

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»  
Видавничо-поліграфічний інститут  
Кафедра технології поліграфічного виробництва

## **МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБРОБКИ У ВИДАВНИЦТВІ ТА ПОЛІГРАФІЇ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня докторів філософії,  
за освітньо-науковою програмою «Видавництво та поліграфія»  
спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія»*

Київ-2021

Методи досліджень та обробки у видавництві та поліграфії: Навчальне видання. [Електронний ресурс]: навч. посібник для аспірантів спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» ОНП «Видавництво та поліграфія» третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти / КПІ ім. Ігоря Сікорського / Уклад.: Киричок П. О., Т. А. Роїк. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,05 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 37с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 1 від 16.09.2021 р.) за поданням Вченої ради Видавничо-поліграфічного інституту (протокол № 1 від 30.08.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

## **МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБРОБКИ У ВИДАВНИЦТВІ ТА ПОЛІГРАФІЇ**

Укладачі: Петро КИРИЧОК, д-р техн. наук, проф.

Тетяна РОЇК, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний редактор: Тетяна КИРИЧОК, д-р тех. наук, проф.

Рецензент: Олександр ПАЛЮХ, в.о. зав. каф. репрографії, д-р техн. наук, доц.

Навчальний посібник висвітлює особливості спеціальних методів досліджень та тонкої механічної обробки деталей поліграфічного технологічного обладнання, що широко використовується при виготовленні друкарської продукції. Наведено специфіку визначення профілометричних показників з використанням сучасного вимірювального обладнання контактного і безконтактного принципів дії. Представлено сутність і характер фрикційної взаємодії у процесі роботи контактних пар у вузлах поліграфічних машин, наведено чинники, що впливають на зносостійкість деталей, вузлів і друкарської машини у цілому. Розглянуто методологію виконання триботехнічних випробувань для визначення основних параметрів тертя і зносу. Представлено науково-технічні заходи ефективної прецизійної обробки та особливості формування параметрів якості робочих поверхонь деталей, що сприяють одержанню стабільно високих функціональних характеристик деталей, та сучасні методи і апаратурне обладнання для визначення показників якості робочих поверхонь оброблених деталей вузлів друкарського устаткування. Для науковців, аспірантів і докторантів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів та всіх, хто цікавиться спеціальними методами досліджень та тонкої механічної обробки деталей.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

## Зміст

|  |    |
|--|----|
| <b>Вступ</b> .....   | 4  |
| <b>Розділ 1. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕОМЕТРІЇ ПОВЕРХНІ. ПРОФІЛОМЕТРІЯ</b> .....   | 6  |
| 1.1. Параметри шорсткості.....   | 6  |
| 1.2. Висотні параметри шорсткості .....  | 7  |
| 1.3. Крокові параметри .....   | 7  |
| <b>Розділ 2. ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ШОРСТКОСТІ. ПРОФІЛОМЕТРИ</b> .....   | 8  |
| 2.1. Контактні профілометри .....  | 9  |
| 2.2. Безконтактні профілометри .....   | 10 |
| <b>Розділ 3. ТРИБОТЕХНІЧНІ (або ТРИБОЛОГІЧНІ) ВИПРОБУВАННЯ: СУТНІСТЬ ТА ОСНОВНІ ЕТАПИ ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....   | 13 |
| 3.1. Різновиди сили тертя .....  | 14 |
| 3.2. Характер фрикційної взаємодії.....  | 12 |
| 3.3. Прикладне значення процесів тертя і зношування. Триботехнічні випробування.....   | 15 |
| 3.4. Етапи триботехнічних випробувань.....   | 16 |
| <b>Розділ 4. ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ ДЕТАЛЕЙ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН</b> ..... | 18 |
| 4.1. Магнітно-абразивна обробка поверхонь композитів на основі нікелю для високошвидкісної друкарської техніки.....  | 21 |
| 4.2. Фінішне оздоблювально-викінчувальне магнітно-абразивне оброблення поверхонь тертя деталей з нікелевих композитів друкарських машин.....               | 22 |
| 4.3. Магнітно-абразивне оброблення циліндричних поверхонь підшипників.....   | 25 |
| 4.4. Вплив магнітної індукції на параметри шорсткості і наклепу при обробці поверхонь композитних підшипників ковзання.....                                | 27 |
| 4.5. Вплив розмірів робочого зазору на параметри якості поверхонь оброблення...  | 29 |
| 4.5.1. Вплив швидкостей оброблення на якість поверхні .....  | 31 |
| 4.5.2. Формування нерівностей поверхонь оброблення.....  | 31 |
| 4.6. Вплив магнітно-абразивного оброблення на зносостійкість та фізичні властивості поверхневого шару .....  | 32 |
| 4.7. Умови створення ювенільних поверхонь, забезпечення параметрів зносу .....   | 33 |
| 4.8. Абразивні інструменти для магнітно-абразивної обробки композитних підшипників ковзання.....   | 34 |
| <b>Література</b> .....  | 36 |

Науково-дослідна діяльність у вищих навчальних закладах України здійснюється на основі діючих Законів України «Про вищу освіту», «Про наукову і науково-технічну діяльність», статутів університетів.

Успішність наукової діяльності аспірантів спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» неможлива без знання методологічних підходів до теоретичних і сучасних практичних технологій підвищення стабільності і надійності поліграфічного обладнання, визначення характеристик якості деталей, показників зносостійкості та особливостей їх формування у процесі тонкої механічної обробки деталей друкарської техніки, та методів їх вимірювання.

**Мета** навчального посібника полягає у висвітленні методологічних засад підвищення стабільності і надійності деталей друкарської техніки, підходів до формування параметрів якості деталей та визначення їх функціональних характеристик.

Навчальний посібник складається з чотирьох розділів: 1– Визначення параметрів геометрії поверхні. профілометрія, 2 – Прилади для визначення шорсткості. профілометри, 3 – Триботехнічні (або трибологічні) випробування: сутність та основні етапи досліджень, 4 – Особливості методологічного забезпечення параметрів якості поверхонь тертя деталей зі зносостійких композитів для друкарських машин.

Теоретичний рівень практичних робіт є важливим для аспірантів 1 і 2 року навчання. Це дозволить їм набути навички, необхідні в майбутній науковій роботі в наукових установах і навчальних закладах та розвине їх здатності самостійно виконувати науково-дослідні роботи.

У завдання до виконання практичних робіт входить закріплення теоретичних знань та практичних навичок з особливих методів дослідження параметрів якості поверхонь деталей після тонкої механічної обробки і характеристик зносостійкості, що розширить наукові і практичні знання з накопичення і аналізу результатів, обробки одержаної інформації, а також з підготовки її викладу у дисертаційній роботі.

Навчальний посібник як електронне навчальне видання призначений для аспірантів всіх форм навчання спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» ОНП «Видавництво та поліграфія» третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти та може бути використане аспірантами інших спеціальностей Видавничо-поліграфічного інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

## **РОЗДІЛ 1. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕОМЕТРІЇ ПОВЕРХНІ. ПРОФІЛОМЕТРІЯ**

**Профілометрія** (англ. Profilometry) - процес вимірювання ( «зняття») профілю перетину поверхні в площині, перпендикулярній до неї і орієнтованої в заданому напрямку.

Графічне зображення профілю, знятого в ході профілометрії, називається **профілограмою**.

Інформація, що отримується в ході обробки профілограм, використовується для розрахунку стандартних параметрів і дозволяє виробляти якісну і кількісну оцінку шорсткості досліджуваних поверхонь [1, 2].

Безліч профілограм, знятих з певним кроком і послідовно розташованих в тривимірній системі координат, дає наочне уявлення про топографію поверхні.

Реєстрація профілограм, а також отримання тривимірного зображення поверхонь твердих тіл може проводитися приладами контактного або безконтактного типу.

**Прилади**, призначені для цього, називаються **профілометрами** або профілографами.

У приладах контактного типу копіювання профілю здійснюється шляхом переміщення голки по шорсткою досліджуваної поверхні.

До приладів безконтактного типу відносяться оптичні та растрові електронні мікроскопи, а також прилади, що використовують для сканування поверхні монохроматичне (зокрема, лазерне) випромінювання.

**Шорсткість поверхні** - сукупність нерівностей поверхні з відносно малими кроками на базовій довжині.

Вимірюється в мікрметрів (мкм).

Шорсткість відноситься до мікрогеометрії твердого тіла і визначає його найважливіші експлуатаційні властивості.

Перш за все зносостійкість від стирання, міцність, щільність (герметичність) з'єднань, хімічна стійкість, зовнішній вигляд.

Залежно від умов роботи поверхні призначається параметр шорсткості при проектуванні деталей машин, також існує зв'язок між граничним відхиленням розміру і шорсткістю.

Вихідна шорсткість є наслідком технологічної обробки поверхні матеріалу, наприклад, абразивами.

В результаті тертя і зношування параметри вихідної шорсткості, як правило, змінюються.

### **1. 1. Параметри шорсткості**

Вихідна шорсткість є наслідком технологічної обробки поверхні матеріалу. Для широкого класу поверхонь горизонтальний крок нерівностей знаходиться в межах від 1 до 1000 мкм, а висота - від 0,01 до 10 мкм [1, 2].

В результаті тертя і зношування параметри вихідної шорсткості, як правило, змінюються, і утворюється експлуатаційна шорсткість.

Експлуатаційна шорсткість, відтворена при стаціонарних умовах тертя, називається рівноважної шорсткістю.

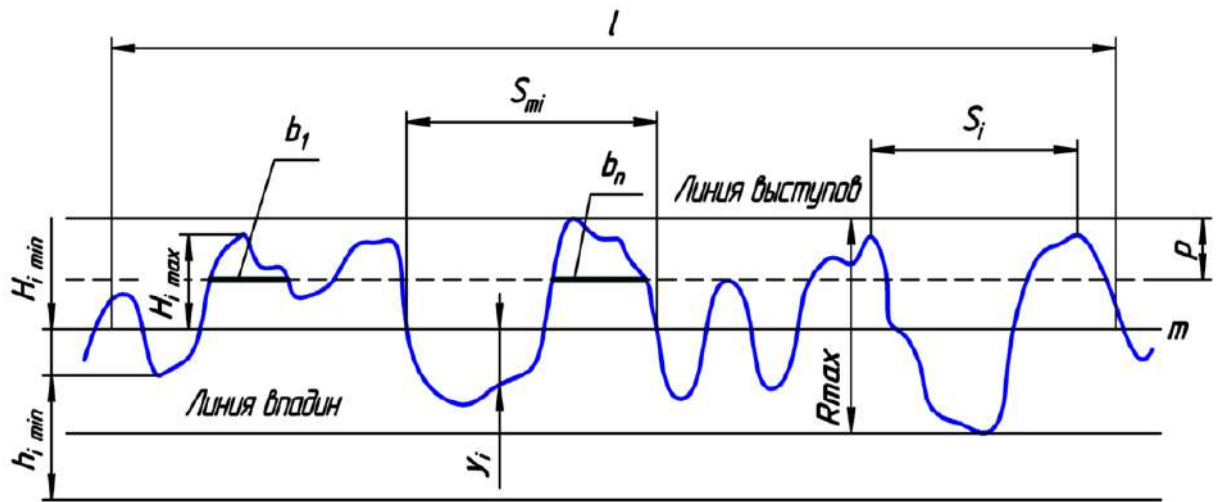


Рис. 1. Нормальний профіль і параметри шорсткості поверхні (рис. діючий).

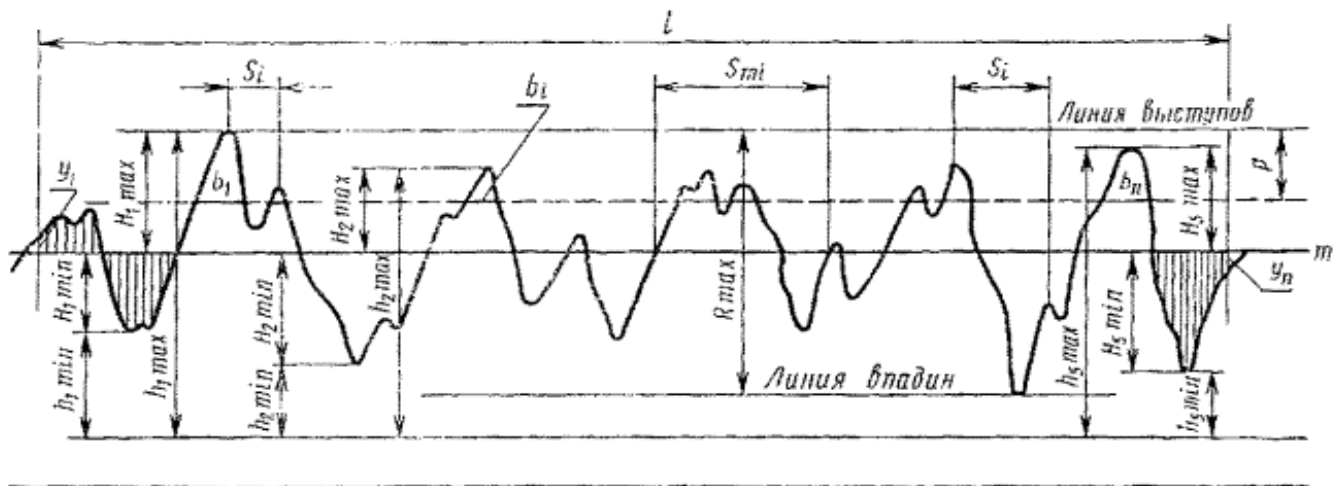


Рис. 1а. Нормальний профіль і параметри шорсткості поверхні (у ред. до 2017 р., ДИВ. **h<sub>i</sub> max**).

