

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АТ - 48.00.00.000 ПЗ

Група ААГ-26м

Пантюшенко Микита

2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Міністерство освіти і науки України
Інститут інженерної механіки та робототехніки
Кафедра автомобільного транспорту

Пантюшенко Микита Ілліч

(прізвище, ім'я, по батькові)



УДК 621.921
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Формування якості поверхонь клапанного спряження з метою підвищення зносостійкості при використанні силікатного абразивного складу

(назва роботи)

Автомобільний транспорт

(назва освітньої програми)

274-Автомобільний транспорт

(шифр і назва спеціальності)

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Виноградов Микола Семенович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)



Допущено до захисту

Завідувач кафедри

_____ Криштопа С.І.
(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент _____ Мастепан М.А.
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2025

Інститут інженерної механіки та робототехніки
Кафедра автомобільного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Спеціальність: „Автомобільний транспорт”

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завкафедрою АТ

_____ С.І. Криштопа

„_____” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Магістр _____

Пантюшенко Микита Ілліч

(прізвище, ім'я, по-батькові)

- Тема проекту:** Формування якості поверхонь клапанного спряження з метою підвищення зносостійкості при використанні силікатного абразивного складу затверджена наказом по університету від _____ № _____
- Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) 19.12.2025 р.
- Вихідні дані до проекту: Процес притирання силікатним абразивним складом та властивості поверхонь клапанного спряження оброблених силікатною пастою
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)
Вступ. 1. Стан питання та завдання досліджень. 2. Методики проведення експериментальних досліджень. 3. Експериментальне дослідження впливу технологічних чинників процесу притирання на якість оброблених поверхонь силікатним абразивним складом. 4. Експериментальне дослідження зносостійкості поверхонь оброблених силікатним абразивним складом. Висновки. Перелік посилань.
- Перелік аркушів презентаційного графічного матеріалу:
 - Тема МР
 - Актуальність роботи
 - Мета, об'єкт, предмет та задачі досліджень
 - Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів
 - Основні показники якості поверхні
 - Основні експлуатаційні властивості, що залежать від якості поверхні
 - Обладнання та пристрої для проведення дослідження
 - Схема механізму притирання силікатним абразивним складом
 - Результати дослідження комплексного впливу параметрів режиму притирання на якість оброблених поверхонь силікатним абразивним складом
 - Залежності шорсткості поверхні та знімання металу від питомого тиску на зразок та зворотно-обертальної швидкості зразка при притиранні силікатним складом
 - Результати оптимізації параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом
 - Результати дослідження зносостійкості поверхонь оброблених силікатним абразивним складом
 - Результати дослідження критичних навантажень поверхонь оброблених силікатним складом
 - Висновки

Керівник _____

Особистий підпис

/М. Виноградов/

Розшифровка підпису

Завдання прийняв до виконання _____

Особистий підпис


/М. Пантюшенко/

Розшифровка підпису

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання та завдання досліджень	03.11. – 10.11.25 р.	Виконано
2	Методи проведення експериментальних досліджень	11.11. – 15.11.25 р.	Виконано
3	Експериментальне дослідження впливу технологічних чинників процесу притирання на якість оброблених поверхонь силікатним абразивним складом	16.11. – 25.11.25 р.	Виконано
4	Експериментальне дослідження зносостійкості поверхонь оброблених силікатним абразивним складом	26.11. – 10.12.25 р.	Виконано
5	Розробка графічного матеріалу (демонстраційних слайдів)	10.12. – 18.12.25 р.	Виконано


Магістр


Особистий підпис

/М. Пантюшенко/

Розшифровка підпису

Керівник роботи


Особистий підпис

/М. Виноградов/

Розшифровка підпису

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 75 с., 22 рис., 8 табл., 15 джерел

Об'єкт дослідження – технологія відновлення поверхонь клапанного спряження силікатним абразивним складом та її вплив на зносостійкість.

Предмет дослідження – зв'язок між властивостями силікатного абразивного складу та якістю і зносостійкістю поверхонь клапанного спряження.

Мета роботи – формування якості поверхонь клапанного спряження з метою підвищення зносостійкості при використанні силікатного абразивного складу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі: провести аналіз якості поверхні деталей автомобіля; визначити вплив якості поверхні на експлуатаційні властивості деталей автомобіля; провести аналіз механізмів притирання спряжень абразивними пастами; дослідити вплив технологічних чинників процесу притирання на якість поверхні оброблених силікатним абразивним складом; оптимізувати режим притирання силікатним абразивним складом; дослідити зносостійкість та визначити критичні навантаження поверхонь тертя оброблених силікатним абразивним складом.

Практична значимість отриманих результатів полягає у запропонованні станціям технічного обслуговування силікатної пасту при відновленні клапанного спряження автомобільного двигуна, що забезпечує:

- підвищення продуктивності притирання в 1,5 рази;
- підвищення його зносостійкості в 1,5 рази;
- прискорення процесу його припрацювання в 1,6 рази;
- підвищення навантаження до заїдання в 1,6 рази.

В ході виконання магістерської роботи було використано наступні програмні продукти: MS Word та MS Excel пакету Microsoft Office 2019 Professional Plus, редактор формул Microsoft MathType, програмний продукт ABBYY Fine Reader 12.0 (робота зі сканером).

**КЛАПААННЕ СПРЯЖЕННЯ, СИЛІКАТНИЙ АБРАЗИВНИЙ СКЛАД,
ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, ПОВЕРХНЯ ТЕРТЯ**

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	10
1.1 Аналіз якості поверхні деталей автомобіля	10
1.2 Вплив якості поверхні на експлуатаційні властивості деталей автомобіля.....	13
1.3 Аналіз механізмів притирання спряжень абразивними пастами.....	15
1.4 Мета і задачі дослідження.....	19
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	20
2.1 Методика дослідження комплексного впливу параметрів режиму притирання на якість поверхонь оброблених силікатним абразивним складом.....	20
2.2 Методика оптимізації параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом.....	30
2.3 Методика дослідження зносостійкості поверхонь тертя оброблених абразивними складами.....	35
2.4 Висновки до другого розділу.....	37
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ ПРОЦЕСУ ПРИТИРАННЯ НА ЯКІСТЬ ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ СИЛІКАТНИМ АБРАЗИВНИМ СКЛАДОМ.....	38
3.1 Дослідження комплексного впливу параметрів режиму притирання на якість поверхонь оброблених силікатним абразивним складом.....	38
3.2 Оптимізація параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом.....	51
3.3 Висновки до третього розділу.....	60

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ОБРОБЛЕНИХ СИЛІКАТНИМ АБРАЗИВНИМ СКЛАДОМ.....	62
4.1 Дослідження зносостійкості поверхонь тертя оброблених силікатним абразивним складом на оптимальному режимі притирання	62
4.2 Визначення критичних навантажень поверхонь тертя оброблених силікатним абразивним складом.....	66
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	70
ВИСНОВКИ.....	72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	74

ВСТУП

В умовах сучасного автомобільного транспорту важливим завданням є забезпечення надійності та довговічності двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), які залишаються основними джерелами енергії для більшості транспортних засобів. Одним із критичних вузлів, що впливають на ефективність роботи двигуна, є газорозподільний механізм (ГРМ), зокрема клапанне спряження. Герметичність і зносостійкість цього вузла безпосередньо визначають компресійні показники, згорання паливної суміші та витрати палива.

Однією з головних проблем експлуатації ДВЗ є зношення поверхонь клапанного спряження через високотемпературні, механічні та хімічні впливи. Це призводить до втрати герметичності, зниження потужності двигуна, підвищення витрат палива та токсичності відпрацьованих газів. Вартість заміни деталей клапанного механізму є досить високою, що робить питання їхнього відновлення актуальним як з технічної, так і з економічної точок зору.

Особливу актуальність ця проблема набуває в умовах зростання вимог до ефективності використання ресурсів, зменшення експлуатаційних витрат і збереження екології. Заміна деталей на нові часто є недоцільною з економічної точки зору, тоді як технології відновлення поверхонь із використанням сучасних матеріалів і засобів можуть значно подовжити термін їхньої служби та покращити експлуатаційні характеристики двигуна.

Одна з найбільш важливих і актуальних проблем сучасного машинобудування – розробка і широке застосування нових, науково-обґрунтованих, екологічних, технічно та економічно доцільних технологій обробки, які поліпшують якість робочих поверхонь за рахунок досягнення оптимальних експлуатаційних властивостей. До основних показників таких технологій слід віднести фізико-механічні та геометричні характеристики поверхневого шару, що формуються, як правило, на фінішних операціях технологічного процесу. Зростаючі вимоги до експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей автомобілів стимулюють розвиток методів модифікації поверхонь і нанесення захисних покриттів. Отже, один із напрямків

підвищення якості деталей при їх виготовленні та ремонті становить модифікація робочої поверхні шляхом нанесення покриттів під час фінішних операцій [1]. Однією з таких операцій є притирання з'єднань абразивними пастами.

В роботі [2] запропоновано застосовувати силікатний абразивний склад для притирання клапанного спряження. Встановлено, що основним компонентом абразивного складу є рідке скло, яке впливає на мікрогеометрію поверхні притирання.

Таким чином, актуальність роботи пов'язана з дослідженням якості поверхонь клапанного спряження з метою підвищення зносостійкості при використанні силікатного абразивного складу.

Ця тема є цікавою для дослідження, оскільки поєднує фундаментальні аспекти матеріалознавства, хімії, а також практичні задачі, пов'язані з обслуговуванням автомобільного транспорту. Дослідження в цій сфері дозволяють вдосконалити процеси ремонту та технічного обслуговування.

Метою роботи є формування якості поверхонь клапанного спряження з метою підвищення зносостійкості при використанні силікатного абразивного складу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз якості поверхні деталей автомобіля та механізмів притирання спряжень абразивними пастами.
2. Визначити вплив якості поверхні на експлуатаційні властивості деталей автомобіля.
3. Дослідити вплив технологічних чинників процесу притирання на якість поверхні оброблених силікатним абразивним складом.
4. Оптимізувати режим притирання силікатним абразивним складом.
5. Дослідити зносостійкість та визначити критичні навантаження поверхонь тертя оброблених силікатним абразивним складом.

Об'єкт дослідження – технологія відновлення поверхонь клапанного спряження силікатним абразивним складом та його вплив на зносостійкість.

Предмет дослідження – зв'язок між властивостями силікатного

абразивного складу та якістю і зносостійкістю поверхонь клапанного спряження.

Методи дослідження передбачали проведення експериментальних досліджень під час яких використовували методи вимірювання, аналіз отриманих результатів досліджень та порівняння отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів.

Розроблено математична модель, що адекватно описує закономірність комплексного впливу параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом на якість обробленої поверхні.

Отримана математична залежність дозволяє визначити оптимальні значення параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропоновано при відновленні клапанного спряження автомобільного двигуна використовувати на станціях технічного обслуговування силікатний абразивний склад при притиранні поверхонь, що забезпечує:

- підвищення продуктивності притирання в 1,5 рази;
- підвищення його зносостійкості в 1,5 рази;
- прискорення процесу його припрацювання в 1,6 рази;
- підвищення навантаження до заїдання в 1,6 рази.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз якості поверхні деталей автомобіля

Характеристики зовнішнього тертя, змащування і зношування безпосередньо пов'язані з якістю поверхонь деталей, які в процесі роботи труться. В техніці під поверхнею деталі розуміють зовнішній шар, який за будовою та іншим фізичним властивостям відрізняється від внутрішньої частини. Комплекс властивостей, набутих поверхнею деталі в результаті обробки, характеризуються загальним поняттям «якість поверхні» [3].

Якість поверхні деталей машин впливає на такі їх службові властивості, як опір втомі, зносо-, ерозіє- і корозостійкість та пов'язаних з такими властивостями спряжень, як міцність посадок з натягом і щільність рухомих і нерухомих з'єднань [3].

Якість поверхонь деталей машин розглядається у вихідному і робочому (експлуатаційному) стані (рис. 1.1). Вона визначається геометрією поверхні, будовою і фізико-хіміко-механічними властивостями поверхонь шарів і напруженнями в них [3].

Вихідна якість зумовлюється технологією обробки. Її значення особливо велике для початку роботи спряжень, які труться (періоду припрацювання і подальшого зберігання в процесі експлуатації заданих посадок). Реальні деталі в результаті механічної обробки заготовок мають відхилення від ідеальної форми, зображеної на робочих кресленнях цих деталей. Такі відхилення називають похибками. Похибки обробленої поверхні з точки зору причин їх утворення і методів вимірювальної техніки, що застосовуються для їх визначення, можна поділити на макро-, мікро- і субмікрогеометричні відхилення. Характер контактування двох твердих тіл, окрім геометрії поверхонь, визначається механічними, фізичними і хімічними властивостями тонких поверхневих шарів і їхнім напруженим станом. Такі поверхневі шари, товщина яких становить від десятків ангстремів до сотих і рідко – десятих часток міліметра, мають як



Рис. 1.1. Основні показники якості поверхні [3]

правило іншу структуру і властивості, ніж матеріали усередині виробу. Відмінність властивостей тонких поверхневих шарів від властивостей серцевини зумовлена трьома основними факторами [3]:

а) станом атомів металу в поверхневих шарах, що відрізняється від стану атомів в об'ємі, наслідком чого є наявність вільної поверхневої енергії і велика адсорбційна активність;

б) сумою механічних, теплових і фізико-хімічних впливів на поверхню металу під час остаточних і попередніх операцій технологічної обробки;

в) сумою повторних циклічних, механічних, теплових і фізико-хімічних впливів на поверхню металу у разі навантаження тертям в експлуатації.

