ф.Гриба-нов // Сварочное производство.- 1968.- №1.- С.15-17.
- 71.Кондратьев И.А., Лазаренко Ю.Н. Опыт применения порошковой проволоки большого диаметра для механизированной наплавки// Теоретические и технологичес-кие основы наплавки. Наплавочные материалы.- К.: ИЭС им. Е.О.Патона, 1978.- С.12-14.
- 72.Кашенко Ф.Д., Моргун Э.П. Восстановление наплавкой опорных валков листового стана «2500» горячей прокатки// Наплавка. Опыт и

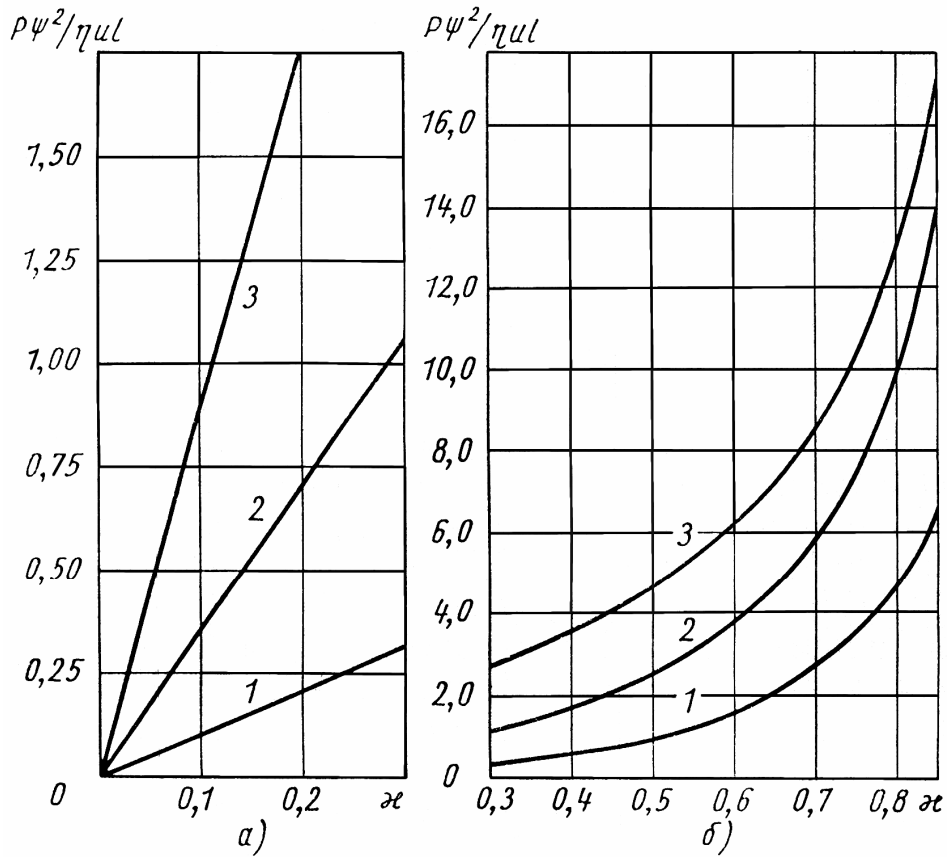
- эффективность применения.- К.: ИЭС им. Е.О.Патона, 1985.- С.14-16.
- 73.Повышение работоспособности прокатных валков наплавкой слоя с изменяющейся по длине бочки износостойкостью/ Л.К.Лещинский, С.В.Гулаков, Б.И.Носовский и др.// Автоматическая сварка.- 1978.- №3.- С.57-62.
- 74.Материалы и технология наплавки листопрямительных валков/ Л.К.Лещинский, К.К.Степнов, О.И.Новохацкая, В.Г.Бендрик// Современные способы наплавки и их применение.- К.: ИЭС им.Е.О.Патона, 1982.- С.29-35.
- 75.Бондарчук Н.А., Умериков В.Н., Вольпов М.Л. Улучшение технологических характеристик прокатных валков с помощью наплавки и электроискрового легирования// Современные способы наплавки и их применение.- К.: ИЭС им.Е.О.Патона, 1982.- С.118-120.
- 76.Бондарчук Н.А.Опыт наплавки прокатного инструмента и деталей оборудования на трубопрокатном заводе// Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики.- К.: ИЭС им.Е.О.Патона, 1980.- С.62-67.
- 77.Опарин Л.И., Маликин В.Л. Применение износостойкой наплавки спеченными лентами// Наплавка. Опыт и эффективность применения.- К.: ИЭС им.Е.О.Патона, 1985.- С.33-35.
- 78.Усынин В.Г., Толстых Л.Г., Арнаутов Б.В. наплавка мартенситностареющего сплава системы Fe-Ni-Co-Mo в углекислом газе// Сварочное производство.- 1979.- №7.- С.16-18.
- 79.Наплавка и упрочнение валков горячей и холодной прокатки/ С.И.Чернышев, В.А.Аникаев, А.И.Уршанский, В.П.Ашихмин// Теоретические и технологические основы наплавки. Повышение долговечности и работоспособности наплавленных деталей.- К.: ИЭС им.Е.О.Патона, 1989.- С.9-10.
- 80.Опарин Л.И., Васильев В.Г., Бондарчук Е.П, Повышение усталостной прочности наплавленного металла типа 15Х13/ Наплавленный металл. Состав, структура. Свойства.- К.: ИЭС им.Е.О.Патона, 1992.- С.51-53.
- 81.Юзвенко Ю.А., Шимановский В.П., Гавриш В.А. Дуговая наплавка засыпного аппарата доменной печи//Автоматическая сварка.-1972.- №2.- С.59-64.
- 82.Шимановский В.П., Ворончук А.П., Звездин С.М. Материалы и оборудование для наплавки конусов и чаш доменных печей// Оборудование и материалы для наплавки.- К.: ИЭС им.Е.О.Патона, 1990.- С.71-73.