На рис.1, 1а схематично показані параметри шорсткості, де: — базова довжина;— середня лінія профілю; — середній крок нерівностей профілю;— середній крок місцевих виступів профілю; — відхилення п'яти найбільших максимумів профілю; — відхилення п'яти найбільших мінімумів профілю; — відстань від найвищих точок п'яти найбільших максимумів до лінії, що паралельна середній і не перетинає профіль;— відстань від нижчих точок п'яти найбільших мінімумів до лінії, паралельної середньої і не перетинає профіль;— найбільша висота профілю; — відхилення профілю від лінії; — рівень перетину профілю; — довжина відрізків, що відсікаються на рівні.

## 1.2. Висотні параметри шорсткості

**Ra** — середнє арифметичне з абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини *l*;

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$$

Або

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

**Rz** — сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів профілю і глибин п'яти найбільших западин профілю в межах базової довжини *l*;

$$Rz = \left( \sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}| \right) / 5$$

**Rmax** — найбільша висота профілю;

### 1.3. Крокові параметри [1, 2].

**Sm** - середній крок нерівностей;

**S** - середній крок місцевих виступів профілю;

**tp** - відносна опорна довжина профілю, де *p* - значення рівня перетинів профілю з ряду 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 %.

$$tp = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l}$$

**Ra**, **Rz** и **Rmax** визначаються на базовій довжині *l*, яка може приймати значення з ряду 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,80; 2,5; 8; 25 мм.

Параметр **Ra** є переважним і тому найбільш поширеним і застосованим.

**Показник шорсткості поверхні** - це одна з головних технічних характеристик якості виробу, призначеного для роботи в жорстких умовах, які передбачають сильний знос матеріалу виготовлення.

Від рівня шорсткості буде залежати як загальна якість роботи продукції - її експлуатаційні параметри, так і тривалість використання.

Показник шорсткості дуже важливий, наприклад, для двигунів внутрішнього згорання, інших аналогічних вузлів і механізмів з великою кількістю рухомих деталей і елементів, таких як друкарське і постдрукарське обладнання.

Під час експлуатації на робочих поверхнях таких механізмів відбуваються безперервні процеси, що роблять негативний вплив на структуру і цілісність матеріалу:

- утворенню сколів, тріщин і задирок різної величини;
- механічний знос матеріалу;
- ерозія металу, його часткове змінання.

Підвищити ж технічні та експлуатаційні характеристики виробу, поліпшити якість його роботи, а також продовжити термін придатності істотно допомагає додаткова технологічна обробка - **шліфування**.

Від неї залежатиме рівень шорсткості поверхні, який і вимірюється профілометрами.

Подібні виникають дефекти можуть надавати на якість роботи механізму навіть більший вплив, ніж сильний перегрів або удари, і, відповідно, швидше викликати його деформацію. Та й сам перегрів металу найчастіше виникає через надмірне тертя, причиною якого стає зайва шорсткість поверхні окремого елемента.

Тому саме шорсткість в значній мірі впливає на такі технічні показники матеріалів, як:

- стійкість до утворення корозії;
- загальна зносостійкість;
- допустимий коефіцієнт тертя.

## РОЗДІЛ 2. ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ШОРСТКОСТІ. ПРОФІЛОМЕТРИ

**Профілометр** - прилад для вимірювання шорсткості поверхні.

Для вимірювання шорсткості застосовуються **контактні і безконтактні** профілометри.

Профілометри виготовляються у багатьох країнах, зокрема, у Німеччині, Японії, Великій Британії, в Україні і у багатьох інших.



Рис. 2.1. Контактний профілометр Mitutoyo JIS2001 (Японія)

У **контактних приладах**, як щуп застосовується алмазна голка, яка переміщається по певній лінії (трасі) щодо поверхні.

Нерівності викликають механічні коливання голки, в результаті яких формується електричний сигнал, пропорційний розмірам нерівностей.



До **безконтактних** методів вимірювання шорсткості відносяться **оптичні** (тіньової проєкції, світлового перетину і інтерференційні) і **лазерні** (метод зсуву частоти випромінювання).

Більшість сучасних стандартів, в тому числі ГОСТ 19300 і ГОСТ 2789, були розроблені саме для контактних методів вимірювань.

**Контактні профілометри** мають ряд переваг. Вони забезпечують високу точність завдяки малому радіусу кривизни алмазної голки.

При дослідженні забруднених поверхонь з використанням безконтактної технології профілометри можуть видавати спотворені значення внаслідок сканування не шорсткості поверхні, а її забруднень.

Таким чином, за принципом роботи **профілометри** поділяються на **контактні** і **безконтактні** пристрої.

**Контактні прилади** оснащені спеціальним сталевим щупом з твердим наконечником. Він визначає рівень шорсткості, переміщаючись по поверхні виробу, і видає показники на екран, встановлений в корпусі приладу.

**Безконтактні або оптичні профілометри** визначають рівень шорсткості деталі за допомогою оптичного датчика і лазера, який також, досліджуючи поверхню, виводить отримані дані на спеціальний мініатюрний монітор.

Розглянемо докладніше обидва різновиди профілометрів, особливості їх роботи і головні технічні характеристики.

### 2.1. Контактні профілометри

Для наочного прикладу розглянемо один з найбільш поширених контактних профілометри - прилад з цифровим відліком моделі-296.

Він є типовим представником пристроїв в цьому класі вимірювальної техніки, робота яких заснована на індуктивному перетворенні сигналу.



а



б

Рис. 2.2. Контактні профілометри: а) профілометр дисплейний; б) профілометр моделі-296

Профілометр з цифровим відліком моделі-296

Цей вимірювач призначений для визначення рівня шорсткості тільки плоских поверхонь. Конструктивно контактний профілометр складається з таких елементів:

- сталевий щуп з твердим, як правило, алмазним наконечником;
- пристосування для переміщення щупа;
- перетворювач рівня шорсткості;
- цифровий перетворювач і підсилювач електричного сигналу;
- дисплей або мініатюрний монітор;
- зворотні датчики для управління щупом, напрямки його руху;
- перемикач режимів вимірювання;
- реле установки тимчасового інтервалу.

Подібні апарати в основному використовуються для визначення шорсткості поверхонь в лабораторних і цехових умовах.

Але, крім них, також існують і мобільні або портативні профілометри контактної дії, що мають невеликі габарити. Наприклад, вимірювальний прилад моделі TR-100 з п'єзоелектричним перетворювачем.



Рис. 2.3. Прилад моделі TR-100

Незважаючи на те що цей профілометр працює за таким же принципом, як і попередні моделі, його функціонал дозволяє визначити рівень шорсткості не тільки на плоских, але і на опуклих і увігнутих поверхнях.

Підстроювання показів вихідної величини або індикації в моделі TR-100 здійснюється за рахунок спеціального вузла, додатково вбудованого в основну робочу схему пристрою.

Крім того, профілометр TR-100 має і більш широкий діапазон вимірювання - від 0,05 до 50 мкм. Його ж істотний мінус в порівнянні з лабораторними або цеховими апаратами - більш низька точність визначення (різниця між моделями становить приблизно 10-12%).

## **2.2. Безконтактні профілометри**

На відміну від контактних моделей профілометри з використанням безконтактної технології мають ширші можливості.

Тому сьогодні вони отримали набагато більшого поширення, частіше використовуються на виробництві.

Їх головні переваги - можливість дистанційного сканування, а також функція оперативної передачі даних і автоматичний вивід інформації на монітор комп'ютера або принтер для подальшого роздрукування.

Допустима ж віддаленість або дистанція від досліджуваної поверхні буде залежати від конкретної моделі вимірювача.

Як і у випадку з контактними моделями, безконтактні апарати також бувають двох основних видів - стаціонарні і портативні.



Рис. 2.4. Безконтактний лазерний профілометр

Безконтактний стаціонарний лазерний профілометр з функцією запису отриманого результату включає в себе такі елементи:

- посадкова плита зі спеціальними пазами, в яких фіксується досліджуваний матеріал або виріб;
- спеціальна лазерна головка для сканування поверхні;
- оптичний пристрій з первинними вимірювальними перетворювачами - особливий датчик або сенсор;
- направляючий канал для передачі хвилі - хвильовод;
- комп'ютеризований вузол з відповідним призначенням для користувача інтерфейсом для управління приладом і підключенням до нього додаткових реєструючих пристроїв.

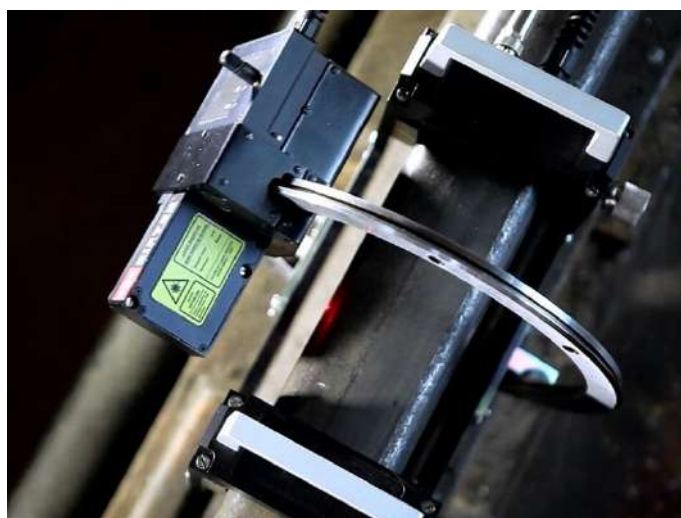


Рис. 2.5. Безконтактний оптичний профілометр

Функціонал безконтактного оптичного профілометра дозволяє визначати і виводити на монітор дуже великий, а в більшості випадків вичерпний обсяг необхідної інформації.

Докладні дані допомагають максимально точно встановити рівень шорсткості поверхні і необхідність її подальшої обробки.

Отримані відомості включають в себе такі важливі показники, як:

- профіль ділянки сканування - поздовжній і поперечний;
- максимально допустима точність вимірювання конкретної поверхні;
- дискретність (переривчастість) вимірювального кроку приладу;
- похибка відліку в момент сканування, а також можлива загальна сумарна похибка.

Крім основного функціоналу, в таких профілометри передбачена можливість проводити запис отриманих результатів на спеціальний термодрукуючий рулонний папір.

Сам запис виконується у вигляді профілограми, завдяки чому прилад можна також використовувати як повноцінний профілограф.

Управління ж і контроль сканування здійснюється в окремому діалоговому режимі, це дозволяє проводити повторне вимірювання рівня шорсткості не на всьому виробі, а тільки на необхідних ділянках.



Рис. 2.6. Стационарный оптический профілометр MICROMESURE SURF

Як приклад портативного або мобільного безконтактного оптичного профілометра розглянемо одну з найпопулярніших моделей такого типу пристроїв - вимірювач німецького виробництва Mahr MarSurf PS1.

У цьому компактному апараті керуючий сигнал передається у відповідну схему за допомогою спеціального оптичного датчика. Випадкові ж мимовільні коливання (періодичні часткові зміни) дистанції між досліджуваної поверхнею і зчитуючим приймачем апарату компенсуються за рахунок автоматичної системи калібрування кроку вимірювання.



Рис. 2.7. Безконтактний оптичний профілометр Mahr MarSurf PS1

Профілометр (рис. 2.7) оснащений зручним цифровим дисплеєм і спеціальним висувним стилусом безконтактного дії. Діапазон вимірювання рівня шорсткості в переносній моделі Mahr MarSurf PS1 коливається від 5 до 15 мікрометрів.

Вибір типу вимірювача буде прямо залежати від типу досліджуваної поверхні і призначення, складності виробу, що перевіряється.

**Стационарні контактні і безконтактні профілометри** дозволяють одержувати більш точну і детальну оцінку рівня шорсткості матеріалу.

Шорсткість твердих поверхонь, наприклад, деталей з високовуглецевої сталі, краще вимірювати апаратами з алмазним щупом.

Виконувати оперативну або часткову оцінку якості обробки матеріалу зручніше портативним переносним приладом.

**Оптичні безконтактні профілометри** розраховані тільки на сканування поверхонь **очищених** матеріалів - пил і забруднення можуть істотно спотворити результат.

У специфічних виробничих умовах для перевірки таких поверхонь рекомендується використовувати контактні профілометри з твердими алмазними наконечниками, інакше показник шорсткості буде невірним.