При технологічній обробці поверхневі шари металу, що обробляються, різко змінюють свої властивості. У випадку холодної пластичної деформації металу підвищується його твердість. Це явище називають зміцненням металу, або наклепом.

Застосування спеціальних методів обробки поверхонь деталей дозволяє змінювати їх фізико-хімічні і механічні властивості в потрібному напрямку.

При хіміко-термічній обробці визначальний вплив на властивості поверхневих шарів чинить режим нагрівання й охолодження, а також дія спеціальних активних середовищ.

У випадку холодної пластичної деформації металу підвищується його твердість і границя міцності при одночасному зниженні відносного видовження і відносного поперечного звуження при розтягу.

Зміцнення поверхневого шару при обробці можна оцінити за зміною мікротвердості порівняно з вихідною. Мікротвердість падає в міру віддалення від поверхні деталі, причому, більш різко по товщині шару з роздрібненою структурою. Міцні й крихкі метали менш схильні до зміцнення, ніж маломіцні й пластичні. До того ж, температура при різанні високоміцних металів значно вища і сильніше відображається на факторі зменшення міцності. Наклеп металу під виступами нерівностей, як правило, більший, ніж під упадинами. Поверхневий шар залежно від вказаних вище обставин при точінні має товщину 0,25...2 мм, при шліфуванні – 12...75 мкм, при тонкому шліфуванні – 2...25 мкм, при поліруванні – 0,2 мкм [3].

В процесі експлуатації вихідний технологічний рельєф швидко зникає. Хімічний склад і геометрія поверхонь тертя повністю змінюється. Формується нова якість поверхні. Перехід від вихідного стану до експлуатаційного здійснюється під дією факторів зовнішнього тертя: навантаження, швидкості руху, температури в зоні контакту і середовища. Зміни якості поверхні й особливого стану тонких поверхневих шарів під час роботи пари, яка треться, можуть бути зворотними, які зникають після зняття навантаження, і незворотними, залишковими. Тому експлуатаційну якість поверхні визначають не тільки залишковими характеристиками після зняття навантаження, але й плінними змінами в процесі тертя [3].

Оптимальна технологічна й експлуатаційна якості поверхні отримуються при виконанні таких умов [3]:

Оптимальна технологічна якість поверхні:

- епюри напружень повинні забезпечити утворення нових поверхонь при максимальному руйнуванні й рівномірному зміцненні поверхневого шару;
- умови середовища повинні забезпечити зменшення поверхневої енергії, полегшення виходу дислокацій на поверхню, пластифікування й локалізацію деформацій у тонких поверхневих шарах;
- структурний стан поверхневого шару після обробки повинен характеризуватися однорідністю при мінімальній густині недоліків внутрішньої будови або їх нерівномірному розподілу.

Оптимальна експлуатаційна якість поверхні тертя:

- структурний стан повинен забезпечити утворення однорідного шару ультрадисперсної будови мінімальної товщини;
- поверхня повинна бути достатньо активована для протікання структурного пристосування, стійкість якого при терті зумовлюється динамічною рівновагою процесів утворення і руйнування вторинних структур, а також утворення граничного шару змазки;
- епюри напружень повинні відповідати максимально можливій деконцентрації зовнішнього навантаження поверхні металу, яка забезпечує рівномірність утворення текстур і руйнування плівок окислів.

Висновок: отримання оптимального експлуатаційного рельєфу і формування робочого стану поверхневого шару в цілому пов'язані з вихідним технологічним рельєфом і станом поверхневого шару.

У наступному підрозділі пропонуємо розглянути вплив якості поверхні на експлуатаційні властивості деталей автомобіля.

1.2 Вплив якості поверхні на експлуатаційні властивості деталей автомобіля

Вплив якості поверхні на експлуатаційні властивості деталі автомобіля є визначальним, оскільки саме поверхневий шар найперше контактує з іншими деталями, сприймає навантаження, тертя, теплові та хімічні дії.

Основні експлуатаційні властивості, що залежать від якості поверхні:

1. Зносостійкість:

- гладкі та правильно оброблені поверхні мають менший коефіцієнт тертя. На цих поверхнях зменшується мікронерівність – шорсткі поверхні мають виступи та западини, які при контакті з іншою деталлю збільшують механічне зчеплення. Чим поверхня рівніша, тим менше точок зачеплення. Крім цього на гладких поверхнях краще розподіляється мастильний шар – на відполірованих поверхнях мастило утворює більш рівномірну плівку, що знижує силу сухого тертя. А також на цих поверхнях менше тепловиділення і зношування – при зниженому коефіцієнті тертя деталі менше нагріваються та довше зберігають геометричну точність;

- оптимальна шорсткість (наприклад, $R_a = 0,2-0,4$ мкм для циліндрів двигуна) забезпечує утримання мастильної плівки;

- при надмірній шорсткості відбувається інтенсивний абразивний знос.

2. Надійність і довговічність:

- мікротріщини, наклеп або залишкові напруження в поверхневому шарі можуть спричинити втомні руйнування. Втомні руйнування поверхні – це поступове руйнування матеріалу в результаті багаторазового (циклічного) навантаження, яке викликає накопичення мікропошкоджень у приповерхневому шарі. В результаті дії змінних навантажень у металі виникають мікротріщини. Вони зароджуються переважно на поверхні (де найбільші контактні напруження, мікронерівності, залишкові дефекти). Згодом тріщини ростуть углиб матеріалу, формується лушення, викришування або відшаровування поверхневого шару. Причинами втомних руйнувань поверхні є: високі контактні напруження (наприклад, у підшипниках, зубчастих передачах); недостатня якість поверхні (шорсткість, риски після обробки, дефекти); погане мащення, що призводить до зростання коефіцієнта тертя і температури; виникають корозійні процеси, які прискорюють зародження тріщин; вібрації та ударні навантаження;

- загартовані або азотовані поверхні витримують значно більші навантаження, продовжуючи ресурс деталі.

3. Герметичність та щільність з'єднань:

- наприклад, у спряженні «клапан-сідло» чи «поршневі кільця-циліндр» потрібна мінімальна шорсткість і точність форми;

- недостатня якість поверхні веде до пропусків газів, падіння компресії, втрат потужності двигуна.

4. Стійкість проти корозії:

- шорсткі поверхні швидше накопичують вологу, агресивні речовини, що сприяє корозії;

- спеціальні покриття (хромування, фосфатування, оксидування) підвищують корозійну стійкість.

5. Теплостійкість і терморегуляція:

- якісно оброблені поверхні краще відводять тепло (наприклад, робочі поверхні гальмівних дисків);

- наявність мікротріщин або перегріву в поверхневому шарі може викликати деформації та руйнування.

6. Технологічність ремонту і відновлення:

- при високій точності та оптимальній шорсткості простіше проводити шліфування, притирання, наплавлення;

- поганий стан поверхні ускладнює ремонт і збільшує витрати.

Висновок: якість поверхні безпосередньо впливає на ресурс, надійність, економічність та безпеку автомобіля. Правильна обробка й контроль поверхонь забезпечують зниження втрат на тертя, підвищення довговічності деталей і зменшення витрат палива та мастила.

1.3 Аналіз механізмів притирання спряжень абразивними пастами

Серед різних способів механічної обробки, що забезпечують виконання високих вимог до якості поверхневого шару і точності розмірів, важливе місце займає абразивне притирання, що дозволяє отримати поверхню з низькою шорсткістю і необхідними властивостями [4].

Як відомо, притиральна операція виконується за допомогою паст, які

наносяться на поверхню деталей для знімання припуску на обробку, зміни розмірів і її форми. При цьому під хімічним і механічним впливом абразивних зерен відбувається зняття тонкого шару металу, що призводить до зменшення шорсткості поверхні. [4,5]. У процесі взаємного абразивного притирання зерна, перебуваючи між деталями, знімають з оброблюваних поверхней тонку металеву стружку. У той час хімічний вплив кислого середовища пасти поєднується з механічним впливом. Абразивні зерна перебувають у складі сполучної рідини між оброблюваними поверхнями деталей, вдавлюються в поверхню деталі, виконаної з м'якшого матеріалу і шаргуються у з'єднанні. Під впливом хімічних складових пасти утворюється плівка, яку видаляють абразивні зерна під час переміщення деталей. Одночасно ці зерна знімають найтонші стружки. Спочатку мікронерівності стикаються по малій контактній площі. Зрізаються окисні плівки з виступів мікронерівностей. Цей етап характеризується великими питомими тисками і пластичним деформуванням виступів мікронерівностей. Зі збільшенням контактної площі тиск зменшується, знижується товщина шару, що знімається. При цьому знімаються тільки окисні плівки. Значну роль у цьому випадку відіграє в'язкість рідини. Товщина шару рідини між деталями має бути меншою за величину ріжучих зерен, що знаходяться у з'єднанні. Як сполучну рідину використовують машинну оливу, гас, стеарин, вазелін. Як абразив використовують порошки, мікропорошки електрокорунду, карбіду кремнію, карбіду бору, оксиду хрому, оксиду заліза тощо. До складу притиральних паст входять хімічно активні речовини олеїнова або стеаринова кислота, які утворюють на оброблюваній поверхні м'яку оксидну плівку, що легко знімається з поверхні ущільнюючих гребінців, чим забезпечується висока чистота і продуктивність притирання [4,6].

В даний час існує широкий асортимент різних складів притиральних паст. Вони відрізняються за своїми характеристиками, зернистістю, в'язкістю, типом, наявністю додаткових присадок і таким чином впливають на механізм обробки.

В роботах [4,5] авторами запропоновано склад силікатної пасти, який можна використовувати для підвищення довговічності деталей автомобільних

двигунів. Досліджено механізм притирання силікатною пастою. Показано, що основою абразивної пасти є рідке натрієве скло. Рідке натрієве скло – водний лужний розчин силікатів $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$, в яких аніонна частина представлена у вигляді полікремнієвих кислот різної полімерності. При підвищенні концентрації силікатні розчини послідовно проходять стани малорухливих рідин, желеподібних мас і тендітного склоподібного тіла, при будь-якому вмісті води зберігаючи гомогенність (відповідно, зі збільшенням у системі води ці стани чергуються у зворотному порядку). Головна роль у силікатах належить хімічній зв'язку Si–O [4,5].

Властивості силікатних розчинів – їх висока в'язкість, що зростає експоненційно зі збільшенням концентрації, стійкість щодо кристалізації, утворення склоподібних плівок, прояв в'язучих властивостей – так чи інакше, вказують на їхню полімерну будову. Прояв розчинами силікатів лужних металів в'язучих властивостей обумовлено їхньою полімерною природою, здатністю при висиханні (зневодненні) утворювати жорсткий полімерний каркас, що скріплює частинки речовин, що наповнюють систему. Внаслідок цих процесів формується міцний силікатний камінь [4,5].

В роботах [4,5] показано, що приймалися до уваги властивості рідкого натрієвого скла та попередні дослідження виявили, які дозволили виявити, що стабільність силікатної пасти для притирання в часі може бути досягнута за рахунок введення трихлористого заліза (FeCl_3), яке є, у даному випадку, загусником рідкого скла і, крім цього, володіє високими гігроскопічними властивостями. За рахунок хімічної реакції натрієвого рідкого скла, трихлористого заліза і води виникає утворення SiO_2 . Адгезійні властивості покращувалися за рахунок введення в склад для притирання мастила 1-13. Вибір даного мастила був обумовлений розчинністю у воді. Для збільшення абразивної здатності притиральної пасти був введений абразивний порошок [4,5].

В роботі [4] наведено та підтверджено механізм притирання силікатним складом, який відбувається в такий спосіб. При додаванні до складу абразивного матеріалу відбувається обволікання його оксидом кремнію SiO_2 . Це пояснюється

тим, що розчини рідкого скла мають високу силу зчеплення і невеликий поверхневий натяг. При взаємному переміщенні поверхонь відбувається різання-дряпання абразивними зернами найвищих вершин нерівностей. У точках зіткнення абразивних частинок відбувається підвищення температури, а оскільки навколо абразиву знаходиться SiO_2 , то при попаданні останнього в зону зіткнення відбувається утворення аморфного кремнезему (SiO_2) [4,7] (рис. 1.2).

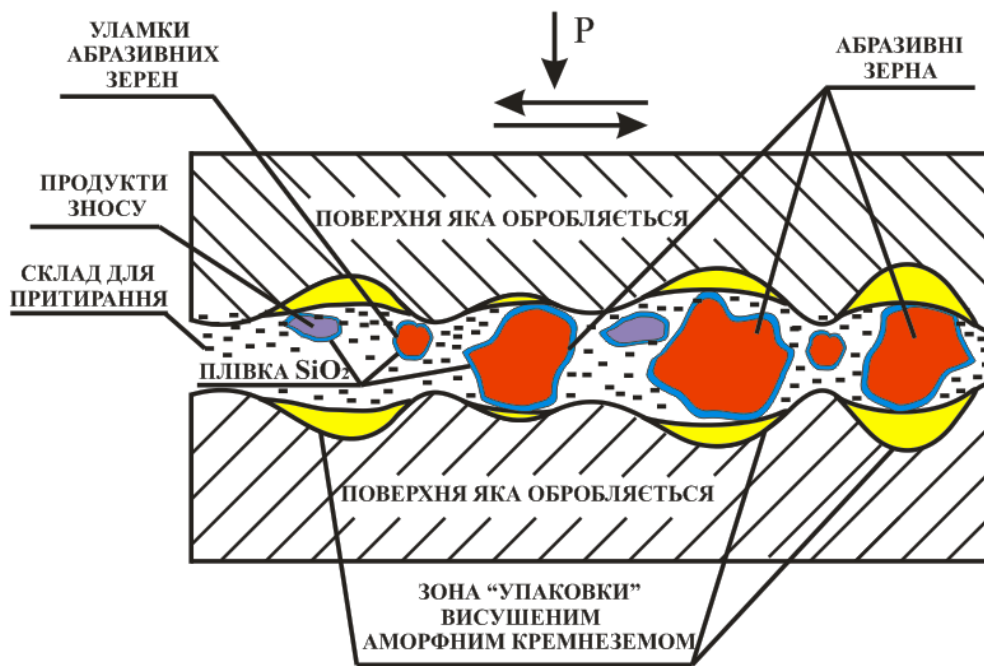


Рис. 1.2. Схема механізму притирання силікатним абразивним складом [4]

Під дією абразивних частинок SiO_2 потрапляє у западини оброблюваної поверхні та зчіпляється з поверхнею. При багаторазовому впливі частинок відбувається щільна «упаковка» SiO_2 глибоких западин нерівностей, що дозволяє отримати високу якість поверхні [2,7].