83. Наплавка композиционным сплавом деталей металлургического оборудования/ В.Д.Кудинов, Б.В.Филимонов, С.А.Шевцов, И.В.Нетеса// Автоматическая сварка.- 1985.- №5.- С.48-50.
84. Кондратьев И.А., Пономаренко Н.К. Полуавтоматическая наплавка крестовин стрелочных переводов// Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в машиностроении и ремонте.- К.: ИЭС им.Е.О.Патона, 1981.- С.129-132.
85. Многоэлектродная наплавка крестовин стрелочных переводов/ В.В.Меликов, Б.В.Волков, В.М.Буга и др.// Современные способы наплавки и их применение.- К.: ИЭС им.Е.О.Патона.- 1982.- С.17-20.



## Додаток А

Залежність коефіцієнту навантаженості від відносного ексцентриситету для підшипників з різним кутом обхвату за відсутності торцьового витікання мастила.



для а —  $\varepsilon = 0 \text{--} 0,3$ ; б —  $\varepsilon = 0,3 \text{--} 0,85$ ;

1,2 і 3 — відповідно для підшипників з кутом обхвату 60, 120 і 180°

**Навчальне видання**

*Максименко Олег Павлович  
Перемітьмо Валерій Вікторович  
Самохвал Володимир Михайлович*

**ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ЗМАЩУВАННЯ  
МЕТАЛУРГІЙНИХ МАШИН**

Комп'ютерна верстка та коректура . . . . .

Підписано до друку \_\_\_\_\_  
Формат 60x84 1/16. Друк – різнограф. Папір типогр.  
Умовн. друк. арк. \_\_\_\_\_ . Тираж 100 прим.

Замовлення № \_\_\_\_\_

Ціна договірна

---

ДНВП “Системні технології”  
49635, Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 4, кімн. 503  
E-mail: [st@dmegi/dp/ua](mailto:st@dmegi/dp/ua)

Свідотство про внесення суб'єкта видавничої справи до державного  
реєстру видавців:

**Серія ДК № 429**