### **РОЗДІЛ 3. ТРИБОТЕХНІЧНІ (або ТРИБОЛОГІЧНІ) ВИПРОБУВАННЯ: СУТНІСТЬ ТА ОСНОВНІ ЕТАПИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

**Тертя** – це процес механічної взаємодії дотичних тіл при їх відносному зміщенні в площині торкання (зовнішнє тертя) або при відносному зсуві паралельних шарів рідини, газу або деформується твердого тіла (внутрішнє тертя, або в'язкість). Наявність тертя забезпечує можливість людині переміщатися по поверхні. Так, при ходьбі саме за рахунок тертя відбувається зчеплення підшви з підлогою, в результаті чого відбувається відштовхування від статі і рух вперед. Точно так же забезпечується зчеплення коліс автомобіля (мотоцикла) з поверхнею дороги [3-8].

Далі будемо розглядати лише зовнішнє тертя.

Вивченням процесів тертя займається розділ фізики, який називається механікою фрикційного взаємодії, або **трибологією**.

**Трибологія** - наука, розділ фізики, що займається дослідженням і описом контактної взаємодії твердих тіл, що деформуються при їх відносному переміщенні.

Областю трибологічних досліджень є процеси **тертя, зношування і змащувальні речовини**.

Слово трибологія походить від грецького кореня триβ- дієслова τρίβω (трибо), буквально «терти, натирати».

**Трибометрія** - система методів і засобів вимірювання сил тертя, зносу і несучої здатності тіл, що труться.

Вимірювання, отримані безпосередньо в процесі фрикційного взаємодії, дозволяють простими розрахунками визначити головні показники - величини коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування, а також допустимих навантажень, швидкостей і температур.

Одним з основних параметрів, що характеризують тертя, є **коефіцієнт тертя**:

$$\mu = F/N,$$

де **F** - сила тертя, що паралельна відносному переміщенню тіл; **N** - сила реакції опори.

Сила тертя  $F$  - це сила, що виникає при торканні двох тіл і перешкоджає їх відносному руху.

Причиною виникнення тертя є шорсткість поверхонь, що труться, і взаємодія молекул цих поверхонь.

### **3.1. Різновиди сили тертя**

При наявності відносного руху двох контактуючих тіл сили тертя, що виникають при їх взаємодії, можна поділити на [3-8]:

Тертя ковзання - сила, що виникає при поступальному переміщенні одного з контактуючих (взаємодіючих) тіл відносно іншого і діюча на це тіло в напрямку, протилежному напрямку ковзання.

Тертя кочення - момент сил, що виникає при коченні одного з двох контактуючих (взаємодіючих) тіл відносно іншого.

Тертя спокою - сила, що виникає між двома контактуючими тілами і перешкоджає виникненню відносного руху.

Цю силу необхідно подолати для того, щоб привести два контактують тіла в рух один щодо одного. Вона виникає при мікропереміщеннях (наприклад, при деформації) контактуючих тіл. Така сила діє в напрямку, протилежному напрямку можливого відносного руху.

Тертя вертіння – це момент сили  $M$ , що виникає між двома контактуючими тілами при обертанні одного з них щодо іншої і спрямований проти обертання.

Визначається формулою:  $M = \rho N$  де  $N$  - нормальний тиск,  $\rho$  - коефіцієнт тертя вертіння, що має розмірність довжини.

### **3.2. Характер фрикційної взаємодії**

---

У фізиці взаємодія тертя прийнято розділяти на [3-8]:

• сухе, коли взаємодіючі тверді тіла не розділені ніякими додатковими шарами / мастилами (в тому числі і твердими мастильними матеріалами) - дуже рідко зустрічається на практиці випадок, характерна відмінна риса сухого тертя - наявність значної сили тертя спокою;

• граничне, коли в області контакту можуть міститися шари і ділянки різної природи (оксидні плівки, рідина і так далі) - найбільш поширений випадок при терті ковзання;

• змішане, коли область контакту містить ділянки сухого і рідинного тертя;

• рідинне (в'язке), при взаємодії тіл, розділених шаром твердого тіла (твердим мастилом, наприклад графітом), рідини або газу (мастила) різної товщини - як правило, зустрічається при терті коченні, коли тверді тіла занурені в рідину, величина в'язкого тертя характеризується в'язкістю середовища;

• еластогідродінамічне (в'язкопружне), коли вирішальне значення має внутрішнє тертя у змащувальному матеріалі, і виникає при збільшенні відносних швидкостей переміщення.

---

Основною характеристикою тертя є коефіцієнт тертя  $\mu$ , який визначається матеріалами, з яких виготовлені поверхні взаємодіючих тіл.

У найпростіших випадках сила тертя  $F$  і нормальне навантаження (або сила нормальної реакції)  $N_{\text{normal}}$  пов'язані нерівністю [3-8]:

$$F \leq \mu \times N_{\text{normal}}$$

У табл. 3.1. наведено приклади пар тертя [3].

Таблиця 3.1. Приклади пар тертя

| Пари матеріалів       | Коеф. тертя, $\mu$ спокою | Коеф. тертя, $M$ ковзання |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| Сталь-Сталь           | 0,5—0,8 <sup>[2]</sup>    | 0,15—0,18                 |
| Гума-Сухий асфальт    | 0,95—1                    | 0,5—0,8                   |
| Гума-Вологий асфальт  |                           | 0,25—0,75                 |
| Лід-Лід               | 0,05—0,1                  | 0,028                     |
| Гума-Лід              | 0,3                       | 0,15—0,25                 |
| Скло-Скло             | 0,9                       | 0,7                       |
| Нейлон-Нейлон         | 0,15—0,25                 | -                         |
| Полістирол-Полістирол | 0,5                       | -                         |
| Плексиглас, оргскло   | 0,8                       | -                         |

### **Закон Амонтона - Кулона** (з урахуванням адгезії)

Для більшості пар матеріалів значення коефіцієнта тертя  $\mu$  не перевищує 1 і знаходиться в діапазоні 0,1 - 0,5.

Якщо коефіцієнт тертя перевищує 1 ( $\mu > 1$ ), це означає, що між контактуючими тілами є сила адгезії  $F_{\text{adhesion}}$  і формула розрахунку коефіцієнта тертя змінюється на [3]:

$$M = (F_{\text{friction}} + F_{\text{adhesion}}) / N_{\text{normal}}$$

### **3.3. Прикладне значення процесів тертя і зношування. Триботехнічні випробування**

#### **Тертя в механізмах і машинах**

У більшості традиційних механізмів (ДВС, зубчасті шестерні, підшипники вузлів друкарської техніки, автомобілі та ін.) тертя відіграє негативну роль, зменшуючи ККД механізму.

Для зменшення сили тертя використовуються різні натуральні і синтетичні масла і мастила.

В сучасних механізмах для цієї мети використовується також напилення покриттів (тонких плівок) на деталі.

З мініатюризацією механізмів і створенням мікроелектромеханічних систем (МЕМС) і наноелектромеханічних систем (НЕМС) величина тертя в порівнянні з діючими в механізмі силами збільшується і стає досить значною, і при цьому не може бути зменшена за допомогою звичайних мастил, що викликає значний теоретичний і практичний інтерес інженерів і вчених до даної області.

Для вирішення проблеми тертя створюються нові методи його зниження в рамках трибології, науки про поверхні і триботехнічного матеріалознавства.

**Триботехнічні (трибологічні) випробування** є основним етапом раціонального циклу досліджень зносостійкості виробів. Такі випробування проводяться з метою підбору пар тертя і визначення їх властивостей в конкретних експлуатаційних умовах.

Процеси проектування і модернізації механізмів пов'язані з необхідністю прогнозування працездатності та терміну їх служби в конкретних умовах експлуатації.

Для цього деталі вузлів піддаються раціональному циклу випробувань – сукупності натурних і модельних досліджень, об'єднаних в ієрархічну структуру.

Одним з основних етапів цього циклу є триботехнічні випробування – дослідне визначення сумісності пари тертя машини в процесі забезпечення контактної взаємодії її елементів.

**Метою** таких випробувань є оцінка триботехнічних характеристик конструкції при різних зовнішніх впливах і навколишніх умовах.

Обов'язково проводяться триботехнічні випробування тих вузлів, *від зносостійкості яких залежить надійність і безпека функціонування всієї установки*, а також техніко-економічні характеристики.

### **3.4. Етапи триботехнічних випробувань**

Процес **визначення зносостійкості** матеріалів починається в лабораторії і поступово наближається до реальних умов експлуатації механізмів.

Першим етапом досліджень є безпосередньо підбір зразків, які будуть піддаватися випробуванням. Вибір робиться виходячи з умов експлуатації вузлів на основі даних про сумісність матеріалів.

Після визначення фізико-механічних характеристик пари тертя проводять попередній підбір мастил (якщо це литі матеріали) для обслуговування механізму, які можуть проходити випробування разом із зразками.

Дослідне визначення меж сумісності деталей і їх фрикційної теплостійкості здійснюється за допомогою **машини тертя**.

---





Рис. 3.1. Приклад машини тертя

Така установка (рис. 3.1.) забезпечує щільне притиснення досліджуваних елементів.

Завдяки блоку навантаження, що контролюється пультом управління, створюється необхідне навантаження.

В результаті визначається зносостійкість матеріалів в умовах підвищених навантажень і тертя.

Лабораторні випробування повинні проводитися з урахуванням Держстандартів та іншої документації, що регламентує процес дослідження.

Тільки таким чином можна отримати достовірні дані про надійність і зносостійкість матеріалів.

Якщо на етапі досліджень на машині тертя використовувалися 17р.171717асштабні зразки матеріалів, то наступний етап – стендові дослідження – передбачає тестування вузлів в умовах лабораторії.

Відмінною особливістю даної стадії є те, що випробування проводиться на моделі, стенді, що конструкційно повторює частину машини, в якій буде експлуатуватися механізм (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Стендові триботехнічні випробування

Найдорожчий і триваліший процес – натурні випробування. Він передбачає дослідження вузлів, які успішно пройшли всі попередні етапи, в реальних умовах експлуатації.

Послідовне проведення всіх етапів триботехнічних випробувань дозволяє отримати повну інформацію про особливості функціонування конкретної пари тертя.

Ці дані використовуються при проектуванні та вдосконаленні механізмів будь-яких машин, агрегатів і обладнання.

#### **РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ ДЕТАЛЕЙ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН**

Прогресивний розвиток сучасної техніки у різних галузях промисловості України і, перш за все, у машинобудуванні, надало проблемі підвищення довговічності машин та механізмів величезної значимості. Окрім завдань створення об'єктів нової техніки не менш важливою проблемою у машинобудуванні є удосконалювання існуючого парку обладнання з позицій сучасних вимог з метою підвищення його працездатності та надійності, подовження строку служби машин та обладнання.

Збільшення терміну корисного використання машин, апаратури, механізмів та устаткування, навіть у невеликій мірі, рівносильне введенню значних нових виробничих потужностей.

Питання еволюції техніки і, у першу чергу, її важливішої галузі машинобудування, що передбачає підвищення якості високопродуктивного обладнання, сучасних машин, устаткування, приладів тощо - все це нерозривно пов'язано з проблемою розвитку новітніх технологій у машинобудуванні.

Окрім зазначеного, вимоги науково-технічного прогресу потребують нових матеріалів, які поряд із звичайним комплексом механічних та технологічних властивостей мали б особливі функціональні характеристики, зокрема такі, що суттєво підвищують надійність та довговічність об'єктів машинобудування та приладобудування.

Тому у загальній проблемі підвищення якості машин та устаткування, ресурс роботи яких здебільшого визначається опором деталей машин різним видам контактної взаємодії, центральне місце займають питання використання матеріалів третьових сполучень, насамперед, антифрикційних матеріалів, які застосовуються у вузлах тертя поліграфічних машин. Це у повній мірі стосується підшипникових матеріалів, що працюють з мастилом у неважких умовах роботи (невисокі навантаження, швидкості ковзання, температури до 100 °С), а особливо це важливо для вузлів тертя, що працюють у екстремальних умовах – при підвищених навантаженнях (3–8 МПа) та температурах (250–800 °С) або при високих швидкостях ковзання (20–100 м/с), оскільки 80% відмов машин і механізмів у роботі відбувається через руйнування третьових деталей [9-12].

Такі явища притаманні, насамперед, вузлам тертя високообертового поліграфічного обладнання, устаткування термічних цехів, транспортних засобів та установок нагрівання та переміщення виливків, апаратури та устаткування відцентрового обладнання, енергетичного устаткування.

Так, за даними Державного видавництва «Преса України», Державного підприємства Поліграфічний комбінат «Україна» та ПрАТ «Завод експериментальних промислових технологій» (м. Київ) термін роботи підшипників з литої бронзи БрАЖ9-4 у вузлах тертя друкарських машин KBA Rapida-105, «PLAMAG Rondoset RO 170», «STAR BINDER 1509» та ін., які працюють при високих швидкостях обертання та підвищених навантаженнях, коли на контактних поверхнях виникають температури до 400°C, третьові деталі з литих алюмінієвих сплавів у ножових різальних машинах WOHLBERG Trim-tec 560, WOHLBERG Trim-tec 607, у фальцапаратах HEIDELBERG IF-50 ST та ін. складає лише 0,5–1,0 рік, що пов'язано передусім з недосконалістю існуючих технологій їх виготовлення та наступної фінішної механічної обробки контактних поверхонь, наслідком чого є збільшення браку друкарської продукції [9-12].