Таким чином, в роботі [4] встановлено, що основним компонентом абразивного складу є рідке скло, яке впливає на мікрогеометрію поверхні притертя.

Висновок: приймачі до уваги вище наведено, було прийнято рішення про дослідження формування якості поверхонь клапанного спряження з метою підвищення зносостійкості при використанні силікатного абразивного складу.

1.4 Мета і задачі дослідження

Метою роботи є формування якості поверхонь клапанного спряження з метою підвищення зносостійкості при використанні силікатного абразивного складу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз якості поверхні деталей автомобіля та механізмів притирання спряжень абразивними пастами.
2. Визначити вплив якості поверхні на експлуатаційні властивості деталей автомобіля.
3. Дослідити вплив технологічних чинників процесу притирання на якість поверхні оброблених силікатним абразивним складом.
4. Оптимізувати режим притирання силікатним абразивним складом.
5. Дослідити зносостійкість та визначити критичні навантаження поверхонь тертя оброблених силікатним абразивним складом на оптимальному режимі притирання.

Об'єкт дослідження – технологія відновлення поверхонь клапанного спряження силікатним абразивним складом та його вплив на зносостійкість.

Предмет дослідження – зв'язок між властивостями силікатного абразивного складу та якістю і зносостійкістю поверхонь клапанного спряження.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методика дослідження комплексного впливу параметрів режиму притирання на якість поверхонь оброблених силікатним абразивним складом

Дослідження виконували на спеціальній установці, що дозволяє з високою точністю відтворити процес притертя зразка та контрзразка абразивною пастою у лабораторних умовах, загальний вигляд якої показано на рис. 2.1-2.3. Установка змонтована на станині універсального верстата ОПР-1841А призначеного для притирання клапанів автотракторних двигунів [5].

Мета дослідження – встановити, як тиск (P) на зразок, відносна швидкість (V) обертання зразка та тривалість (t) притирання впливають на шорсткість R_a поверхні, яка обробляється.

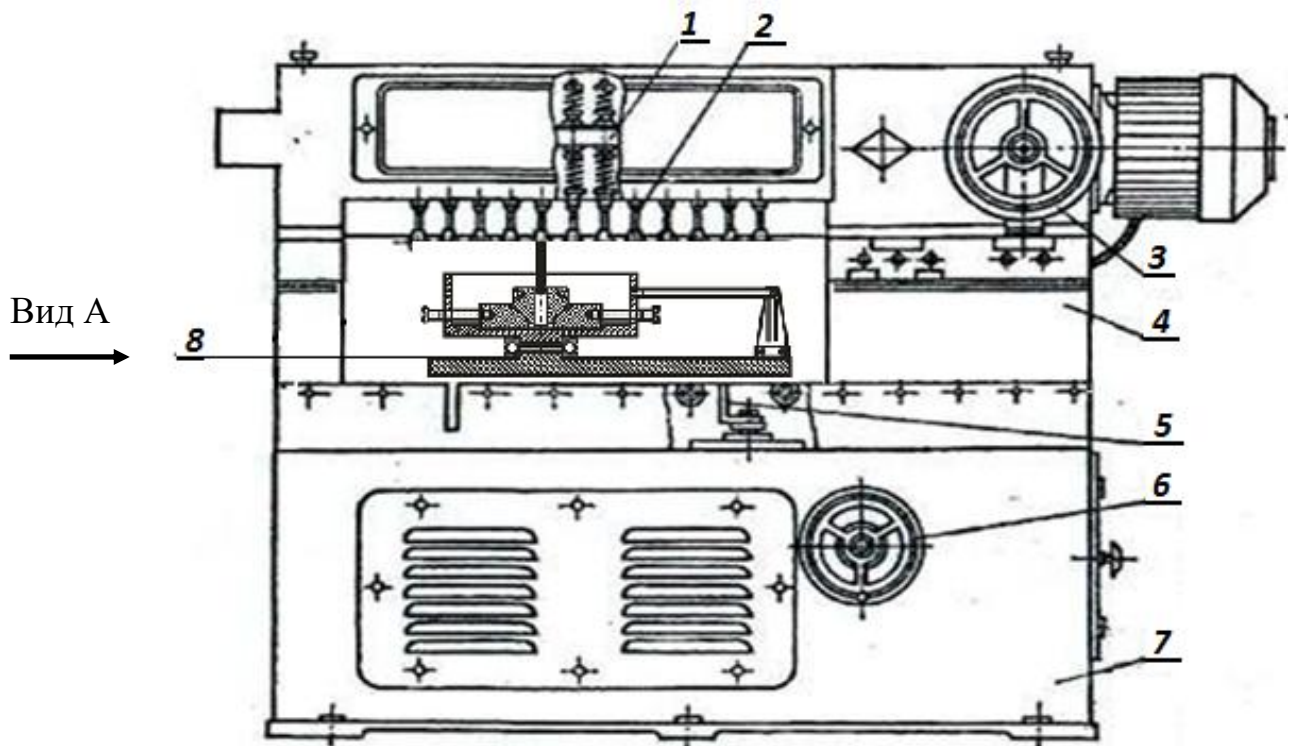


Рис. 2.1. Лабораторна установка для дослідження працездатності притирального складу [5]: 1 – блок шпинделів; 2 – перехідник; 3, 6 – маховик; 4 – стійка права; 5 – косинець підйомного столу; 7 – станина; 8 – робочий вузол для притирання

Вид А

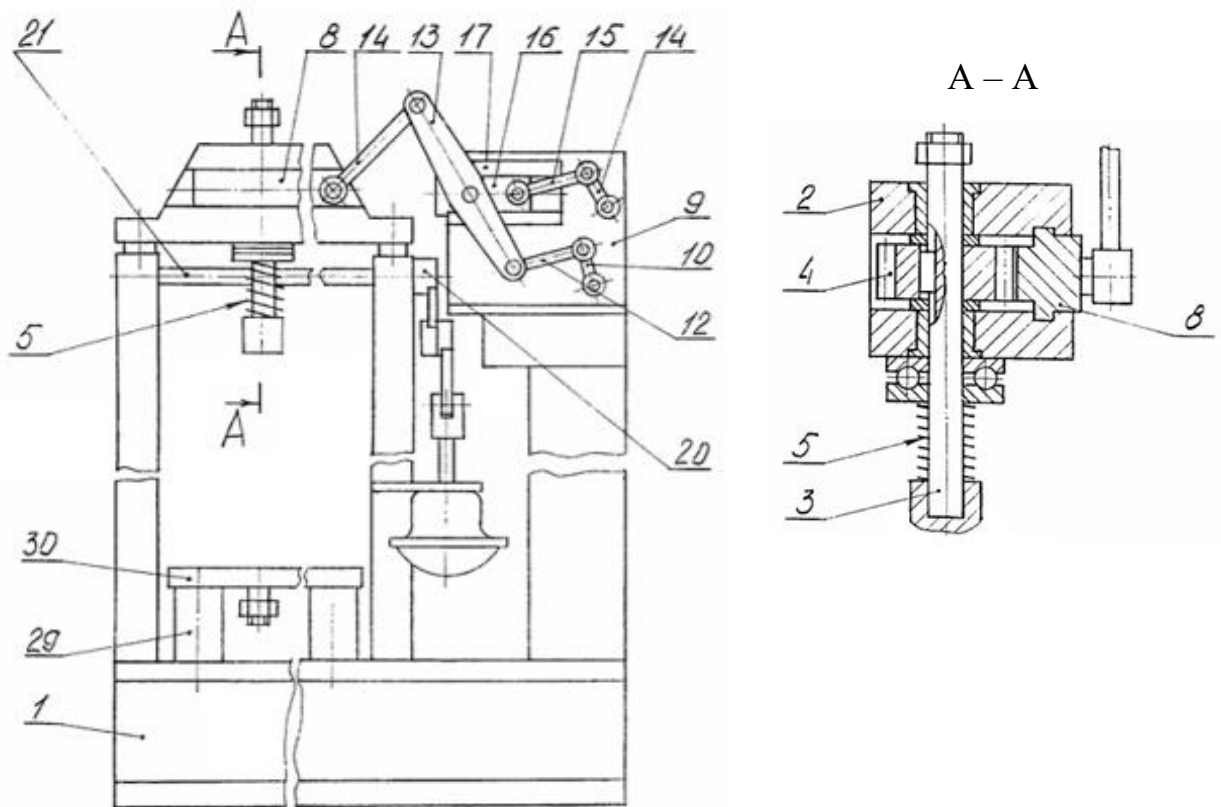


Рис. 2.2. Вид А лабораторної установки для дослідження працездатності притирального складу: 1 – станина; 2 – корпус; 3 – шпindelь; 4 – шестерня; 5 – пружина; 8 – рейка; 13 – важіль; 16 – повзун; 17 – напрямні; 20 – важель; 21 – вал; 29 – рейка; 30 – плита

Лабораторна установка складається з наступних вузлів і деталей (рис. 2.1): блоку шпинделів 1, перехідника 2, маховиків правління 3, 6, стійки правої 4, лівої стійки, підйомного майданчика 5, станини 7.

Блок шпинделів включає корпус 2 (рис. 2.2), в якому у втулках встановлені шпинделі 3. На лабораторній установці задіяно один шпindelь. Шпindelь мають можливість обертатися і здійснювати осьовий рух відносно корпусу. На шпинделі за допомогою шпонки встановлена шестерня 4. Шпindelь притискається до зразка за допомогою пружин 5 через перехідник. У поздовжньому пазі корпусу встановлена з ковзанням рейка 8, зуби якої мають постійне зачеплення з шестернями 4.

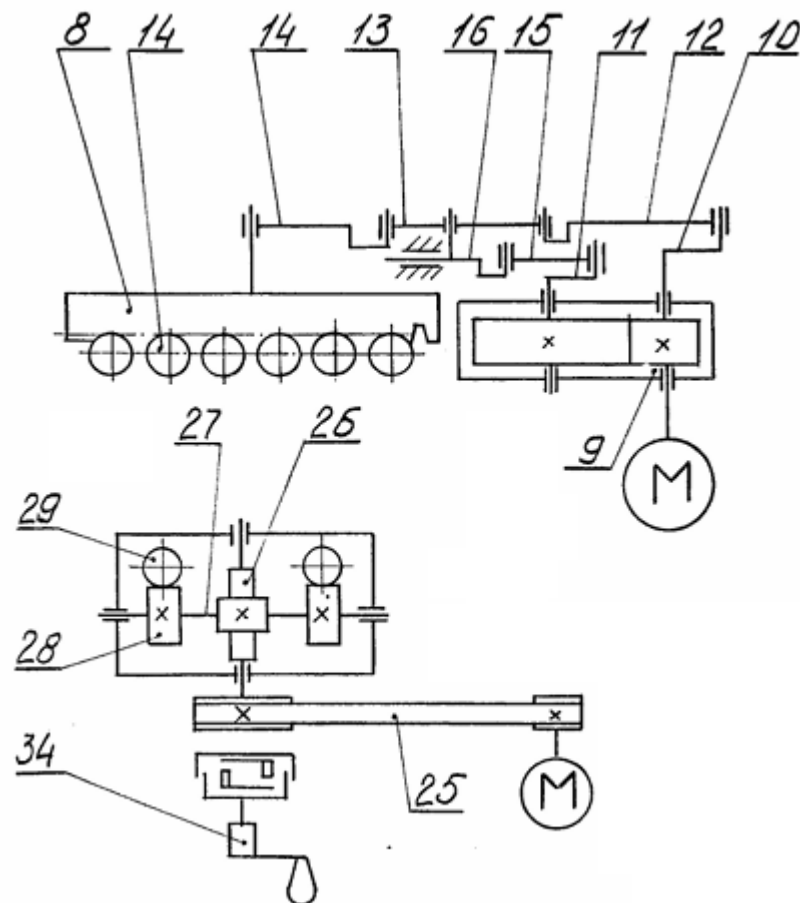


Рис. 2.3. Кінематична схема лабораторної установки для дослідження працездатності притирального складу: 8 – рейка; 9 – мотор-редуктор; 10, 11 – кривошипи; 12, 14, 15 – шатуни; 16 – повзун; 25 – двигун з ремінною передачею; 26 – редуктор; 27 – вал; 28 – колесо; 29 – рейка; 34 – рукоятка

Мотор-редуктор 9 (Рис. 2.3) з швидкохідним і тихохідним вихідними валами встановлений на станині і має, відповідно, кривошипи 10 і 11.