Дія підвищених температур та питомих навантажень, високі швидкості ковзання, вплив окислювальної атмосфери - ось неповний перелік агресивних факторів, що спричинюють інтенсивне зношування вузлів тертя задіяного обладнання.

Для перелічених надважких умов роботи розроблено і традиційно використовуються у теперішній час великий асортимент литих антифрикційних матеріалів на основі чорних та кольорових сплавів.

Головне, що об'єднує ці матеріали – великий знос сполучених деталей, зростання коефіцієнтів тертя за таких умов. Крім цього, литі матеріали, що застосовуються у важких умовах роботи, а саме, литі нержавіючі сталі, нікелеві сплави, бронзи, бабіти, нездатні поєднувати у своєму складі відмінні за природою та цільовим додаванням домішки, що з одного боку утворювали б міцну матрицю, а з іншого – містили б антизадирні присадки. Вказані аргументи є причиною швидкого зносу литих матеріалів, виходу з ладу вузлів тертя, і агрегатів у цілому, що викликає потребу виготовлення у великих кількостях запасних частин, залучення до технологічного циклу додаткових потужностей, скорочення строків міжремонтних періодів тощо [9-12].

Композиційні антифрикційні матеріали позбавлені цих недоліків і мають перед литими матеріалами багато переваг і широкий спектр можливостей, особливо за умови роботи у важких режимах, коли стає можливим поєднувати компоненти, що методами лиття не поєднуються.

Технологія порошкової металургії на відміну від традиційних методів лиття дозволяє виготовляти композиційні антифрикційні матеріали різноманітного складу з наявністю в матеріалі рівномірно розподілених включень речовин, що відіграють роль твердої змащувальної речовини - графіту, сульфідів, селенідів, фторидів і інших сполук, що активно беруть участь у створенні плівок тертя, так званих вторинних структур, які утворюються на поверхнях контактуючих деталей у процесі роботи і чинять вирішальний вплив на функціональні властивості підшипнику та його надійність і довговічність у цілому.

Крім того, до складу композиційного матеріалу можна вводити тверді зносостійкі домішки типу карбідів та інших твердих сполук, що мають невисокий коефіцієнт тертя і приймають на себе навантаження, підвищуючи несучу здатність підшипнику. У широких межах можна регулювати дисперсність включень та їх розподіл у матеріалі деталі тертя.

Так, у спечених матеріалах можна зробити каркас із міцного матеріалу, порожнини в якому заповнені м'яким матеріалом або сплавом, здатним відігравати роль твердого мастила. І навпаки, в матриці з м'якого матеріалу можуть бути розподілені тверді включення, що підвищують його несучу здатність.

Всі ці особливості відкривають великі технологічні можливості для спрямованого регулювання властивостями антифрикційних матеріалів стосовно до конкретних умов їх роботи, забезпечення необхідної поверхневої й об'ємної міцності матеріалу і перебігу складних хімічних, механо-хімічних, дифузійних процесів, що сприяють утворенню прошарку вторинних структур з оптимальними антифрикційними властивостями.

Враховуючи вищевикладене, автори навчального посібника, на відміну від традиційних методів лиття, використовували методи порошкової металургії для синтезу нових композиційних підшипникових матеріалів для широкого діапазону умов роботи, що надало можливість здійснювати розробку матеріалів з наперед прогнозованими структурою та властивостями, завдяки присутності в їх складі різноприродних речовин [9-12].

Втім суттєвим негативним чинником для порошкових матеріалів, що перешкоджає їх широкому використанню, є їх надзвичайно висока вартість унаслідок дорогої вихідної сировини (порошків), складності та дорожчечі обладнання для її виготовлення.

Водночас Програма розвитку ресурсощадних технологій України передбачає широке розроблення та впровадження у промисловість нових наукоємних конкурентоспроможних технологій, що забезпечують значне підвищення якості продукції за умови суттєвої економії ресурсів у процесі її виготовлення з одночасним поліпшенням екологічних чинників.

Слід також підкреслити, що в умовах сучасного виробництва зростає продуктивність, економічність і надійність машин, знижується їх маса на одиницю потужності, підвищується точність виробів.

У теперішній час в машинобудуванні випускаються вироби, які мають високі експлуатаційні характеристики при мінімальних витратах праці. До основних чинників підвищення технічного рівня машинобудування відноситься впровадження високоефективних технологічних процесів, комплексної механізації і послідовне проведення автоматизації виробництва. Особливо важливе здійснення цих заходів в тих виробничих процесах, де на даний момент все ще використовується ручна праця, недостатня механізація і автоматизація [9-12].

У машинобудівних галузях промисловості все більше уваги приділяється фінішним етапам обробки деталей різного призначення, зокрема, деталям контактної взаємодії - підшипникам ковзання.

Це обумовлено точністю і надійністю застосованого технологічного устаткування. Тому будь-який сучасний метод обробки на фінішних етапах є актуальним і його дослідження дозволяє поліпшити якість виробництва, зменшити собівартість, а також відмовитися від використання висококваліфікованої робочої сили.

Зокрема, від якості контактних поверхонь деталей тертя для жорстких умов експлуатації після фінішної механічної обробки у значній мірі залежить характер утворених плівок тертя – вторинних структур, котрі здатні забезпечити стабільну і надійну роботу вузла тертя і усього агрегату у цілому [11, 12].

Необхідно підкреслити, що основні параметри якості поверхонь оброблення деталей машин (геометрична точність, значення параметру шорсткості  $R_a$ , величина наклепу на поверхні обробки та глибини його проникнення у тіло деталі, величини й знаку залишкових напружень у поверхневому шарі обробки) суттєво впливають на зносостійкість, довговічність та ремонтоздатність механізмів.

Тому створення новітніх технологій фінішної обробки деталей з нових марок зносостійких композиційних сплавів – тонке шліфування поверхонь найсучаснішими абразивами та інструментами з синтетичних надтвердих матеріалів (алмази синтетичні, кубоніти, ельбор, боразон), прецизійна машинна доводка, хонінгування, суперфінішування та магнітно-абразивна обробка (МАО) та їх застосування у виробництві у значному ступені визначають хід процесу їх зношування при експлуатації. Таким чином, подальше підвищення продуктивності фінішних операцій і поліпшення якості виробів, їх довговічності і надійності неможливо без створення нових і вдосконалення існуючих технологічних методів остаточної обробки [9-12].

Виготовлення деталей з одного і того ж матеріалу, але за різною технологією і різними режимами призводить до різкого коливання властивостей поверхневого шару. При цьому довговічність може розрізнятися в десятки разів.

Все це свідчить про велике значення фінішних методів обробки і підтверджує

необхідність обґрунтованого вибору методу і призначення оптимальних режимів фінішної обробки деталей.

Тому розробка науково обґрунтованої технології виготовлення і фінішної обробки деталей з нових композитів є **актуальною** як з наукової, так і з практичної точок зору для одержання ефективних композиційних високозносостійких матеріалів для важких умов роботи поліграфічних машин.

Розглянемо технологічні заходи тонкої механічної обробки нових композитів на прикладі композитів на основі нікелю.

#### **4.1. Магнітно-абразивна обробка поверхонь композитів на основі нікелю для високошвидкісної друкарської техніки**

Відомо [9-12], що різке збільшення швидкостей техніки супроводжується суттєвим збільшенням температур деталей пар тертя (іноді до рівня 700–800°C) та питомих тисків у межах 5–8 МПа. Це обумовлює підвищене зношування поверхонь тертя, особливо, підшипників ковзання, а отже, і втрату довговічності машини, зниження параметрів ремонтоздатності і, врешті-решт, зниження одного з основних показників надійності – коефіцієнта готовності [11,12].

Разом з тим, технічні параметри зносостійкості поверхонь деталей тертя (незалежно від матеріалу деталі) визначаються кінцевими значеннями показників параметрів якості поверхонь після їх фінішної механічної обробки.

З фундаментальних засад технології машинобудування відомо, що якість поверхні – комплексне поняття, яке включає в себе геометричну точність, шорсткість, параметри наклепу поверхневого шару (ступінь наклепу та глибина його залягання у тіло деталі), а також рівень і знак (розтяг чи стиск) залишкових напружень поверхні оброблення [9-12].

У зв'язку з тим, що новітні антифрикційні та високозносостійкі композиційні матеріали науковцями створені відносно нещодавно на даний час розгалужених досліджень якості поверхонь їх механічного оброблення не проводилось. Виходячи із загальноприйнятих технологічних поглядів, встановлено, що на параметри якості впливають методи фінішного оброблення (тонке шліфування, прецизійна машинна доводка, суперфінішування, хонінгування, магнітно-абразивне оброблення), тип абразивного інструменту (карбід кремнію зелений, електрокорунд білий, монокорунд, карбід кремнію чорний, електрокорунд хромчастий, електрокорунд білий титанистий, надтверді синтетичні матеріали – алмаз синтетичний, кубічний нітрид бору, ельбор, боразон, кермети різного складу), зернистість абразивного інструменту (крупнозернистий, дрібнозернистий), застосування та склад мастильно-охолоджуючого середовища, точності параметрів верстатного обладнання, прецизійність технологічних пристроїв, приладів та спеціального нестандартного обладнання [9-12].

Саме тому актуальним є виконання технологічних досліджень щодо всебічного вивчення впливу різних факторів на якість поверхонь оброблення деталей тертя поліграфічних машин з новітніх сучасних марок високо зносостійких композиційних матеріалів.

Нижче наведені особливості методологічного забезпечення параметрів якості поверхонь оброблення деталей з нових композитів.

При магнітно-абразивній обробці (МАО) позитивні результати забезпечує змазувально-охолоджуюча технологічна речовина на основі оксидетільованих алкіфенолов [9-12].

Слід зазначити, що цей склад МОР є прийнятним як для оброблення методами MAO композитів, що отримані з відходів ви соколегованих інструментальних та швидкорізальних сталей, так і для композиційних сплавів, синтезованих на базі кольорових матеріалів (нікель, мідь, алюміній).

#### 4.2. Фінішне оздоблювально-викінчувальне магнітно-абразивне оброблення поверхонь тертя деталей з нікелевих композитів друкарських машин

Для забезпечення високих параметрів якості різних поліграфічних машин, у яких використовуються деталі тертя, їх робочі контактні поверхні підлягають щільній оздоблювальній обробці. Геометричні розміри і необхідні параметри точності найчастіше забезпечують тонким алмазно-абразивним шліфуванням, причому для обробки поверхонь внутрішніх отворів використовують прецизійне внутрішнє шліфування, для обробки зовнішніх діаметрів виробів - прецизійне зовнішнє кругле шліфування, а для обробки площинних поверхонь (у разі необхідності) – площинне шліфування з використанням відповідного верстатного обладнання, пристроїв і інструменту [9-12].

Наразі створено нові марки порошкових високолегованих сплавів, які призначені для забезпечення умов експлуатації підшипників при підвищених навантаженнях і швидкостях обертання до 600 об/хв.

У цих умовах надзвичайно важливим є забезпечення розмірної стійкості підшипників ковзання і забезпечення відповідної якості поверхонь тертя.

Слід зазначити, що основу одного з типів нових композиційних підшипників складає нікель – це порошковий сплав ЭИ 929-СаF<sub>2</sub>.

Такі підшипники на основі нікелевого сплаву ЭИ 929 для ротаційних друкарських машин працюють при навантаженнях *P* від 3,0 до 4,0 МПа та швидкостях обертання *V* від 400 до 600 об./хв. Склади досліджуваних підшипників наведено у табл. 4.1[9].

Таблиця 4.1. Хімічний склад сплаву ЭИ 929

| Елемент           | C         | W       | Cr       | Mo      | Ti      | Al      | Co       | V       | B         | Ce        | CaF <sub>2</sub> | Ni    |
|-------------------|-----------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|-----------|-----------|------------------|-------|
| Кількість, мас. % | 0,04-0,10 | 4,5-6,5 | 9,0-12,0 | 4,0-6,0 | 1,4-2,0 | 3,6-4,5 | 2,0-16,0 | 0,2-0,8 | 0,01-0,02 | 0,01-0,02 | 4,0-8,0          | решта |

Примітка: вміст сірки не більше 0,01 мас.%, фосфору – не більше 0,015 мас.%.

До складу композиційних підшипників вводили тверду змащувальну речовину - фторид кальцію (СаF<sub>2</sub>). Загальна технологія виготовлення композиційного підшипникового сплаву на основі нікелевого сплаву ЭИ 929 полягала в тому, що компоненти вихідної шихти – розпилені порошки нікелевого сплаву ЭИ929 та твердої змазки (фториду кальцію) змішували. Для покращення спресованості при отриманні заготовок у цю суміш вводили пластифікатор. Гарячим ізостатичним пресуванням сумішей ЭИ929+СаF<sub>2</sub> пресувалась при 1200 °С, *p*=140 МПа, потім отримували заготовку, що підлягала подальшому механічному обробленні. Заготовки під впливом ізостатичного тиску та високої температури в газовому середовищі пресуються майже до своєї теоретичної питомої щільності (щільність заготовок складала 99,9 %). Далі заготовку оброблювали механічно.

Отже ці сплави відносяться до групи структурно-чутливих, які змінюють свої властивості (міцність, мікротвердість, глибину і ступінь наклепу) під дією навіть незначних навантажень, що значно менші ніж зусилля шліфування при обробці прецизійних отворів підшипників ковзання.

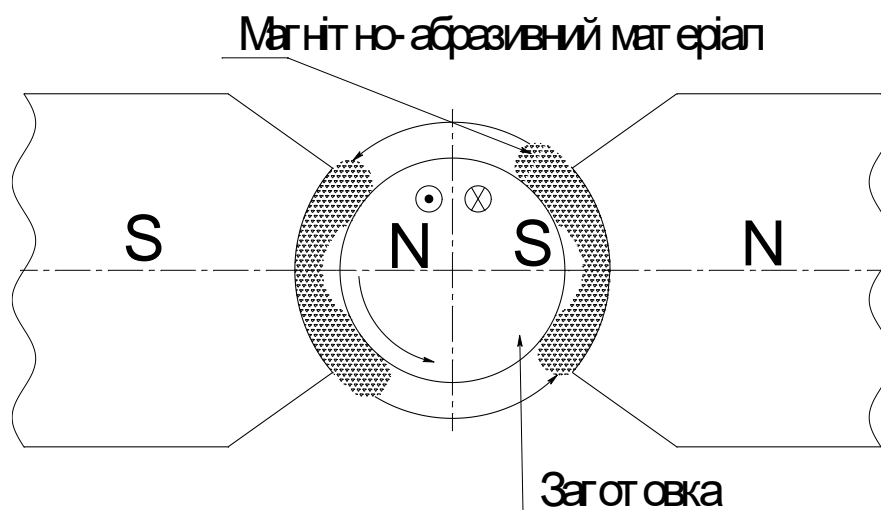
Внаслідок цих змін відбувається погіршення властивостей поверхневих шарів, що веде до погіршення експлуатаційних параметрів підшипників, а відтак і машин, а у ряді випадків – до створення аварійних ситуацій і простоїв відповідних технічних систем.

Тому, поряд з створенням нових марок матеріалів, для інженерної практики велике практичне значення мають дослідження процесів їх механічної обробки і розробка на цій базі технологічних процесів для виробництва.

При вивченні впливу процесу шліфування на висоту нерівностей та параметри наклепу зразків з матеріалів на основі нікелю (системи ЭИ 929- $\text{CaF}_2$ ) було доведено, що використання шліфувальних кругів з карбіду кремнію зеленого зернистістю 14 мкм на гліфталевій зв'язці 6ЗСМ14Гл забезпечує отримання найкращих параметрів якості.

Для подальшого покращення якості поверхонь підшипників ковзання було прийнято рішення дослідити вплив абразивного матеріалу зв'язаного магнітним полем, а саме вплив методу магнітно-абразивного оброблення (МАО) на кінцеві параметри шорсткості, наклепу та інших параметрів якості досліджуваних матеріалів. Адже на основі аналізу опублікованих джерел можна зробити висновок, що тонке шліфування здатне забезпечити лише шорсткість 0,08-0,04 мкм, наклеп 2-15 мкм та спотворення II - го роду  $9 \cdot 10^{-4}$ .

МАО є процесом оброблення деталей в середовищі феромагнітного абразивного порошку, утримуваного силами магнітного поля в робочій зоні. Магнітно-абразивний матеріал розташовується між полюсами електромагнітів, створюючи ріжучий інструмент («щітки»), щільністю якого можна варіювати в широких межах, змінюючи напруженість магнітного поля в зазорах. Використання енергії магнітного поля при абразивному обробленні дозволяє підвищити продуктивність та якість підшипників поліграфічних машин. Принципові схеми оброблення підшипнику в магнітному полі феромагнітними порошками наведені нижче рис. 4.1 [9-11]. При русі підшипників через робочу зону абразивний порошок охоплює оброблювану деталь, чинячи тиск на неї в кожній точці поверхні. Наявність тиску, що діє на підшипник з боку порошку по нормалі (магнітного походження) і тангенціальній складовій, приводить до знімання металу і згладжування мікронерівностей на поверхні деталі.



Особливостями методу [9] MAO є:

1) безперервний контакт абразиву з поверхнею виробу, що знижує циклічні навантаження на систему станок - пристрій - інструмент - деталь (СПІД) і сприяє поліпшенню точності геометричних розмірів і форми оброблюваної поверхні;

2) відсутність жорсткого кріплення абразивного зерна в зв'язці, що сприяє мимовільній нівеляції ріжучого інструменту щодо складної геометрії оброблюваної поверхні, що знімає вірогідність появи в зоні різання критичного тиску і температур, збільшує стійкість зерна, підвищує фізико - механічні показники якості поверхневого шару матеріалу виробу;

3) можливість управління жорсткістю абразивного інструменту в осьовому і подовжньому напрямках і за рахунок цього, регулювання знімання металу з формоутворювальної поверхні виробу і поєднання чорнової, чистової і фінішної обробки без зміни технологічних баз і переустанови деталі;

4) відсутність тертя зв'язки об поверхню виробу, що істотно знижує сталу температуру абразивної обробки;

5) можливість різання завжди найбільш гострою кромкою абразивного зерна (при цьому відпадає необхідність періодичної перезаточування абразивного інструменту);

6) проникнення стружки диспергованого металу, між абразивними зернами, що знімає вірогідність засалювання абразивного інструменту і виключає процес припрацювання (припинення різання) ;

7) забезпечення знімання матеріалу протягом всього періоду обробки, що дозволяє шліфувати високолеговані та важкооброблювані і не термооброблені матеріали;

8) можливість зміцнення поверхневого шару матеріалу виробу, дроблення елементів кристалічної решітки з утворенням дрібнодисперсних фаз і зниження залишкової розтягуючої напруги (отриманих на попередній операції шліфування кругом, брусом, абразивною стрічкою) з перетворенням їх в стискаючі;

9) здійснення розмірної або безрозмірної (декоративної) обробки, що забезпечує за 10-120 с знімання металу 0,002-0,5 мм на діаметр; зниження шорсткості з  $R_a = 1,25-0,32$  мкм до  $R_a = 0,08-0,01$  мкм або з  $R_a = 10 - 2,5$  мкм до  $R_a = 0,32-0,08$  мкм; збереження геометричних розмірів в межах допуску, залишеного після операції шліфування.

Перевагами MAO деталей в магнітному полі є повна механізація шліфувально-полірувальних операцій складнопрофільних виробів типу тіл обертання, що дозволяє підвищити продуктивність праці в 3-5 разів в порівнянні з існуючими методам абразивної обробки.

При абразивному обробленні в магнітному полі (залежно від габаритів, матеріалу і форми, геометрії) деталь обертається, осцилює або знаходиться в нерухомому стані. Полюси магніту відповідно нерухомі, осцилюють або здійснюють відносні рухи. Магнітне поле наводиться від постійного електромагніту або отримується шляхом випрямлення змінного струму.

Класичні технологічні операції при MAO проводяться в наступній послідовності: 1) завантаження деталі в зону обробки вручну або за допомогою транспортного ротора, або робота-маніпулятора; 2) подача в зону різання встановленої порції абразивного порошку з автоматичного бункера-дозатора; 3) повідомлення виробу (або полюсам магніту) відносних рухів; 4) подача в зону різання рідини MOP; 5) демагнітизація і миття готової деталі.



### 4.3 Магнітно-абразивне оброблення циліндричних поверхонь підшипників

При MAO зовнішніх циліндричних поверхонь найбільш широкого практичного використання отримала схема, показана на рис. 4.2). Оброблювана деталь за даною схемою кріпиться в центрах чи консольно в патроні, розміщуючись поміж полюсами електромагніту. Якщо довжина оброблюваної поверхні не перевищує 80 мм, довжину полюсів доцільно вибирати рівною довжині заготовки. Робочими рухами в даному випадку є обертання заготовки (головний рух різання) та осциляція (допоміжний рух), яку можна надати як заготовці, так і полюсам індуктора. Дану схему ефективно використовують для шліфування магнітопровідних заготовок з діаметром оброблюваної поверхні від 15 до 200 мм та довжиною твірної  $L$  не більше 200-250мм, а також тонкостінних немагнітних втулок, які кріплять на магнітопровідній оправці.

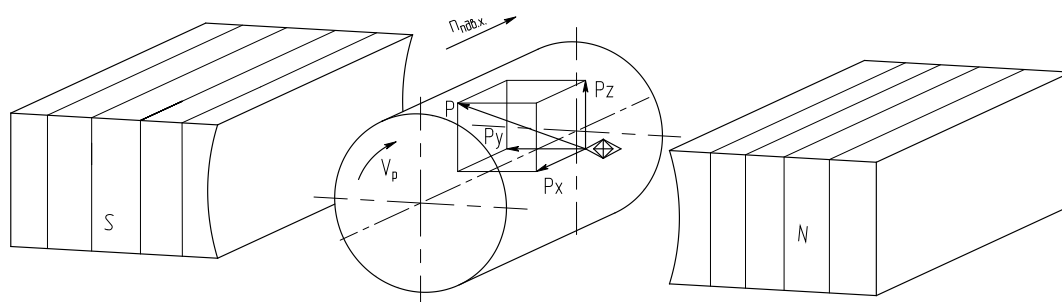


Рисунок 4.2 Схема оброблення циліндричних деталей в магнітному полі ферромагнітними порошками

Також дану схему можна використовувати і при шліфуванні переривчастих поверхонь (рис. 4.3). Для того щоб абразивний порошок знаходився лише в заданих зонах, робоча поверхня полюсних наконечників в цьому випадку повинна бути також переривчастою, розділеною у відповідних місцях кільцевими пазами.

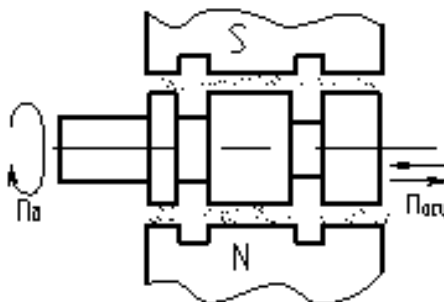


Рисунок 4.3 Схема зовнішнього круглого шліфування переривчастих поверхонь

При обробленні довгих поверхонь більшість із вказаних труднощів можна оминати, якщо використати схему, показану на рис. 4.4.

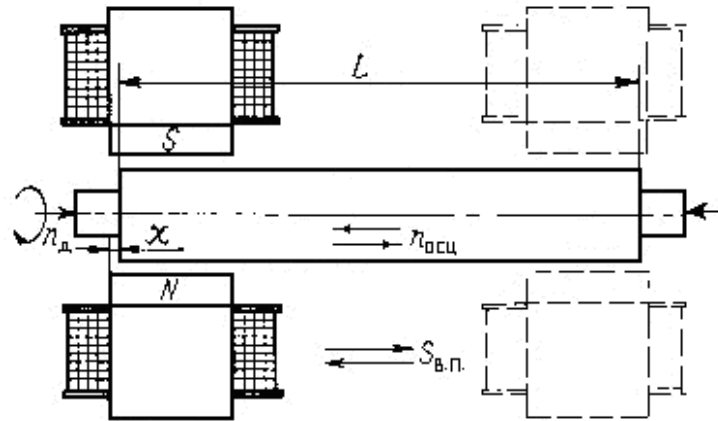


Рисунок 4.4 Схема зовнішнього круглого шліфування довгих поверхонь

В даному випадку деталь отримує також рух різання – обертання, а електромагніт зворотно-поступальне переміщення вздовж осі деталі зі швидкістю подачі  $S_{в.п.}$ . Необхідно надавати деталі або полюсним наконечникам третій (осцилюючий) рух, оскільки він в декілька разів зменшує тривалість оброблення і допомагає утримувати магнітно-абразивний порошок в робочих зазорах. В тому випадку, якщо використовуються два робочих рухи:  $V_{нд}$  і  $S_{в.п.}$ , сила тертя, що діє на зерно порошку зі сторони поверхні деталі, зміщує всю абразивну масу відносно полюсів в напрямку протилежному  $S_{в.п.}$ . В результаті абразивна маса відстає від полюсів і оброблювані поверхні, що розміщені поблизу торців, не підлягають обробленню. Для ліквідації цієї проблеми необхідно збільшувати довжину ходу полюсів та довжину перебігу полюсів.