Механізм зворотно-обертального руху шпинделів включає (Рис. 2.2) шатуни 12, 14 і 15, важіль 13, повзун 16 і напрямні 17. Повзун 16 шарнірно з'єднаний з шатуном 15 і може переміщатися вздовж напрямних 17. Важіль 13 встановлений з обертанням на шипі повзуна 16. Шатун 12 з'єднує кривошип 10 з важелем 13, а шатун 14 – рейку 8 і важіль 13.

Підйомний механізм включає двигун з ремінною передачею 25 (рис. 2.3), редуктор 26 з валом 27, колеса 28, рейки 29, плиту 30 і робочий вузол для притирання. Підйомний механізм може бути приведений в рух за допомогою

рукоятки 34 (рис. 2.3).

Верстат працює наступним чином. Зразок і контрзразок встановлюємо в робочий вузол для притирання. На зразок наносимо силікатний абразивний склад.

Обертанням рукоятки 34 плита 30 переміщається вгору (Рис. 2.2), при цьому зразок через перехідник торкається наконечника шпинделя 6 і стискаються пружину 5. Таким чином задається навантаження на зразок. Чим вище піднята плита 30, тим більше створюється навантаження на зразок. Найбільший підйом опорного майданчика складає 500 мм. Значення навантаження визначали за допомогою електротензодатчика 10 (рис. 2.5), який наклеєний на дно чашки 4 (рис. 2.5) і протарировано.

Механізм зворотно-обертального руху шпинделя з перехідником приводиться мотор-редуктором 9 (Рис. 2.3). Кут повороту шпинделя при прямому ході складає 360° , його зміщення за подвійний хід – 14° , число подвійних ходів корпусу шпинделя за хвилину – 140. Число подвійних ходів рейки за хвилину складає 70. Рух від кривошипа 10 швидкохідного вала передається на шатун 12, важіль 13, приводний шатун 14 і рейку 8. Важіль 13 гойдається на шипі повзуна 16. Рейка 8 здійснює зворотно-поступальні рухи в направляючих корпусу, що забезпечує зворотно-обертальні рухи на 360° шестерень, що знаходяться в зачепленні з рейкою і шпинделями. Для забезпечення зміни швидкості зворотно-обертального руху застосовуємо частотний перетворювач. Він змінює частоту і напругу струму живлення, за рахунок чого регулюється швидкість обертання валу електродвигуна. Таким чином частоту шпинделя можемо змінювати від 150 хв.^{-1} до 600 хв.^{-1} .

Функція зміщення обертових шпинделів забезпечується прямолінійним переміщенням осі обертання важеля 13 уздовж напрямних 17. Переміщення цієї осі відбувається в результаті переміщення уздовж напрямних повзуна 16 з шипом, на якому встановлений важіль 13. Повзунок приводиться від кривошипа 11 за допомогою шатуна 15 від тихохідного валу мотор-редуктора.

Механізм зміщення дозволяє здійснювати зміщення циліндра щодо

поршня за один подвійний хід на 3-5 мм. Повний оборот зміщення зразка, що притирається відбувається за 25...35 подвійних ходів рейки. Зміщення зразка щодо контрзразка необхідне для забезпечення рівномірності притирання зразка по всьому діаметру запірної фаски. При притиранні фаску зразка та контрзразка змащуємо тонким шаром пасти, яка досліджується.

Для закріплення зразків та контрзразків для притирання на станині 7, яка забезпечена підйомним столом, встановлено робочий вузол 8 (рис. 2.1). Зміна висоти столу здійснюється або вручну маховиком 6, через черв'ячну пару і рейкове зчеплення, або електродвигуном через клиноремінну передачу, для чого необхідно натиснути кнопку управління [5].

Схема розташування зразка і контрзразка та робочий вузол для притирання наведено на рис. 2.4 та 2.5.

Випробування проводилися за схемою торцевого тертя «конус (зразок) – кільце (контрзразок)». У якості зразка використовували конус зі сталі 40X (HRC 48) діаметром 23 мм, шириною 15 мм. Контрзразок мав форму кільця із чавуну СЧ 18-36 (HRC 32) діаметром 50 мм, шириною 10 мм з шириною робочої поверхні 3 мм (рис. 2.6).

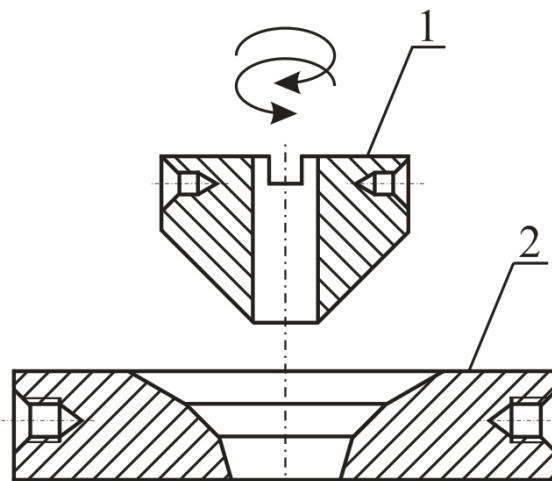


Рис. 2.4. Схема розташування зразків [2]: 1 – зразок; 2 – контрзразок

Контрзразок 3 (рис. 2.5) встановлювали в чашку 4, яка спирається на напольгливий кульковий підшипник 51103, і закріплюється гвинтом 9 (рис. 2.5). На контрзразок 3 встановлювали зразок 2 (рис. 2.5). Зразок 2 з'єднували з

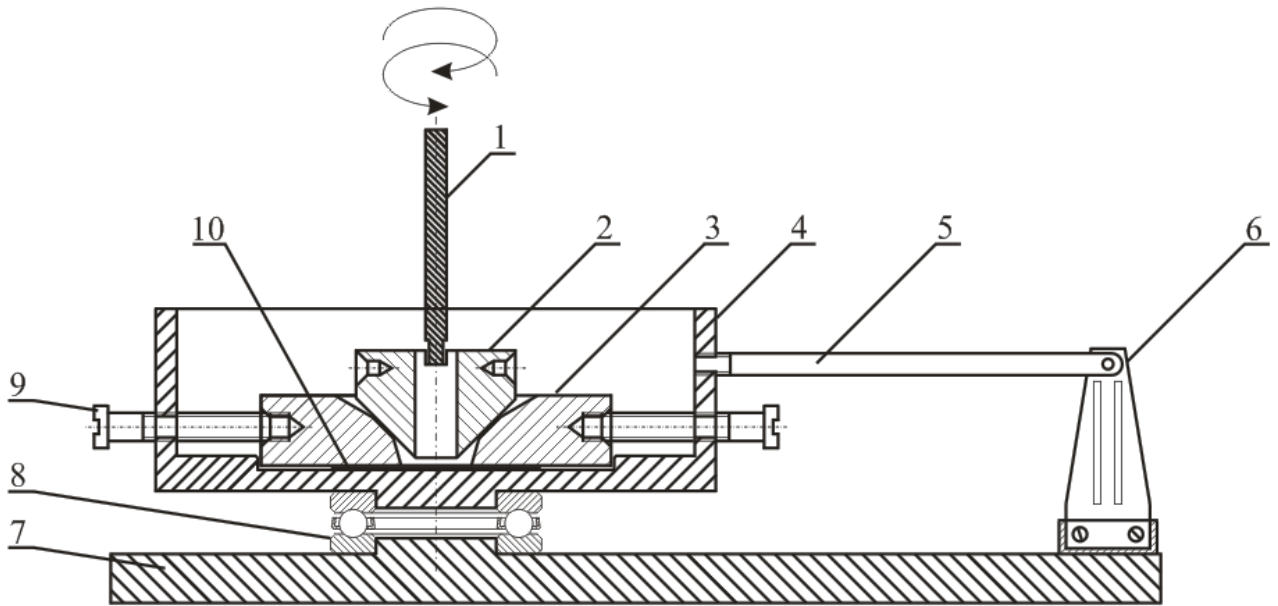


Рис. 2.5. Робочий вузол для притирання [5]: 1 – перехідник; 2 – зразок; 3 – контрзразок; 4 – чашка; 5 – стрижень; 6 – тензометрична балка з електротензодатчиком; 7 – опорна плита; 8 – наполегливий кульковий підшипник 51103; 9 – гвинт для кріплення контрзразка; 10 – електротензодатчик

шпинделем за допомогою перехідника 1 (рис. 2.5). Зворотно-обертальний рух шпинделя передавався на зразок у результаті чого виконувалося притирання поверхонь тертя [8].

Поверненню чашки перешкоджає стрижень 5 (рис. 2.5), що є рівномічною консольно закріпленою балкою, на яку були наклеєні електротензодатчики, що служать плечима моста.

Деформація вигину балки, тобто, величину моменту тертя, вимірювали приладом і одночасно записували на діаграмну стрічку приладу самопису Н 327-1. Похибка виміру не перевищувала $\pm 3\%$. Для більш достовірних результатів перед кожною серією випробувань проводили тарування тензобалки (рис. 2.5).

Оцінка велася за тривалістю притирання, знімання металу та якістю поверхні. Стабілізація моменту тертя показувала завершення процесу обробки.

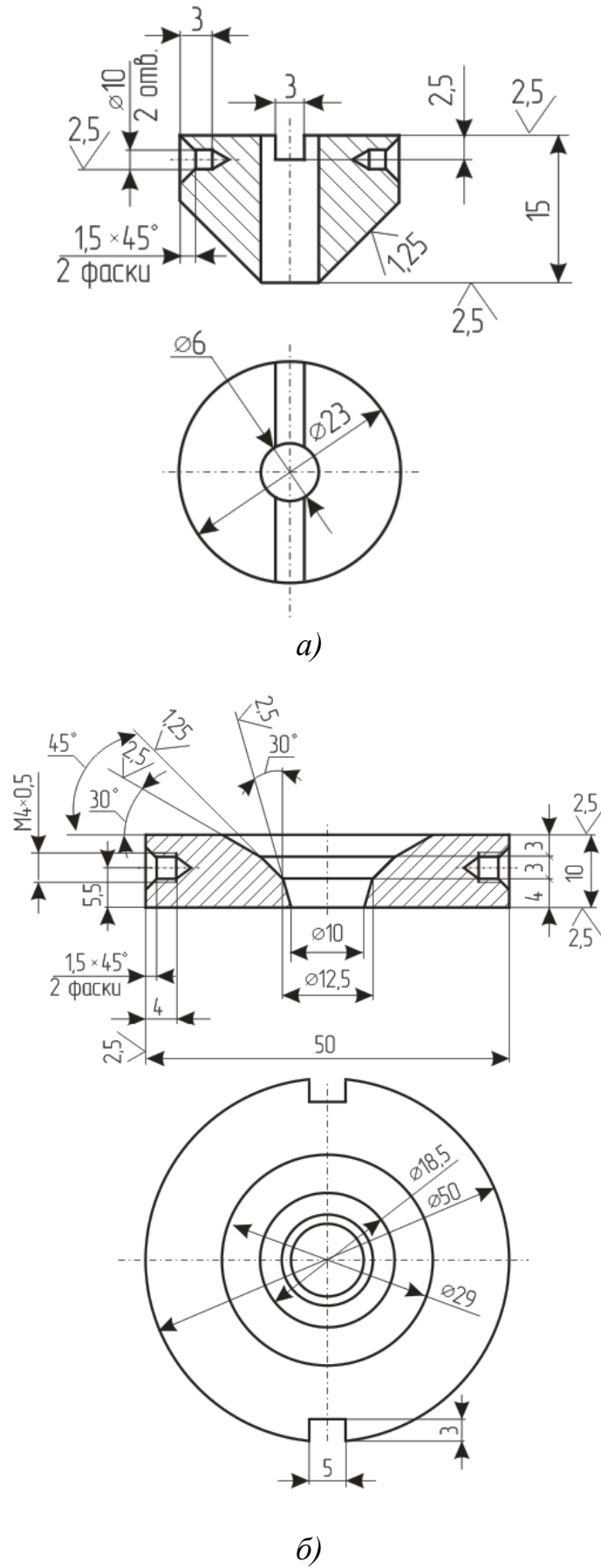


Рис. 2.6. Зразок та контрзразок для випробування [2]: а) – конус (зразок); б) – кільце (контрзразок)

Вагу зразків до проведення досліду і після визначали на мікроаналітичних терезах типу ВЛР-200 з точністю $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г (рис. 2.7, 2.8).



Рис. 2.7. Аналітичні терези типу ВЛР-200 [8]



Рис. 2.8. Набір г і мг гирь, розташованих у гніздах пластмасового ящичка [8]

За результатами всіх вимірювань для кожного зразка визначали середнє значення параметрів, що вимірювали, і обчислювали масове знімання металу за формулою (2.1) [8]:

$$Q = \frac{m_1 - m_2}{\tau}, \quad (2.1)$$

де Q – середнє масове знімання металу, мг/хв.

m_1 і m_2 – маса зразка (контрзразка) до та після випробування, відповідно, мг;

τ – тривалість випробування, хв.

Коефіцієнт тертя визначали за формулою [8]:

$$f_{тер.} = \frac{M_{тер.}}{N \cdot R}, \quad (2.2)$$

де $M_{тер.}$ – момент тертя, показання реєструючого приладу, Н·м;

R – радіус тертя на середній лінії робочої поверхні зразка, м;

N – осьове навантаження на зразок, визначається за формулою [8]:

$$N = P \cdot S, \quad (2.3)$$

де P – контактний тиск, Н/м²;

S – площа контакту зразка з контр зразком, м².