Використання даної схеми дозволяє уникнути спотворення прямолінійності деталі, оскільки всі ділянки оброблюваної поверхні знаходяться в однакових умовах. До переваг можна також віднести значно менші витрати порошку кермету та більш повне використання його ріжучих властивостей. Крутний момент на шпинделі і зусилля притягання полюсів до деталі тут не залежать від довжини оброблюваної поверхні.

У випадку оброблення деталей великого діаметру по передніх схемах сама деталь стає великим магнітом. Замикаючі магнітопроводи електромагнітного індуктора через велику довжину також помітно підвищують загальний опір ланцюга. Відповідно зростає і магнітна сила обмоток та їх габаритні розміри. Магнітна система стає громіздкою та енергоємною. Вирішення цієї задачі спрощується при використанні схеми, приведеної на рис. 4.5, а. Одностороннє розміщення електромагніту відносно оброблюваної деталі дозволяє звести до мінімуму шлях проходження основного магнітного потоку  $\Phi$ . Обмотка електромагніту і вся магнітна система стають компактними, знижуючи витрати електроенергії. Робочими рухами цієї системи являються – обертання деталі  $n_d$ , переміщення магніту вздовж твірної деталі  $S_{в.п.}$  при великій її довжині, осциляція полюсних наконечників чи всієї магнітної системи.

Шліфування циліндричних поверхонь малих діаметрів ( $D < 10\text{мм}$ ) за схемами приведеним на рис. 4.3 – 4.4, мало ефективно чи, взагалі, неможливе, так як магнітно-абразивний порошок не утримується в робочих зазорах і розміщується вздовж силових ліній поля поміж полюсами електромагніту. Зерна порошку в такому положенні дуже слабо притискаються силами поля до оброблюваної поверхні і шліфування здійснюється досить повільно.

Для шліфування деталей малого діаметру може бути запропонована схема, приведена на рис. 4.5, б [12].

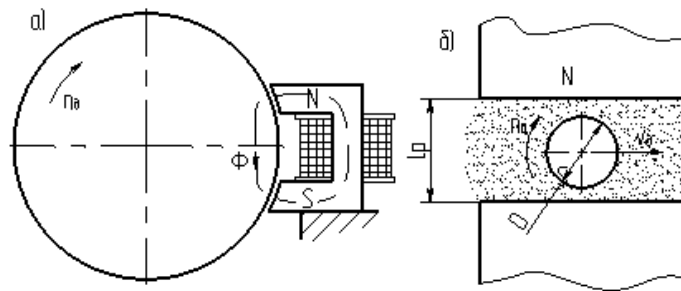


Рисунок 4.5 Схема зовнішнього круглого шліфування деталей:  
а – великого діаметру; б – малого діаметру

Полюси електромагніту в цьому випадку мають плоскі робочі поверхні і розміщуються на відстані  $Lp=D+(2...4)$  мм один від одного. Простір поміж полюсами заповнюється магнітно-абразивним порошком, зерна якого вистроюються вздовж силових ліній поля і утворюють на шляху деталі абразивну перешкоду. Жорсткістю такої абразивної перешкоди можна керувати, змінюючи напруженість магнітного поля в робочому просторі. Необхідні робочі рухи: обертання деталі  $\omega_d$ , поступальне переміщення  $V_n$  деталі вздовж полюсів електромагніту та осциляція деталі вздовж власної осі.

Однією з позитивних сторін даної схеми є можливість послідовного розміщення на шляху деталі декількох електромагнітів, робочі зони яких можна заповнити порошками з різними абразивними характеристиками, і отримати тим самим ступінчасте оброблення поверхонь з досягненням досить високої якості поверхневого шару.

#### 4.4 Вплив магнітної індукції на параметри шорсткості і наклепу при обробці поверхонь композитних підшипників ковзання

Аналіз залежності знімання металу від магнітної індукції [9-12] в робочому зазорі показує, що продуктивність абразивного різання при накладенні магнітного поля залежить від величини магнітної індукції (напруженості), а саме знімання металу спочатку із збільшенням магнітної індукції падає, досягає мінімуму при  $B=1,25$  Тл і складає 85% продуктивності абразивної обробки без магнітного поля; при подальшому зростанні індукції знімання металу росте, досягаючи значення продуктивності абразивного різання без накладення магнітного поля, а потім перевищує його 2,5 Тл на 20%.

Відома залежність:

$$Q_{ai} = Q_a \cdot K_r \quad (4.1)$$

де  $Q_a$  - знімання металу в грамах при абразивній обробці за звичайних умов,  $Q_{ai}$  - продуктивність її при тих же режимах, але з накладенням магнітного поля, то їх відношення:

$$f(B) = K_r = \frac{Q_{ai}}{Q_a} \quad (4.2)$$

де коефіцієнт  $K_f$ , що є функцією магнітної індукції, що відображає ступінь впливу магнітного поля на продуктивність абразивної обробки.

Ця залежність показує, що якщо відома продуктивність будь-якого процесу абразивного різання, то при накладенні магнітного поля магнітні силові лінії якого перпендикулярні вісі обертання деталі, за всіх інших рівних умов продуктивність його зміниться в  $K_f$  разів відповідно до магнітної індукції наведеного поля.

Оскільки магнітна індукція є основною складовою процесу MAO, то вплив її на різноманітні параметри поверхневого шару є вкрай важливим для формування кінцевих параметрів якості оброблюваної поверхні підшипнику.

Характер зміни твердості поверхневого шару деталі залежно від величини магнітної індукції при абразивній обробці в магнітному полі має наступні особливості:

1) твердість при  $B=0,1-0,3\text{Тл}$  нижче початкової і залежить від зміни магнітної індукції в робочих зазорах;

2) при значенні індукції  $B=0,075\text{ Тл}$ , твердість досягає максимуму  $764\text{ HV}$  і перевищує значення твердості, отриманої після абразивної обробки без магнітного поля, а при подальшому збільшенні індукції падає і приймає мінімальне значення -  $670\text{ HV}$  при  $0,28\text{ Тл}$ .

Ступінь впливу магнітного поля на твердість поверхневого шару при абразивній обробці деталей визначиться коефіцієнтом  $K_{HV}$  по відношенню:

$$f(B) = K_{HV} = \frac{HV_i}{HV_a}$$

де  $HV_a, HV_i$  - твердість по Віккерсу, що отримується при обробці деталі в магнітному полі до і після абразивної обробки без накладення магнітного поля відповідно.

Встановлено також, що потужність в процесі абразивного різання в магнітному полі певним чином залежить від магнітної індукції в робочих зазорах. Причому із зростанням магнітної індукції потужність спочатку зменшується, приймаючи мінімальне значення при  $B = 0,145\text{ Тл}$ , а потім зростає і при  $B = 0,28\text{ Тл}$  перевищує значення потужності абразивної обробки без магнітного поля.

Крім того, питома енергія, що витрачається на абразивну обробку деталі в магнітному полі, залежить від значення магнітної індукції в робочих зазорах: із зростанням магнітної індукції питома енергія різання спочатку зменшується в порівнянні з енергією при абразивному різанні без магнітного поля, досягаючи мінімуму при  $B = 0,145\text{ Тл}$ . Подальше підвищення магнітної індукції викликає додаткову витрату енергії на знімання одиниці ваги металу деталі, але при  $B = 0,24\text{ Тл}$  стабілізується і майже не змінюється із збільшенням індукції.

Кінцевим результатом будь-якого методу фінішного оброблення є отримання не тільки потрібної геометричної форми і розмірів деталі, але і певної шорсткості її поверхні. Тому дослідження процесу абразивного різання в магнітному полі включає, також визначення впливу магнітної індукції на шорсткість, що виходить після обробки. Встановлено, що шорсткість поверхні при обробці досліджених підшипників у магнітному полі абразивним порошком залежить від зміни магнітної індукції в робочих зазорах. При всіх значеннях магнітної індукції отримувана шорсткість нижче початкової. При індукції від 0 до  $0,155\text{ Тл}$  шорсткість поверхні виходить вище, ніж при обробленні деталі без накладення магнітного поля, а подальше збільшення магнітної індукції сприяє зменшенню шорсткості, і

отримуваний клас чистоти поверхні перевищує значення його при обробці деталі без накладення магнітного поля.

Отже, якщо відома шорсткість поверхні при якому-небудь методі фінішного оброблення деталі абразивним порошком, то клас чистоти її можна змінити у бік збільшення шляхом накладення магнітного поля на процес оброблення.

Більш детально залежності отримують емпіричним шляхом за результатами дослідження конкретних умов обробки.

Результати досліджень впливу магнітної індукції на параметри якості обробки нових композиційних підшипників матеріалів складу  $\text{ЭИ 929} + \text{CaF}_2$  наведені нижче.

#### 4.5 Вплив розмірів робочого зазору на параметри якості поверхонь оброблення

Наразі відома велика кількість обладнання, що використовується для MAO. Воно як правило, відрізняється за своїми технологічними можливостями та різноманітністю форм та розмірів магнітних полюсів. Це спричиняє, в сукупності з різноманітністю розмірів та форм оброблюваних деталей, формування унікального для кожної операції MAO магнітного зазору.

Розміри і конфігурація робочих зазорів між заготовкою, і полюсними наконечниками магнітної системи верстатів чинять істотний вплив на продуктивність MAO і якість поверхні виробу.

Форма полюсного наконечника, а отже, робочих зазорів визначає кількість зерен феромагнітного порошку, що беруть участь в процесі різання, і умови їх утримання всередині зазорів. Останні характеризуються шириною  $\delta$ , кутом обхвату виробу  $2\alpha$  (для випадку обробки тіл обертання), радіусом профілізації робочої поверхні полюсного наконечника  $R$  і його довжиною  $L$  (рис. 4.6).

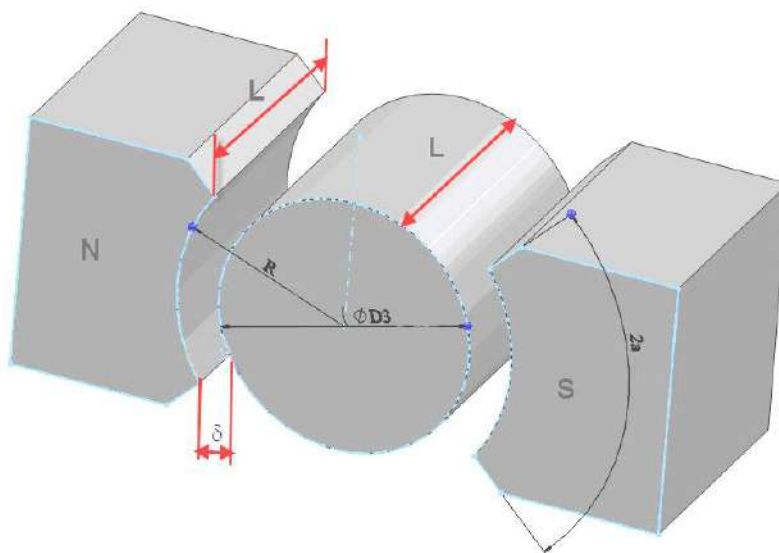


Рисунок 4.6 Форма робочого зазору

При збільшенні ширини робочого зазору  $\delta$  від 1 до 3 мм продуктивність процесу магнітно-абразивної обробки протягом перших півтора хвилин полірування залишається постійною в часі, а потім поступово знижується. Інтенсивність зниження продуктивності залежить від ширини зазорів  $\delta$ . Вказане явище пояснюється тим, що із збільшенням ширини зазору  $\delta$  полегшується викидання зерен порошку з його простору на периферію

полюсних наконечників. Причому якщо  $\delta > 3$  мм, то інтенсивність знімання помітно падає з самого початку процесу, що викликає загасання обробки. Найефективніше процес MAO протікає при  $\delta = 0,3-0,5$  мм. Слід зазначити також, що витрата абразивного матеріалу порошку пропорційна об'єму робочих зазорів, а тому збільшення  $\delta$  супроводжується підвищенням собівартості MAO.

Кут обхвату  $2\alpha$  оброблюваної поверхні полюсними наконечниками визначає кількість різальних елементів порошку, що знаходяться в робочих зазорах і одночасно беруть участь в різанні.

Збільшення кута  $\alpha$  підвищує продуктивність процесу, інтенсифікуючи знімання металу, але одночасно збільшується витрата порошку і крутний момент на шпинделі верстата, тобто споживану потужність двигуна.

Аналіз наявної інформації по дослідженнях процесу MAO показує, що найбільші магніторушійні сили будуть в зонах 1-2, 3- 4, 5-6, 7-8 (рис. 4.7).

У цих зонах концентрується найбільша кількість елементів порошку і здійснюється інтенсивне знімання матеріалу.