За допомогою профілографа-профілометра контролювали профіль поверхонь, які притиралися. Одним із факторів, що визначають якість оброблених поверхонь, є мікрогеометрія поверхні. Відомо, що вихідна шорсткість, тобто шорсткість, отримана після притирання, істотно впливає на тертя і зношування. Тому визначення мікрогеометрії поверхонь після притирання є необхідною умовою оцінки якості поверхні. Дослідження шорсткості поверхні здійснювалося за допомогою профілографа-профілометра моделі 201 (рис. 2.9) [8].

Прилад складається з самостійно виконаних блоків *I*, *II*, *III* (рис. 2.9) [8].

На столі стійки 2 кріпиться столик 6, що дає змогу переміщати випробовувану деталь у двох взаємоперпендикулярних напрямках і здійснювати поворот її. Мотопривод 3 з жорстко закріпленим на ньому датчиком 4

переміщається по стійці за допомогою рейки і шестерні. Крім того, до складу

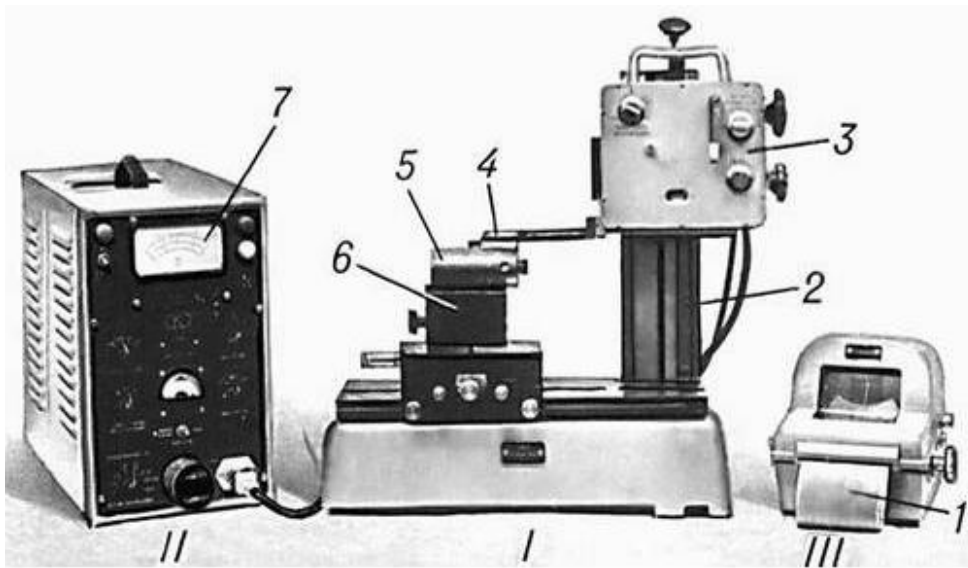


Рис. 2.9. Загальний вигляд профілографа-профілометра моделі 201 [8]:

1 – профілограма; 2 – стійка; 3 – привід; 4 – датчик; 5 – деталь;
6 – вимірювальний столик; 7 – показувальний пристрій електронного блока

приладу входять електронний блок із показуючим приладом 7 і записуючим приладом 1. Основою датчика 4 є алмазна голка, розташована на кінці коромисла, що хитається на ножовій опорі, що створює дисбаланс мостової схеми. Отриманий електричний сигнал проходить через підсилювач електронного блока 7 і подається на показувальний або записувальний пристрій. Привід 3 призначений для переміщення датчика 4 за зразком 5. Залежно від роду роботи приладу і досліджуваного зразка використовують одну з чотирьох швидкостей переміщення датчика (0,2; 1,0; 10 і 0,7 мм/с) і одну з трьох довжин ділянок вимірювання (6; 3,2; 1,6 мм) [8].

Як показувальний прилад використовували мікроамперметр постійного струму. Відлік показань приладу здійснювали за нерухомою стрілкою, яка зупиняється автоматично наприкінці ходу датчика. Записувальний прилад являє собою магнітоелектричний міліамперметр постійного струму, який самописний. Запис здійснювали електротермічним способом на спеціальному діаграмному папері в прямо вугільній системі координат із вісьмома ступенями збільшення

по вертикалі (від 1000 до 200000 разів), за 18 горизонтальних збільшень (від 2 до 4000 разів).

Найкращу працездатність мав той склад пасти після притирання яким, зразок та контрзразок мали найменшу шорсткість і стабілізація коефіцієнта тертя була швидше [8].

2.2 Методика оптимізації параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом

Оптимізаційні дослідження проводили за методикою Бокса-Вілсона [9], яка використовує «активний експеримент», а планування точок у досліджуваному факторному просторі проводиться так, щоб отримати максимальну інформацію з поставлених дослідів та обробити отримані дані з найменшими обчислювальними витратами.

Метод Бокса-Вілсона – метод оптимізації активного експерименту шляхом крутого сходження поверхнею відгуку (параметрів оптимізації) до оптимуму, суть якого полягає в наступному: рух у напрямі градієнта за наявності лінійного рівняння моделі здійснюється із центра експерименту послідовними кроками, які пропорційні добутку коефіцієнта регресії кожного фактора на значення його інтервалу зміни [10].

Метод крутого сходження, або метод Бокса-Вілсона поєднує позитивні сторони трьох методів – методу Гауса-Зейделя, методу градієнта та методу повного (або дробового) факторного експерименту, як способу отримання лінійної математичної моделі [11].

Повним факторним експериментом (ПФЕ) називається такий експеримент, при реалізації якого визначається значення параметру оптимізації при всіх можливих поєднаннях рівнів варіювання факторів. Якщо мається k факторів, кожний із яких може встановлюватися на q рівнях, то для того, щоб здійснити повний факторний експеримент необхідно поставити $n = q^k$ дослідів [11].

Планування, проведення та обробка результатів ПФЕ складається з наступних обов'язкових етапів: кодування факторів; складання план-матриці

експерименту; рандомізація дослідів; реалізація плану експерименту; перевірка відтворюваності дослідів; перевірка адекватності лінійної моделі; оцінка значимості коефіцієнтів регресії [11].

Оптимізаційне дослідження режиму притирання проводимо у такі етапи [2]:

1. Вибір параметра оптимізації, незалежних факторів та рівнів їх варіювання. Параметром оптимізації прийнята шорсткість (R_a) обробленої поверхні; як незалежні параметри, прийняті значення параметрів режиму притирання; задані рівні варіювання.

2. Складання таблиці, що містить значення незалежних факторів та рівнів їх варіювання, що відображають значення параметрів режиму притирання (табл. 2.1).

3. Кодування незалежних факторів – переведення натуральних значень рівнів факторів у кодові безрозмірні величини та побудова матриці експерименту (табл. 2.2) для повного факторного експерименту типу $N=2^3$.

Представлений у табл. 2.2 план у безрозмірному масштабі геометрично може бути інтерпретований у вигляді восьми вершин кубу (рис. 2.10). Другий стовбець у табл. 2.2 – це стовбець так званої фіктивної змінної $x_0 = +1$.

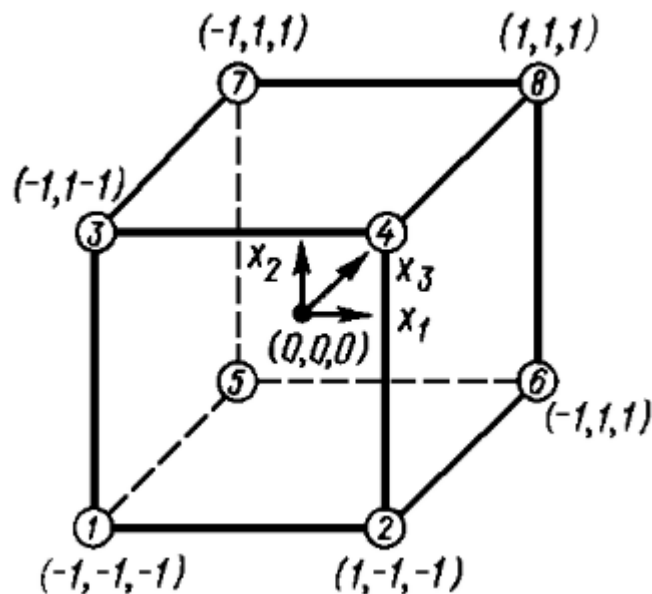


Рис. 2.10. Повний факторний експеримент 2^3 [11]

Кодування факторів необхідно для переведення натуральних факторів у безрозмірні величини, щоб мати можливість побудувати стандартну ортогональну план-матрицю експерименту. Для переведення натуральних змінних у кодові x_i заповнюється таблиця кодованих змінних на двох рівнях. В якості нульового рівня факторів (центра плану) зазвичай обирається центр інтервалу, в якому передбачається проводити експеримент [11].

4. Реалізація плану експерименту на лабораторній установці для дослідження працездатності притирального складу. Попередня обробка результатів із визначенням середніх значень параметра оптимізації.

6. Перевірка однорідності дисперсії паралельних дослідів та їх відтворюваності.

7. Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії, їх помилок та значущості, а також перевірка адекватності моделі.

8. Проведення дослідження з рухом лінією «крутого сходження».

Таблиця 2.1

Незалежні фактори та рівні їх варіювання

Рівень змінних факторів	Позначення кодове	Параметри режиму притирання		
		Тиск на зразок, МПа (P)	Зворотно-обертальна швидкість зразка, м/с (V_{3-0})	Час притирання, с (t)
		x_1	x_2	x_3
Основний рівень	x_0	0,03	0,45	420
Інтервал варіювання	Δx_i	0,02	0,15	180
Верхній рівень	+ 1	0,05	0,6	600
Нижній рівень	- 1	0,01	0,3	240

Таблиця 2.2

Стандартна матриця експерименту

№ дослідку	План								Результат y_i
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	y_1
2	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	y_2
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	y_3
4	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	y_4
5	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	y_5
6	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	y_6
7	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	y_7
8	1	1	1	1	1	1	1	1	y_8

При використанні багаточленного полінома як математичну модель фактори кодують за формулою [2]:

$$C_i = \frac{x_i - x_{i_0}}{\Delta x_i}, \quad (2.5)$$

де C_i – кодове значення i -го фактору;

x_i – натуральне поточне значення i -го фактору;

x_{i_0} – початковий (нульовий) рівень фактора;

Δx_i – інтервал варіювання i -го фактору [2]:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i_{max}} - x_{i_{min}}}{2}. \quad (2.6)$$

Для кожного компонента визначено параметричні обмеження:

$0,01 \text{ МПа} < P < 0,05 \text{ МПа}$, $0,3 \text{ м/с} < V_{3-0} < 0,6 \text{ м/с}$, $240 \text{ с} < t < 600 \text{ с}$.

Вибрано критерій якості поверхні: шорсткість обробленої поверхні (Ra). Для визначення точок у факторному просторі повного факторного експерименту було складено матрицю проведення експерименту з урахуванням взаємодії незалежних факторів (табл. 2.2).

Середнє значення параметра оптимізації з паралельних дослідів визначали за формулою [2]:

$$y_{сер.} = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k}, \quad (2.7)$$

де y_i – результат i -го паралельного виміру;

k – серія паралельних вимірів.

Для оцінки впливу зазначених факторів та математичного опису процесу зношування використовували модель першого порядку [2]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (2.8)$$

Отримане рівняння, що описує процес, що досліджується, перевіряється на придатність або адекватність за критерієм Кохрена. Розрахункове значення порівнюється з табличним при вибраному рівні значущості $\alpha = 0,05$, при цьому якщо табличне значення більше за розрахункове, то даний параметр вважається значущим. Дисперсію відтворюваності розраховували за такою формулою [11]:

$$S_i^2 = \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{f_e}, \quad (2.9)$$

де f_e – число ступенів свободи; $f_e = k - 1$.

Розрахунок коефіцієнтів рівняння проводили за такою формулою [11]:

$$b_0 = \frac{\sum_1^N y_i}{N}, \quad (2.10)$$

де N – загальна кількість дослідів.

Отримана вище модель являє собою розкладення аналітичної функції у ряд Тейлора. При цьому коефіцієнти регресії являють собою частинні похідні функції відгуку по відповідним факторам. Тому, якщо $\vec{i}, \vec{j}, \dots, \vec{l}$ – одиничні вектори у напрямку координатних осей, то [11]:

$$\text{grad } y = b_1 i + b_2 j + \dots + b_k l. \quad (2.11)$$

Це вираження задає найкоротший напрямок руху до екстремуму. Очевидно, що для здійснення такого руху необхідно змінювати фактори пропорційно відповідним коефіцієнтам регресії [11].

Рух до оптимуму починається з вихідної точки (центра плану), яка була використана для отримання рівняння регресії [11].

Рух по градієнту припиняється якщо значення всіх факторів x_i досягли границі області визначення або якщо був досягнутий екстремум параметра оптимізації [11].

2.3 Методика дослідження зносостійкості поверхонь оброблених абразивними пастами

Дослідження зносостійкості поверхонь після обробки проводили на спеціальній установці, торцевого тертя, загальний вигляд якої показано на рис. 2.10.

Установка змонтована на станині настільного вертикально-свердлильного верстата, шпindelь якого обертає рухому частину установки із закріпленням в ній конусом (зразком).

Нерухомий контрзразок закріплювали в чашці, що спиралася на наполегливий кульковий підшипник. Поверненню чашки перешкоджав стрижень, що є рівномірною консольно закріпленою балкою, на яку були наклеєні електротензодатчики, що служать плечима моста.

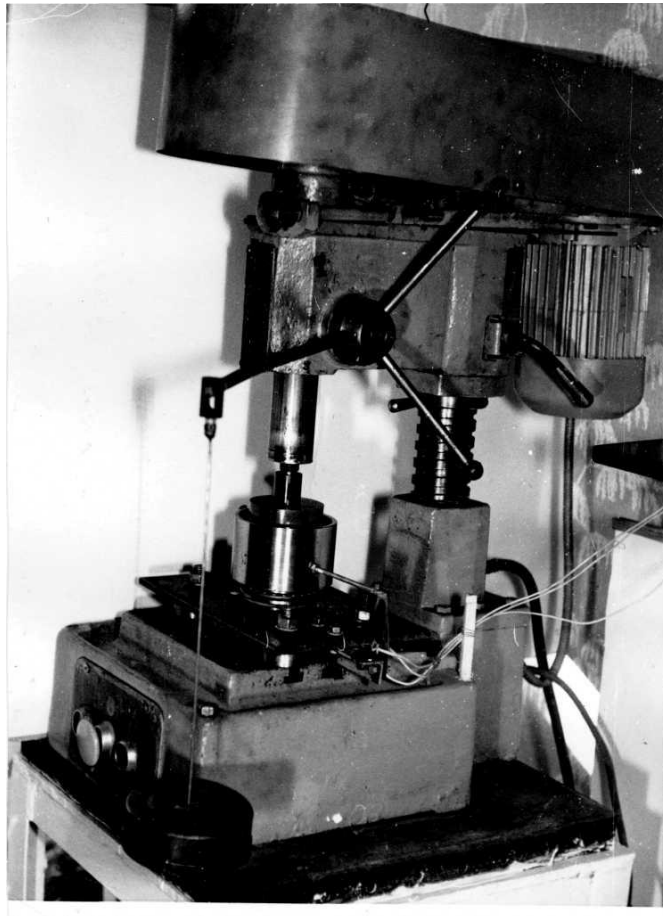


Рис. 2.10. Спеціальна установка для дослідження зносостійкості поверхонь оброблених притиральним складом [2]

Деформацію вигину балки, тобто, величину моменту тертя, вимірювали приладом і одночасно записували на діаграмну стрічку приладу самопису Н 327-1. Похибка виміру не перевищувала $\pm 3\%$. Для більш достовірних результатів перед кожною серією випробувань проводили тарування тензобалки [2].

Швидкість ковзання зразка і контрзразка становила 0,63 м/с. Навантаження створювали гравітаційним способом за допомогою важеля, що навантажується масою P і складало 1,2 МПа.

У якості змащувального складу застосовували моторну оливу «М-8В». Об'єм змащувального матеріалу у всіх дослідах фіксувався та становив 200 мл.

Для пар тертя температурний фактор є одним із провідних. Тому вимірювання температури нагріву деталей спряження має істотне значення для

розуміння природи та закономірностей розвитку процесу тертя та зносу.

Для визначення температури в обсязі мастильного матеріалу використовували термометр.

Зовнішній вигляд зразка та контрзразка для випробування наведено на рис.

2.6. Зношування зразків (контрзразків) визначали ваговим методом. Зразки зважували до та після випробувань на аналітичних терезах (рис. 2.7 та 2.8).

Тривалість випробувань складала три години.

За результатами всіх вимірювань для кожного зразка визначали середнє значення параметрів, що вимірювалися, і обчислювали інтенсивність зношування зразків (контрзразків) за формулою [8]:

$$I_g = \frac{m_1 - m_2}{l \cdot S}, \frac{\text{мг}}{\text{км} \cdot \text{см}^2}, \quad (2.4)$$

де m_1 і m_2 – маса зразка (контрзразка) до та після випробування, відповідно, мг;

l – довжина шляху пройденого зразком, км;

S – площа контакту зразка з контрзразком, см^2 .

Коефіцієнт тертя визначали за формулами 2.2 та 2.3.

Найкращу зносостійкість мала те спряження, у якої стабілізація коефіцієнта тертя була швидше і зразок та контрзразок мали найменшу шорсткість.

2.4 Висновки до другого розділу

1. Представлено методика лабораторних досліджень працездатності абразивної пасти.

2. Представлено методика дослідження антифрикційних властивостей, поверхонь оброблених абразивною пастою.

3. Представлено лабораторна установка, що реалізує процес притирання деталей і дозволяє з достатньою точністю оцінити ефективність притиральної пасти.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ ПРОЦЕСУ ПРИТИРАННЯ НА ЯКІСТЬ ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ СИЛКАТНИМ АБРАЗИВНИМ СКЛАДОМ

3.1 Дослідження комплексного впливу параметрів режиму притирання на якість поверхонь оброблених силікатним абразивним складом

Під технологічними чинниками процесу притирання розуміють сукупність параметрів і умов, які впливають на перебіг процесу утворення та видалення мікронерівностей поверхні при взаємодії абразивних зерен із матеріалом деталі. Від цих чинників залежить інтенсивність знімання матеріалу, якість обробленої поверхні та зносостійкість спряження.

До основних технологічних чинників притирання належать:

1. Режимні параметри:

- зусилля притискання клапана до сідла. Невелике (слабке пружинне притискання, менше 0,01 МПа) – низька продуктивність процесу. Надмірне зусилля (більше 0,05 МПа) неприпустиме – воно викликає прискорений знос сідла і клапана, виникають задири, деталі перегріваються. Оптимальний тиск забезпечує рівномірний контакт без задирів;

- швидкість відносного руху (обертальна, зворотно-поступальна). Висока швидкість (більше 400 хв.⁻¹) заборонені, оскільки вони викликають перегрів і пошкодження поверхні у вигляді мікротріщин. Малі оберти (менше 150 хв.⁻¹) – низька продуктивність процесу;

- час притирання. Тривалість притирання залежить від стану поверхні клапана і сідла. Короткий процес притирання не забезпечує герметичності спряження. Процес закінчується, коли на поверхні з'являється рівномірний матовий пояс шириною 1,5-2 мм.

2. Характеристики абразивного матеріалу:

- зернистість абразиву (розмір частинок). Груба (грубозерниста) – застосовується на початку для усунення нерівностей. Тонка (дрібнозерниста) –

використовується для остаточного доведення і отримання щільного прилягання.

- твердість і форма зерен;
- концентрація абразивних частинок у пасті чи суспензії.

3. Склад і властивості робочої абразивної пасты:

- тип мастильно-абразивної суміші (паста, суспензія);
- в'язкість, змазувальні властивості, здатність утримувати абразив.

4. Температурні умови процесу:

- виділення тепла в зоні обробки;
- умови охолодження та мастила.

5. Властивості матеріалу деталі:

- твердість і мікроструктура;
- схильність до пластичної деформації чи викришування.

Вплив характеристики абразивного матеріалу було досліджено в попередніх роботах [2, 8].

В роботі [2] досліджено вплив зернистості абразиву силікатного складу на час формування поверхневого шару та кількість металу, який знімається. Доведено, що висока якість поверхні після обробки силікатним складом обумовлена появою в процесі притирання аморфного кремнезему (SiO_2), який посилює роботу абразивних зерен і призводить до зменшення дії абразиву, що дряпає.

В роботі [8] встановлено, що при збільшенні твердості абразиву силікатного складу час формування поверхневого шару знаходиться в межах 4-6 хвилин, шорсткість притертої поверхні – в межах 0,11-0,15 мкм. Доведено, що висока якість поверхні після притирання силікатною пастою формується поверхня близька до оптимальної за рахунок зміни структури поверхневого шару притертої поверхні та насичення її оксидом кремнію. Хімічним аналізом підтверджено, що абразивне зерно, яке було задіяно у силікатному складі при обробці поверхні має округлену форму і покрите плівкою SiO_2 . Виявлено, що при притиранні поверхонь силікатною пастою з абразивом електрокорунду знімання металу в 1,35-1,5 рази менше, ніж при обробці пастою «КТ».

Таким чином, в роботі, яка розглядається пропонуємо виконати дослідження впливу параметрів режиму притирання на якість поверхонь оброблених силікатним абразивним складом.

Метою дослідження є визначення оптимальних значень параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом, які забезпечують максимальну якість обробленої поверхні клапанного спряження за критерієм шорсткості поверхні (R_a).

Об'єкти дослідження є робочі поверхні деталей, які обробляються. У нашому випадку це зразок, який модулює клапан і контрзразок – сідло головки циліндрів автомобільного двигуна.

Предмет дослідження: вплив параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом на шорсткість оброблених поверхонь.

Дослідження виконували на спеціальній установці, яка змонтована на станині універсального верстата ОПП-1841А призначеного для притирання клапанів автотракторних двигунів (рис. 2.1) [8].

У якості зразка використовували конус зі сталі 40Х (HRC 48) діаметром 23 мм, шириною 15 мм (рис. 2.6, а). Контрзразок мав форму кільця із чавуну СЧ 18-36 (HRC 32) діаметром 50 мм, шириною 10 мм з шириною робочої поверхні 3 мм (рис. 2.6, б). Вибір матеріалу даних пар тертя був зумовлений його використання для виготовлення тарілки клапана та сідла клапана. Вихідна шорсткість поверхонь тертя у всіх зразках була однаковою і становила $R_a = 1,25$ мкм [8].

Для проведення дослідження використовували склад силікатної пасти з абразивом карбід кремнієм зелений зернистістю 50/40, що рекомендовано у роботі [8].

Для порівняння працездатності силікатного абразивного складу використали існуючий склад пасти «КТ» з абразивом зернистістю 50/40, що застосовується у даний час для притирання клапанів автомобільних двигунів. Ці два склади відрізняються тим, що силікатний склад виготовлений на водній основі, а склад пасти «КТ» на основі індустріальної оливи.

При визначенні впливу часу (t) притирання на якість обробленої поверхні

(R_a) тиску (P) на зразок становив 0,03 МПа, зворотно-обертальна швидкість (V_{z-o}) зразка становила 0,4 м/с, час притирання (t) змінювався від 120 с до 600 с.

Дослідження виконували відповідно методики яка наведена у підрозділу 2.1. Оцінка велася за якістю поверхні, яка оброблялась та зніманню металу. Знімання металу визначали на мікροаналітичних терезах типу ВЛР-200 з точністю $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г (рис. 2.7 та 2.8) [8].

За результатами всіх вимірювань для кожного зразка визначали середнє значення параметрів, що вимірювалися, і обчислювали масове знімання металу за формулою (2.1).

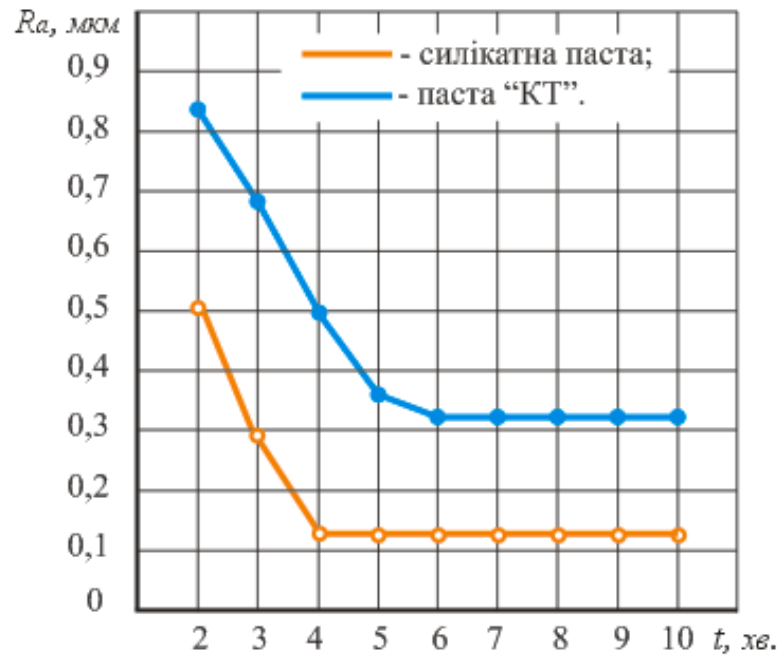
За допомогою профілографа-профілометра контролювали профіль поверхонь, які притиралися. Результати випробувань визначали як середнє арифметичне п'ятьох дослідів з похибкою $\pm 3\%$ [8].

Найкращу працездатність мав той склад пасти після притирання яким, зразок та контрзразок мали найменшу шорсткість і стабілізація коефіцієнта тертя була швидше [2, 8]. Результати досліджень наведено на рис. 3.1.