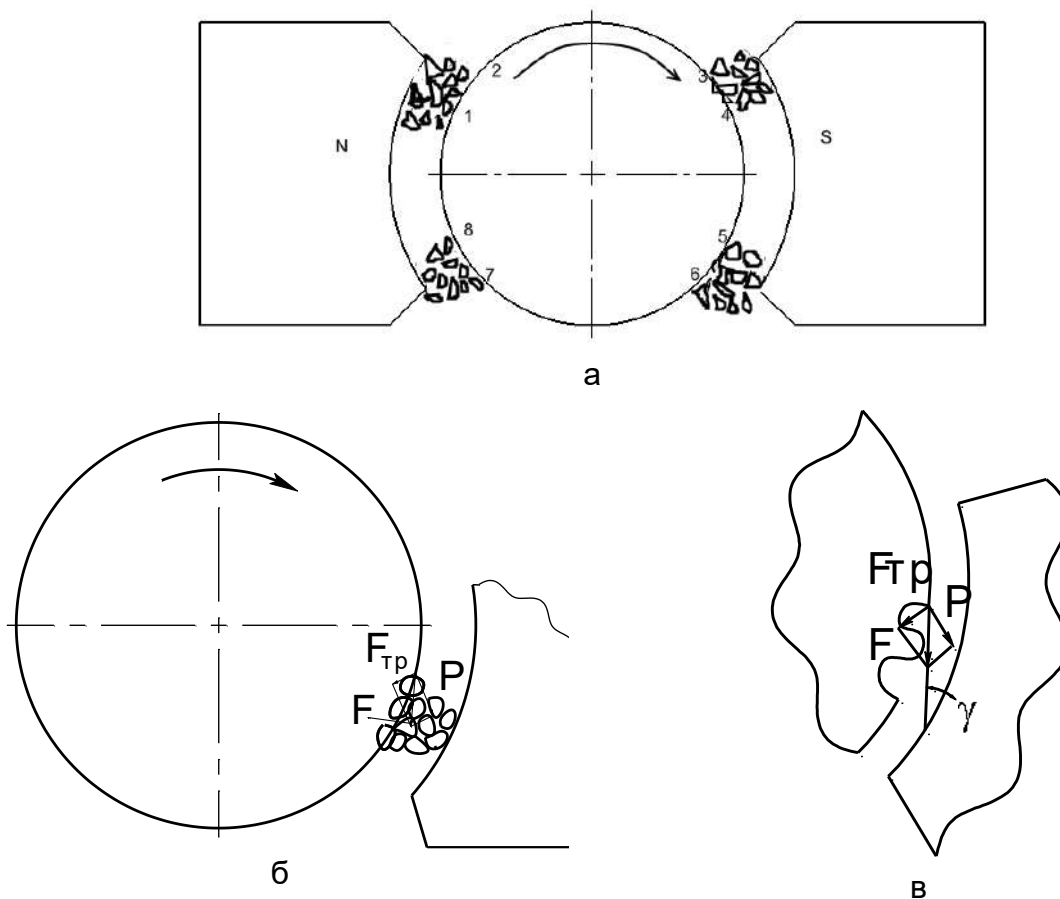


Рисунок 4.7 Зони концентрації порошку в робочих зазорах та сили, що діють в момент заклинювання

Це явище пояснюється тим, що, згідно законам електромагнітного поля, зонами найбільшої щільності магнітного потоку будуть вказані на рис. 4.7 ділянки поверхонь полюсів, оскільки тут найменша відстань між протилежними полюсами магніту.

При обертанні деталі за годинниковою стрілкою сили тертя переміщують притиснуті до поверхні заготовки елементи порошку в зоні найбільшої щільності магнітного потоку. При скупченні великої кількості порошку на ділянках 1-2 і 5-6 відбувається його ущільнення і

заклинювання в робочому зазорі, що визиває інтенсивне знімання матеріалу з поверхні заготовки. Проте, якщо ширина робочого зазору  $\delta > 3$  мм, магніторушійні сили слабшають і на ділянках концентрації потоку посилюється процес міграції елементів порошку з одного полюса на інший, що сприяє загасанню процесу обробки. З іншого боку, великі кути обхвату  $\alpha$  викликають появу порожнеч на ділянках 1-8 і 4-5, що також знижує продуктивність процесу MAO.

Оскільки сила  $F$  направлена перпендикулярно до бічної поверхні мікронерівностей і вектор її дії складає завжди кут  $\gamma > 7^\circ$  по відношенню до бічної поверхні, полюсних наконечників, то на ділянках 1-2 і 5-6 відбувається заклинювання зерен і зростання питомого тиску порошку на оброблювану поверхню. Зміна напрямку дії сили  $F$  (рис. 4.7, в) походить від зміни співвідношення між силами  $P$  і  $F_{mp}$ , величина яких, залежить від значення сил притискання зерен порошку до оброблюваної поверхні, що характеризуються силами магнітного поля в зазорах.

Отже, на сили заклинювання порошку в робочих зазорах суттєво впливає величина магнітної індукції системи, початкова шорсткість поверхні заготовки і зернистість феромагнітного порошку.

#### **4.5.1. Вплив швидкостей оброблення на якість поверхні**

Швидкість обертання деталі при постійному шляху обробки, тобто за умови, що кожна точка обробленої поверхні з різною швидкістю проходить один і той же відрізок шляху, практично не чинить вплив на знімання металу і отриману шорсткість. В умовах MAO, правильніше говорити не про вплив швидкості обертання деталі, а про вплив довжини пройденого кожною точкою поверхні деталі шляху. Очевидно, що чим більше швидкість, тим більший шлях пройде кожна точка мікронерівностей за один і той же відрізок часу або тим більша кількість разів ця точка стикнеться з ріжучими елементами порошку.

Що стосується траєкторії руху зерен порошку в процесі магнітно-абразивної обробки, то вона до певної міри залежить від значення амплітуди зворотно - поступального (що осцилює) руху деталі. Без осциляції (деталі або пороша) різко зростає шорсткість обробленої поверхні, оскільки кожен ріжучий елемент дряпає по одній і тій же канавці мікронерівностей. Із збільшенням амплітуди колювання деталі (пороша) знімання мікронерівностей росте. Подальше збільшення амплітуди осциляції небажане, оскільки із-за посилення вібрації системи СНІД шорсткість оброблюваної поверхні різко підвищується.

На знімання металу, також до певної міри впливає швидкість осциляції деталі, від якої залежить швидкість переорієнтації зерен в робочому зазорі і їх самозагострення. Зменшення осциляції знижує об'єм металу, що знімається, але сприяє отриманню вищих класів чистоти поверхні.

#### **4.5.2 Формування нерівностей поверхонь оброблення**

Формування нерівностей поверхонь оброблення відбувається на всіх, без виключення, етапах створення деталей. Тому на фінальній стадії фінішного оброблення формуються кінцеві мікронерівності, але на основі вихідної структури поверхні.

Перша стадія полірування характеризується різким зменшенням висоти нерівностей, потім цей процес сповільнюється і шорсткість стабілізується на деякому рівні (власна шорсткість). Оскільки шорсткість, що отримується на попередніх стадіях, є сукупністю як власних слідів дії зерен магнітно-абразивного порошку (МАП), так і не повністю видалених слідів попередньої обробки. При цьому не видаленими залишаються найбільш глибокі

початкові нерівності. На загальному фоні добре відполірованої поверхні такі невиведені ризики різко виділяються і псують зовнішній вигляд. Якщо деталь повинна працювати в умовах циклічних навантажень, ті ж невиведені ризики шкідливі, оскільки є концентраторами напружень [9-12].

Початкове інтенсивне зниження висоти мікронерівностей спостерігається, якщо розміри зерен МАП більше кроку початкових нерівностей. В цьому випадку зменшенню спочатку піддаються виступи нерівностей. У міру їх зниження дії ріжучих кромek зерен починають піддаватися і широкі западини нерівностей. Загальне зниження шорсткості сповільнюється з цієї причини, а також в результаті поступового видалення дефектного шару, схильного до руйнування, і утворення зміцненого шару під впливом самого МАП. Полірування грубої початкової поверхні дрібнозернистим порошком із самого початку супроводжується диспергуванням як виступів, так і западин. Зниження нерівностей при цьому відбувається поволі.

Контактна жорсткість і зносостійкості поверхонь виявляються тим більшими, чим більше дійсна площа контакту взаємодіючих поверхонь. У свою чергу, дійсна площа контакту залежить від висоти нерівностей мікропрофілю, від їх форми і кроку.

#### **4.6 Вплив магнітно-абразивного оброблення на зносостійкість та фізичні властивості поверхневого шару**

У попередніх дослідженнях були запропоновані емпіричні залежності параметрів шорсткості  $R_z$  і знімання металу  $\Delta D$  від зернистості порошку феробору, а також виявлено, що приріст зносостійкості в 1,6 разів більше, ніж після шліфування і в 1,8 разів більше, ніж після доводки. При цьому корозійна стійкість зросла на 70-80%. Виявлено зміцнення зразків із загартованих сталей 45 і ШХ15, яке мало місце безпосередньої обробки порошком, за рахунок дії тільки магнітного поля. Це явище може бути поясненим подрібненням мартенситної структури загартованої сталі, частковим розпадом мартенситу і збагаченням у зв'язку з цим поверхневого шару карбідами. Зміцнення за рахунок дії магнітного поля (критерій зміцнення - приріст мікротвердості) пов'язане з дробленням блоків мозаїки, що визначається феромагнітними властивостями оброблюваного матеріалу. При цьому збільшення початкової шорсткості веде до збільшення напруги стиснення в поверхневому шарі. Пояснити це можна тим, що більш глибока початкова шорсткість - є великим концентратором магнітно-силових ліній при обробці, і її інтенсивне видалення з допомогою феромагнітного порошку супроводжується наклепом поверхні [9-12].

Досліди показують, що в процесі MAO незалежно від знаку залишкових напружень, отриманих на попередній операції шліфування, в тонкому поверхневому шарі з'являється напруження стиснення.

При цьому, необхідно зазначити, що із збільшенням часу обробки, відбувається збільшення залишкових напружень.

Важливість вивчених характеристик, що входять в тонку кристалічну структуру, - розміри блоків мозаїки, мікроспотворення решітки (напруження II роду) обумовлена тим, що з ними пов'язані процеси зміцнення. Попередні дослідження показали, що при MAO зразків з нікелевих композитів відбувається подрібнення блоків мозаїки і збільшення напружень II роду.

Отже, можна зробити висновок, що в процесі обробки утворюється більш зміцнений тонкий поверхневий шар, ніж при вихідній обробці шліфуванням.



#### 4.7 Умови створення ювенільних поверхонь, забезпечення параметрів зносу

Нормальні умови експлуатації підшипників, що працюють без змащування, характеризуються процесом постійного утворення і руйнування якнайтонших плівок вторинних структур, що різко відрізняються за будовою і властивостями від металу усередині об'єму. Наявність вторинних захисних структур на поверхнях тертя є природною і абсолютно необхідною умовою нормальної експлуатації з'єднань, що труться без мастила. У широкому сенсі під вторинними структурами слід розуміти плівки різного складу, будови і властивостей, що розділяють ювенільні поверхні металів при їх контакті.

Характеристики якості поверхні, утвореної при технологічній обробці, і поверхні, що формується в процесі експлуатації, принципово різні. Вони різко відрізняються геометричним станом поверхні, властивостями поверхневих шарів і їх напруженістю.

На початку роботи контактних поверхонь відбувається трансформація їх початкового стану і перехід до робочого або експлуатаційного.

Цей перехід називають *припрацюванням* або періодом початкового зносу.

Існують **три періоди зносу** (рис. 4.8): 1) початковий знос, коли відбувається перехід від початкового стану поверхні до сталого; 2) сталий, такий, що відрізняється постійністю умов тертя і швидкості зносу, характерної для даних умов; 3) посилений, такий, що викликається зміною зазорів в з'єднаннях, змінами умов роботи вузла тертя.

При початковому зносі швидкість зносу весь час змінюється, наближаючись до деякої, постійній сталій величині, умови тертя поступово змінюються. Величина фактичної площі контакту збільшується, середній питомий тиск і середня температура зменшуються. На початку припрацювання питомий тиск на фактичній площі контакту значний. В кінці припрацювання їх величина відповідає допустимій для нормальної експлуатації машин. Відбувається зміна структури поверхні тертя.

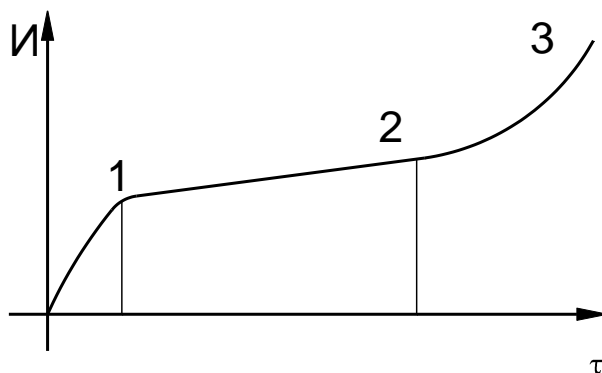


Рисунок 4.8 Залежність інтенсивності зношування від часу роботи підшипнику

Для збільшення терміну служби поліграфічних машин необхідно скоротити величину початкового зносу до мінімуму, максимально збільшити тривалість сталого і попередити настання посиленого зносу.

В процесі припрацювання поліграфічного устаткування відбувається абразивне зношування.