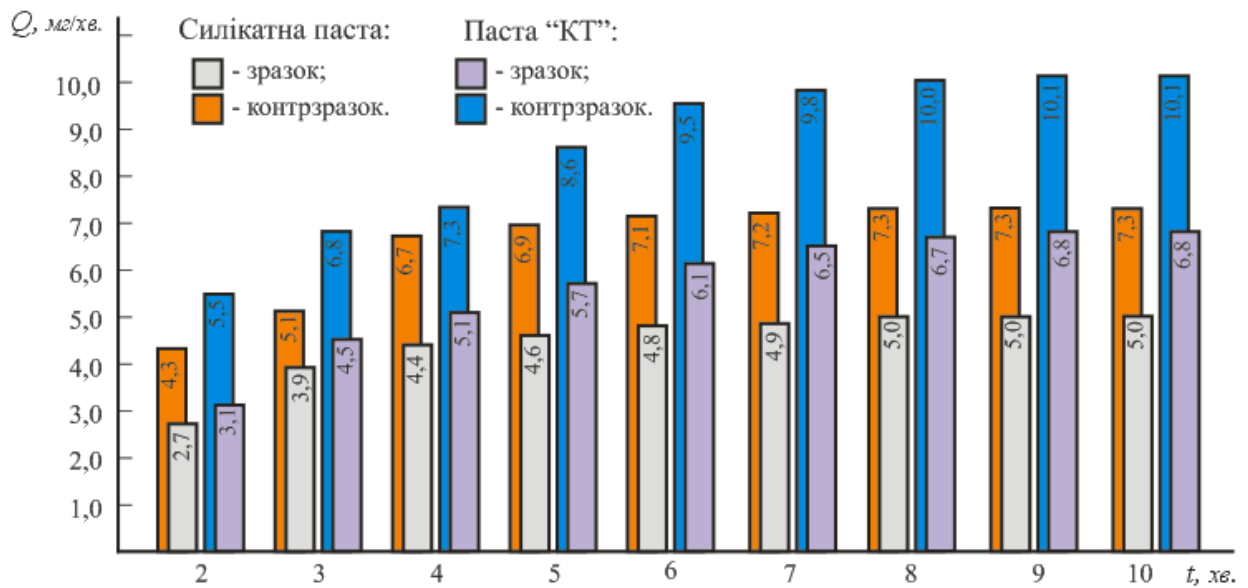
Аналіз рис. 3.1, *a* показав, що при зміні часу притирання силікатним абразивним складом від 2-х хвилин до 3-х та 4-х хвилин шорсткість поверхні (R_a) різко змінюється зменшується до $R_a = 0,3$ мкм (час притирання 2 хв.), $R_a = 0,2$ мкм (час притирання 3 хв.) і $R_a = 0,14$ мкм (час притирання 4 хв.). В цей час абразивні зерна швидко зрізають виступи мікронного рівня. Починаючи з 5-ти хвилинного притирання силікатним абразивним складом до 10-ти хвилинного шорсткість поверхні не змінюється і залишається на рівні $R_a = 0,12$ мкм, що свідчить про стабілізацію параметра шорсткості R_a і закінчення процесу формування якості поверхонь.

Для підтвердження закінчення процесу формування якості поверхонь притиранні силікатним абразивним складом було прийнято рішення прослідкувати динаміку зміни коефіцієнту тертя при притиранні силікатним абразивним складом та визначення шорсткості обробленої поверхні (R_a) і знімання металу (Q) при цьому.

Для порівняння результатів, як і у попередніх дослідах, використовували



а)



б)

Рис. 3.1. Залежність шорсткості поверхні (R_a , μm) (а) та знімання металу (Q , mg/h) (б) від часу притирання (t , h) силікатним абразивним складом і пастою «КТ» пари тертя сталь 40X (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32)

існуючий склад пасти «КТ». Результати дослідження наведено на рис. 3.2.

За результатами графіку 3.2, а видно, що при притиранні силікатним складом у початковий момент (перша хвилина) відбувається збільшення

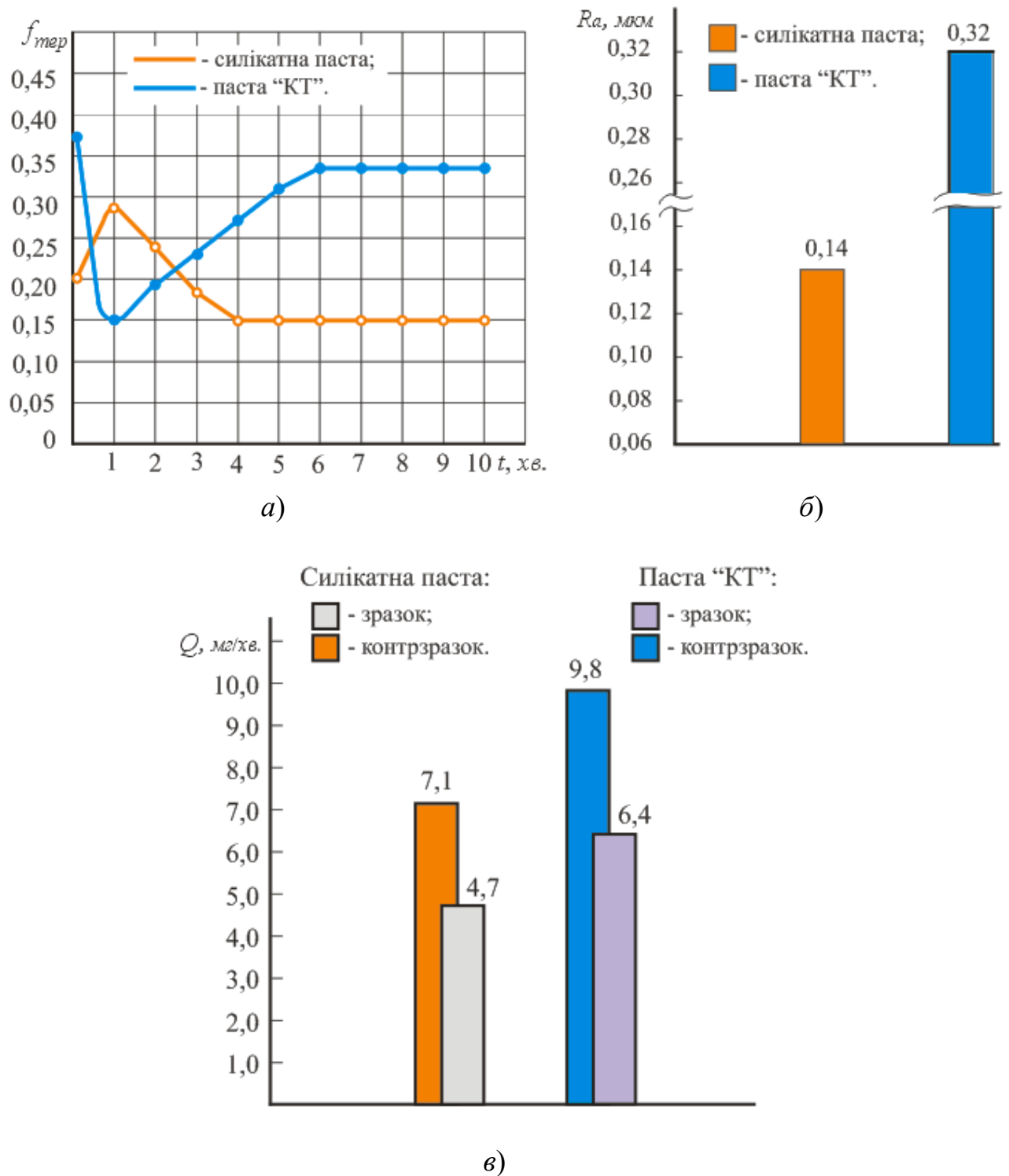


Рис. 3.2. Зміна коефіцієнта тертя ($f_{тер}$) (а), шорсткості поверхонь (R_a , мкм) (б) та знімання металу (Q , мг/хв.) (в) пари тертя сталь 40Х (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32) при притиранні силікатним абразивним складом і пастою «КТ»

коефіцієнта тертя за рахунок дії гострих кромок абразиву. Надалі, можливо, відбувається притуплення цих кромок та обволакування абразиву оксидом кремнію, що призводить до зниження коефіцієнта тертя [2, 7].

Стабілізація коефіцієнта тертя при притиранні силікатним складом відбувається на четвертій хвилині. При цьому значення коефіцієнта тертя становить $f_{тер} = 0,15$. Стабілізація коефіцієнта тертя при притиранні вказує на завершення процесу формування поверхневого шару і закінчується на 4 хвилині.

При притиранні пастою «КТ», спочатку відбувається зниження коефіцієнта тертя за рахунок роботи масляної плівки, оскільки склад виготовлено на основі індустріальної оливи. Починаючи з другої хвилини притирання, плівка зношується і в роботу вступають абразивні зерна. Абразивні зерна впроваджуються в поверхню, яка обробляється і зрізають вершини мікронерівностей, що призводить до збільшення коефіцієнта тертя. Цей процес продовжується до шостої хвилини (рис. 3.2, а) і коефіцієнт тертя складає $f_{тер} = 0,34$. Як було вище наведено, йде процес формування остаточної шорсткості поверхней тертя. Починаючи з шостої хвилини відбувається стабілізація коефіцієнту тертя і у наступні три хвилини притирання залишається незмінним ($f_{тер} = 0,34$) [8].

Аналіз рис. 3.2, б показав, що після притирання силікатним абразивним складом шорсткість поверхні складає $R_a = 0,14$ мкм, а пастою «КТ» – $R_a = 0,32$ мкм.

На рис. 3.3 наведено фотографії поверхонь і профілограми поверхонь зразків після притирання абразивними складами.

Висока якість поверхні після обробки силікатним складом порівняно з поверхнею, яка оброблена пастою «КТ» обумовлено тим, що при взаємному переміщенні поверхонь відбувається різання-дряпання абразивними зернами найвищих вершин нерівностей. У точках зіткнення абразивних частинок відбувається підвищення температури, а оскільки навколо абразиву знаходиться SiO_2 , то при попаданні останнього в зону зіткнення відбувається утворення аморфного кремнезему (SiO_2), який має поліруючу дію високодисперсного, відносно м'якого абразиву. І це призводить до високої якості поверхні після притирання силікатним складом [4, 8].

Аналізуючи рис. 3.2, в видно, що після притирання зразків силікатним

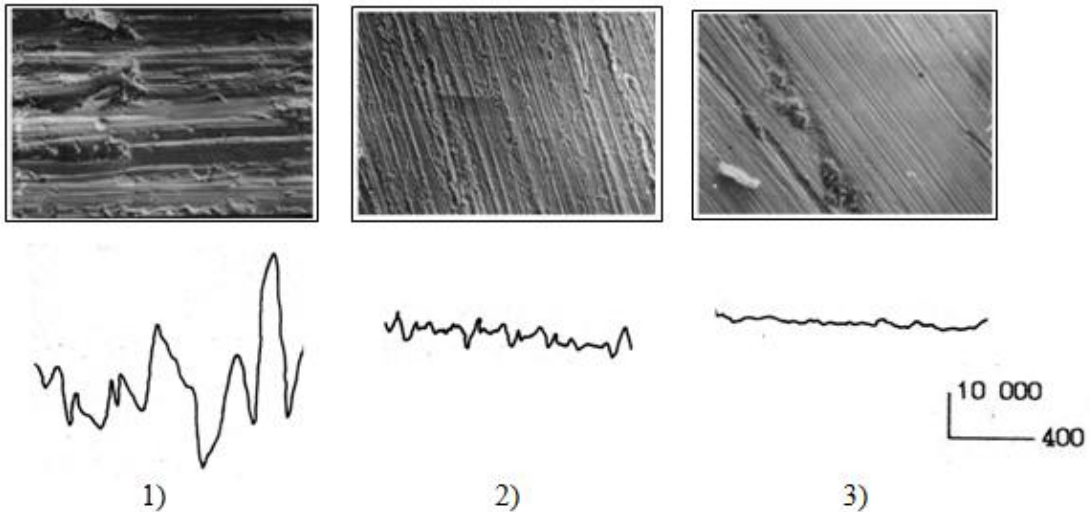


Рис. 3.3. Фотографії і профілограми поверхонь зразків після притирання абразивними складами (x400): 1 – вихідна; 2 – пастою «КТ»; 3 – силікатною пастою [4, 8]

складом знімання металу складає $Q = 4,7$ мг/хв. для зразка і $Q = 7,1$ мг/хв. для контрзразка. При притиранні пастою «КТ» знімання металу складає $Q = 9,8$ мг/хв. для контрзразка і $Q = 6,4$ мг/хв. для зразка. На підставі такого результату можна відзначити, що при притиранні поверхні силікатним складом знімання металу Q в 1,4 рази менше, ніж при обробці пастою «КТ». Таким чином, при призначенні припуску на обробку необхідно це враховувати.

Отже, можна відзначити, що при притиранні силікатним складом достатньо чотири хвилини, а пастою «КТ» – 6 хвилин. В результаті цього можна стверджувати, що продуктивність притирання силікатною пастою в 1,5 рази вище, ніж при обробці пастою «КТ».

Аналізуючи рис. 3.1, б, можна сказати, що при збільшенні часу при притиранні силікатним складом від $t = 2$ хв до $t = 4$ хв знімання металу значно збільшується і на $t = 4$ хв складає $Q = 4,4$ мг/хв. для зразка і $Q = 6,7$ мг/хв. для контрзразка. При притиранні пастою «КТ» від $t = 2$ хв до $t = 6$ хв знімання металу збільшується і на $t = 6$ хв складає $Q = 6,1$ мг/хв. для зразка і $Q = 9,5$ мг/хв. для контрзразка. На нашу думку це відбувається в результаті того, що паста свіжа, абразивні зерна на початку притирання гострі в цей час зрізаються найбільш виступаючі мікронерівності.