Це такий вид зносу, при якому характеристики роботи тертя залежать від процесів мікропластичних деформацій і зрізання металу в тонких поверхневих шарах твердими абразивними частинками, а механізм зносу визначається закономірностями, пов'язаними з процесами пластичної деформації і різання, що відбуваються в мікроскопічних об'ємах металу.

Він викликаний ковзанням, проникненням і зрізанням твердими абразивними частинками мікрооб'ємів металу в поверхневих шарах деталей, що труться. Руйнування при абразивному зносі відбувається внаслідок зрізання та зім'яття мікрооб'ємів металу і утворення стружки сколювання і зміцнених поверхневих шарів.

#### 4.8 Абразивні інструменти для магнітно-абразивної обробки композитних підшипників ковзання

Більшість схем MAO використовує у якості ріжучого інструменту порошки, зерна яких володіють магнітними та абразивними властивостями. Багато відомих феромагнітних матеріалів мають достатньо велику твердість, щоб самостійно здійснювати абразивне різання металів. Для магнітно-абразивного шліфування використані феробор, феровольфрам, борний чавун, кришки білого чавуна, сталеві загартовані голки. У деяких схемах пропонується використовувати як феромагнітні абразивні порошки механічні суміші абразивних і магнітних матеріалів.

Як абразивна складова кермету можуть бути прийняті будь-які відомі абразивні матеріали, що допускають нагрівання до 1000—1200° С. Остання умова визначається технологією виготовлення керметів. Окрім білого електрокорунду ( $Al_2O_3$ ) для виготовлення керметів застосовувалися карбіди хрому, титану, кремнію. Порівняльні експерименти показали, що один і той же кермет може показувати різну ефективність залежно від оброблюваного матеріалу. При розгляді питання про вплив зернистості, МАП на результати шліфування необхідно розділяти поняття зернистість порошку кермету  $\lambda$  і зернистість початкового абразиву  $u$ . Ці величини і співвідношення між ними, змінюють умови різання і тим самим впливають на інтенсивність видалення припуску і на шорсткість обробленої поверхні. Якщо, підтримуючи постійним значення  $\lambda$ , збільшувати  $u$ , то магнітна маса кожного окремого зерна порошку кермету повинна рости, а це повинно приводити до росту сил різання магнітного походження і до інтенсифікації знімання металу.

Нижче приведені оптимальні по продуктивності зернистості  $u$  (у мкм) порошоків для керметів різного складу [9-12]:

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| 32A M7 + 80% Fe ..... | 125—200 |
| 32A M20 + 80% Fe..... | 125—200 |
| 32A M4 + 80% Fe ..... | 125—200 |
| 32A M7+80% Fe .....   | 160—315 |

Кожний з перерахованих чинників по-своєму впливає на результати шліфування.

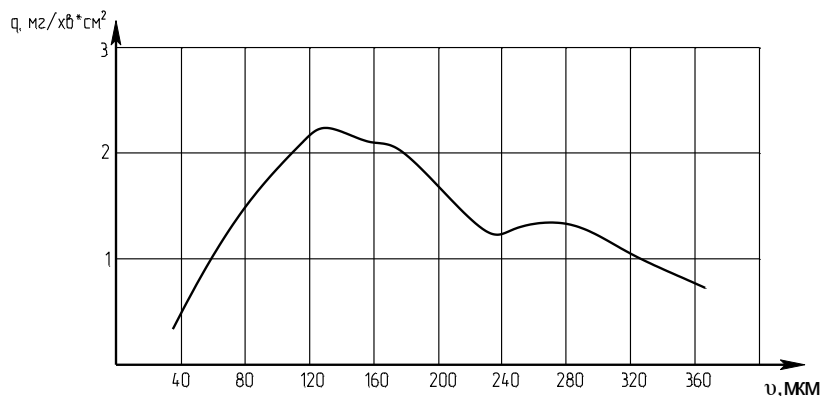


Рисунок 4.10 Вплив зернистості порошку кермету  $u$  на питоме знімання металу  $q$

Згідно сучасним уявленням про механізм роботи абразивного зерна, останнє може стружку (диспергувати метал), пластично і пружно деформувати поверхневий шар виробу. Яка саме робота здійснюється в конкретних умовах, значною мірою залежить від радіусів скруглення вершин абразивних зерен  $\rho$  і від глибини їх занурення в оброблювану поверхню  $t$ .

При постійному значенні магнітної сили, що притискує зерно порошку кермету до оброблюваної поверхні, більшому значенню  $\rho$  буде відповідати більша площа контакту і менша глибина занурення  $t$ . Глибина занурення тут автоматично реагує на зміну радіусів  $\rho$ . Встановлено, що середнє статистичне значення  $\rho$  зростає пропорційно розміру абразивного зерна. Враховуючи це при магнітно-абразивному шліфуванні слід чекати зменшення питомого знімання металу при збільшенні  $\lambda$ . Саме така тенденція спостерігається при шліфуванні як сталевих, так і нікелевих деталей з вихідною шорсткістю  $R_a = 0,1-0,16$  мкм (крива 1 на рис. 4.11).

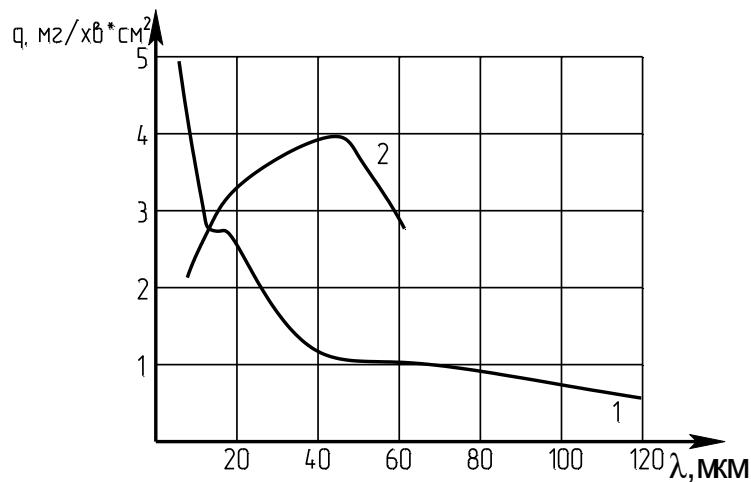


Рисунок 4.11 Вплив зернистості вихідної абразивної складової  $\lambda$  кермету на питоме знімання металу  $q$

При шліфуванні грубіших поверхонь (крива 2 на рис. 4.11) залежність істотно змінюється. Мікронерівності грубої оброблюваної поверхні, співударяючись із зернами кермету, руйнують їх, що до зменшення їх магнітної маси або до абразиву від феромагнітної складової зерна. Тому при обробленні порівняно грубих поверхонь збільшення  $\lambda$  до деякої межі (у нашому випадку—до  $\lambda=40$  мкм) до зростання знімання металу за рахунок зміцнення зерен кермету. Подальше зниження знімання пояснюється викладеним вище взаємозв'язком між збільшенням  $\lambda$  і зниженням частки відокремлюваного в стружку металу.

Варіюючи зернистістю  $\lambda$  вихідного абразиву, можна отримати потрібну шорсткість поверхні (рис. 4.11). Кермети з малими значеннями  $\lambda$  здійснюють активне різання, але не залишають глибоких рисок, за рахунок незначного виступи ріжучих кромки із феромагнітної зв'язки.

Кермети з крупним абразивом ( $\lambda > 100$  мкм) не можуть спричинити появу глибоких рисок, оскільки при великих  $\rho$  переважає не різання, а пластична деформація поверхні. Таким чином, шорсткість  $R_a = 0,025-0,04$  мкм може бути одержана керметами або з дуже дрібним абразивом ( $\lambda < 5$  мкм), або, навпаки, з крупним ( $\lambda > 100$  мкм).

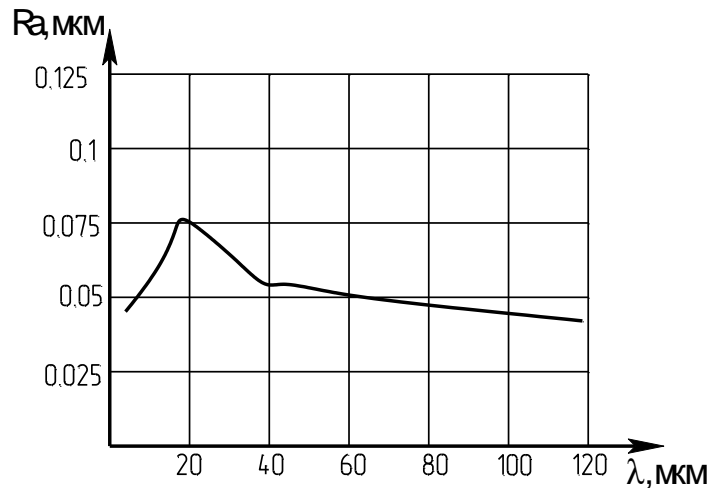


Рисунок 4.12 Вплив зернистості вихідної абразивної складової  $\lambda$  кермету на шорсткість поверхні

Вибір того або іншого значення  $\lambda$  слід з конкретними умовами роботи. Кермети з  $\lambda < 5$  мкм забезпечують продуктивне видалення достатньо великих припусків і більш рівномірну шорсткість, але не дають потрібного ефекту у грубої поверхні деталі. Кермети з  $\lambda > 100$  мкм за рахунок малих зніманих металу краще зберігають геометричну точність, поверхні, дозволяють починати оброблення з шорсткості  $R_a = 0,4-1,6$  мкм; проте на обробленій поверхні є ризики, що виходять за межі шорсткості  $R_a = 0,04$  мкм, що не завжди допустимо.

Отже, всі параметри MAO суттєво впливають на якісні показники оброблюваних поверхонь, а саме - характеристика інструментів, величина індукції в робочому зазорі, швидкість різання, розмір робочого зазору.

Шорсткість поверхні  $R_a = 0,05-0,08$  мкм з високою продуктивністю може бути одержана керметами, що містять абразив з  $\lambda = 20-60$  мкм.

Таким чином, використання методу надтонкого магнітно-абразивного оброблення на фінішних операціях виготовлення деталей вузлів підшипників ковзання з композитів на основі нікелю, є найбільш доцільним через сукупність технологічних факторів, які позитивним чином впливають на фізико-механічні властивості оброблюваної поверхні, а також, на її довговічність, надійність та експлуатаційні характеристики.

Дослідження в цьому напрямку є актуальними і такими, що дозволяють суттєво підвищити зносостійкість, надійність вузлів тертя поліграфічної техніки, а також продуктивність праці, також можливість забезпечення умов для створення ювенільних поверхонь при MAO.

#### Література

- ГОСТ 2789-73, изд. 2018 г. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
- Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. / под ред. И. Н. Жестковой. — 8-е изд. перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2001. — 920 с. ISBN 5-217-02962-5. <http://xn--80aalccoafpcpgdfcii1bzaks8eyg5cl.xn--p1ai/wp-content/uploads/2016/10/TOM-3-spravochnik-konstruktora.pdf>
- Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. Сухое трение. М.: Изд. АН СССР, 1968. -237 с. <https://ua1lib.org/book/483581/a1edf5?id=483581&secret=a1edf5>

4. Journal of Tribology. Архивная копия от 16 января 2013 на Wayback Machine, международный журнал о трении.- <https://web.archive.org/>
  5. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. Wiley-Interscience, 1995.- Онлайн-версія: Рабинович, Ернест.Тертя і знос матеріалів. Нью-Йорк: Wiley, © 1995 (OCoLC) 624432647, <https://www.worldcat.org/title/friction-and-wear-of-materials/oclc/30975974>
  6. Bowden F. P., Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids. Oxford University Press, 2001.-<https://global.oup.com/academic/product/the-friction-and-lubrication-of-solids-9780198507772?cc=ua&lang=en&>
  7. Persson Bo N. J.: Sliding Friction. Physical Principles and Applications. Springer, 2002. <https://www.amazon.com/Sliding-Friction-Principles-Applications-NanoScience/dp/3540671927>
  8. Popov V. L. Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation, Springer, 2009.
  9. Гавриш А. П., Киричок П. О., Роїк Т. А., Зоренко О. В., Олійник В. Г. Прецизійна доводка та полірування деталей поліграфічних машин з високолегованих композитів: Монографія.- К.:НТУУ «КПІ», 2016.-498 с.
  10. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Олійник В. Г. Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин: Монографія.-ч. 1.- К.: Видавничий дім „АртЕк”, 2017.-208 с.
  11. Гавриш А. П., Киричок П. О., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Олійник В. Г. Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин: Монографія.-ч. 2.- К.: Видавничий дім „АртЕк”, 2019.-132 с., ISBN 978-617-7674-76-3. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42300>.
  12. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Гавриш О. А., Киричок П. О., Віцюк Ю. Ю., Олійник В. Г. Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин: Монографія.- ч. 3.- К.: Видавничий дім „АртЕк”, 2021. – 202 с., ISBN 978-617-7814-80-0. [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41909/3/Monograph-Part3\\_2021.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41909/3/Monograph-Part3_2021.pdf)
-