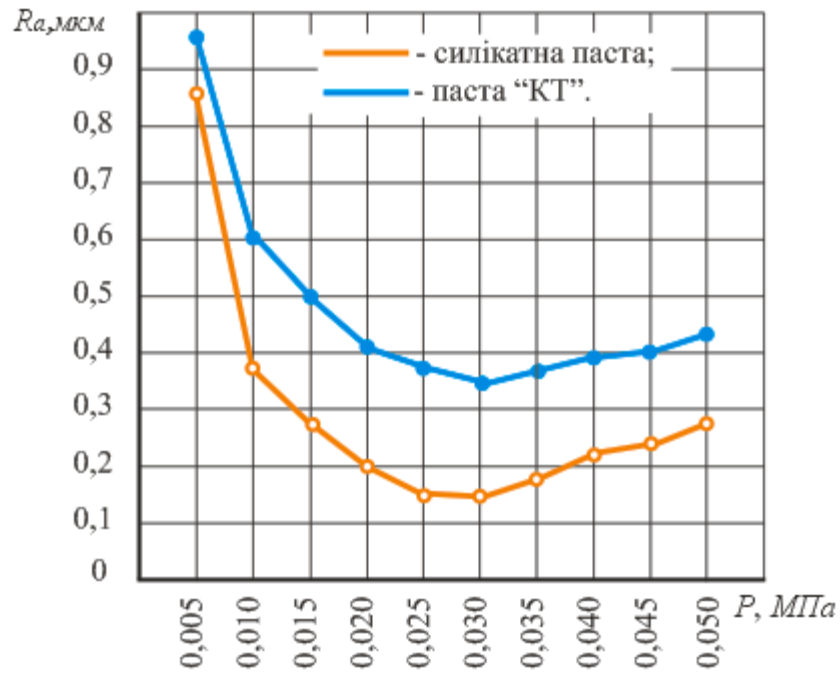
При збільшенні часу при притиранні силікатним складом до $t = 5$ хв, а пастою «КТ» до $t = 7$ хв поверхня стає рівнішою, висота мікронерівностей падає, кількість «виступів», які абразив може зрізати, різко зменшується і знімання металу збільшується незначно. При подальшому збільшенні часу притирання до $t = 7$ хв абразивні зерна притиральних складів притуплюються, частинки зносу засмічують абразив, знімання стає мінімальним або практично припиняється. Тому довге притирання не призводить до підвищення якості обробленої поверхні, а тільки знижує ефективність притирання.

За результатами аналізу рис. 3.1, б можна стверджувати, що при притиранні поверхні силікатним складом знімання металу Q в 1,4 рази менше, ніж при обробці пастою «КТ».

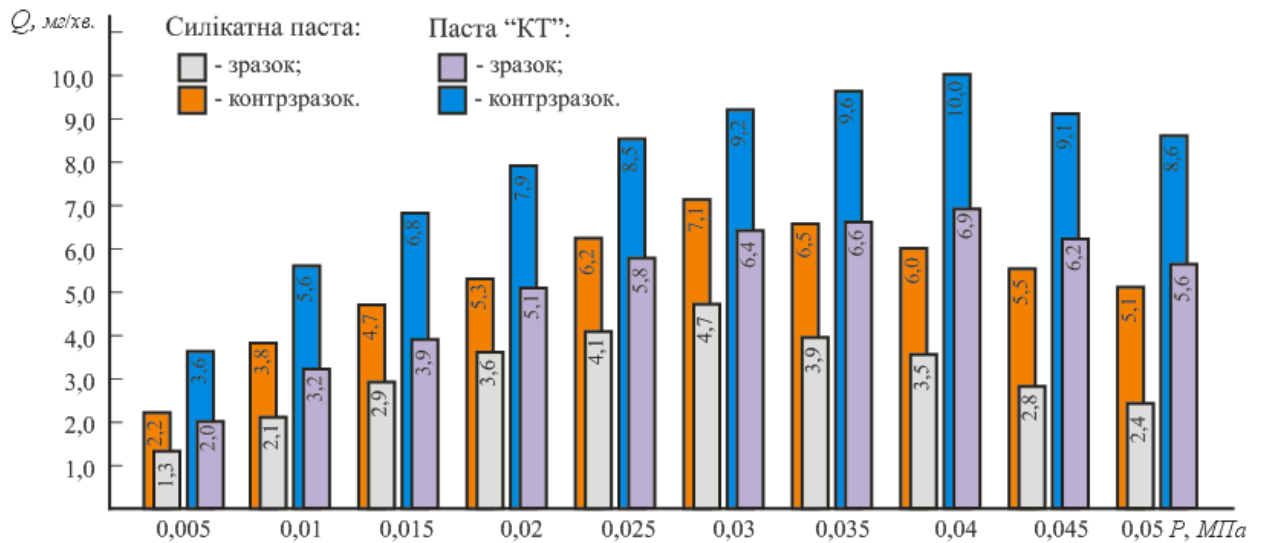
При визначенні залежності якості обробленої поверхні (R_a) від питомого тиску (P) на зразок зворотно-обертальна швидкість (V_{z-o}) зразка становила 0,4 м/с. Результати попередніх досліджень (рис. 3.1, а) показали, що формування шорсткості поверхонь (R_a) оброблених силікатним складом досягнуто на 4 хвилині, а при притиранні пастою «КТ» – на 6 хвилині. Тому було прийнято рішення щодо створення однакових умов обробки та порівняння результатів притирання вести на протязі 6 хвилин, тобто час притирання (t) дорівнює – 360 с. Питомий тиск (P) на зразок у цьому дослідженні змінювався від 0,005 МПа до 0,05 МПа. Результати дослідження наведено на рис. 3.4.

Аналізуючи рис. 3.4, а, можна сказати, що при питомому тиску на зразок $P = 0,005$ МПа зерна абразиву при притиранні погано врізаються в поверхню металу і працюють переважно як полірувальні. Тому при цьому питомому тиску шорсткість оброблених поверхонь змінюється незначно. При притиранні силікатним складом воно досягає $R_a = 0,86$ мкм, при обробці пастою «КТ» – $R_a = 0,95$ мкм.

При збільшенні питомого тиску від 0,01 до 0,03 МПа шорсткість обробленої поверхні покращується, як при притиранні силікатним складом так і пастою «КТ». При цьому процесі зерна абразиву вдавлюються настільки, щоб відбувалося контрольоване мікрорізання і пластичне згладжування.



а)



б)

Рис. 3.4. Залежність шорсткості поверхні (R_a , μm) (а) та знімання металу (Q , mg/h) (б) від питомого тиску (P , MPa) на зразок при притиранні силікатним абразивним складом і пастою «КТ» пари тертя сталь 40X (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32)

При притиранні силікатним складом шорсткість поверхні зменшується від $R_a = 0,38$ μm до $R_a = 0,15$ μm і мінімальне значення досягає при питомому тиску

$P = 0,025-0,03$ МПа. При притиранні пастою «КТ» шорсткість поверхні зменшується від $R_a = 0,6$ мкм до $R_a = 0,35$ мкм і мінімальне значення досягає при питомому тиску $P = 0,03$ МПа.

При наступному збільшенні питомого тиску від 0,03 до 0,05 МПа шорсткість обробленої поверхні збільшується. При притиранні силікатним складом – $R_a = 0,19-0,29$ мкм, при обробці пастою «КТ» – $R_a = 0,38-0,42$ мкм.

Підводячи підсумок аналізу рис. 3.4 а, можна відзначити, що динаміка зміни залежності однакова, як при притиранні силікатним складом так і пастою «КТ».

Аналіз рис. 3.4, б показав, що у процесі притирання при найменшому питомому тиску на зразок ($P = 0,005$ МПа) знімання металу є мінімальним, але абразив може «ковзати», залишаючи окремі мікроподряпини, що і впливає на шорсткість поверхні. При збільшенні питомого тиску збільшується кількість активних абразивних зерен у зоні контакту поверхонь та глибина їх вдавлювання, що призводить до підвищенню знімання металу.

При притиранні силікатним складом підвищення знімання металу відбувається при питомому тиску до 0,03 МПа, при обробці пастою «КТ» при питомому тиску до 0,04 МПа. При такому питомому тиску знімання металу для силікатного складу складає $Q = 4,7$ мг/хв. для зразка і $Q = 7,1$ мг/хв. для контрзразка. При притиранні пастою «КТ» – $Q = 10,0$ мг/хв. для контрзразка і $Q = 6,9$ мг/хв. для зразка (рис. 3.4, б). Бачимо, що при притиранні поверхні силікатним складом знімання металу Q в 1,4 рази менше, ніж при обробці пастою «КТ».

При подальшому збільшенні питомого тиску на зразок, на нашу думку, може відбуватися руйнування абразивних зерен, абразивні зерна можуть вдавлюються занадто глибоко, залишаючи глибокі риски, паста при таких умовах може вичавлюватися із зони контакту, в цей момент знімання металу перестає зростати і починає зменшуватися, за рахунок цього якість поверхні погіршується.

При визначенні впливу зворотно-обертальної швидкості (V_{3-0}) зразка на

якість обробленої поверхні (R_a) питомий тиск (P) на зразок становив 0,03 МПа (при цьому враховували попереднього дослідження), час притирання (t) – 360 с, зворотно-обертальна швидкість (V_{z-o}) зразка змінювалася від 0,1 м/с до 0,9 м/с. Результати дослідження наведено на рис. 3.5.

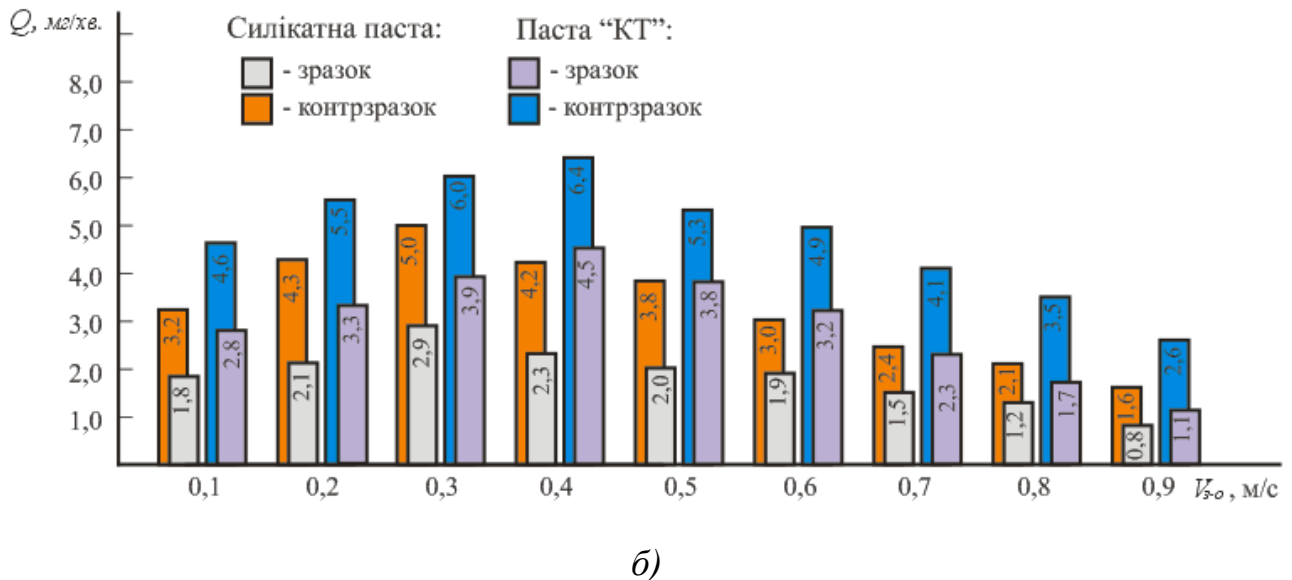
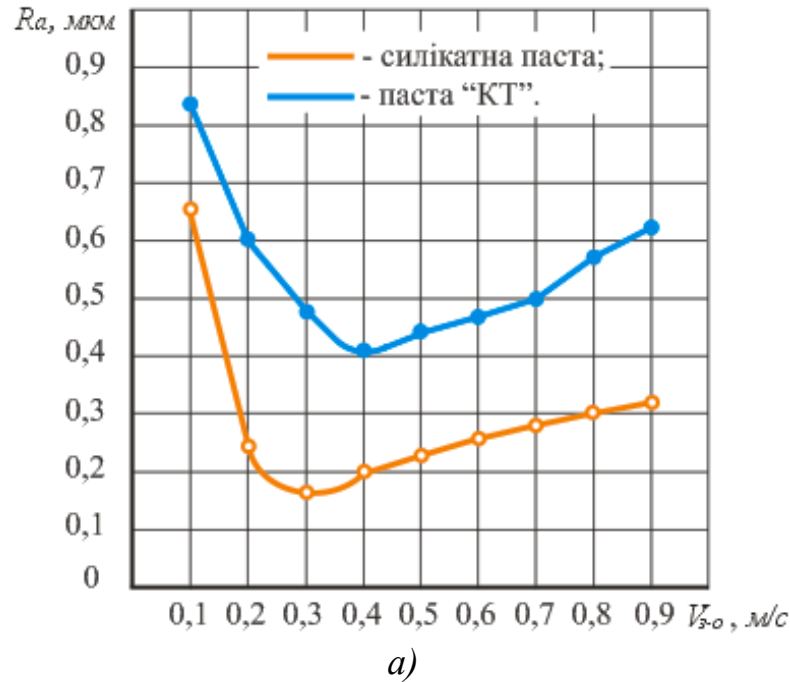


Рис. 3.5. Залежність шорсткості поверхні (R_a , мкм) (а) та знімання металу (Q , мг/хв.) (б) від зворотно-обертальної швидкості (V_{z-o} , м/с) зразка при притиранні силікатним абразивним складом і пастою «КТ» пари тертя сталь 40X (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32)

Аналіз результатів (рис. 3.5, *a*) показав, що при зворотно-обертальній швидкості зразка $V_{z-o} = 0,1$ м/с шорсткість обробленої поверхні велика. Для поверхонь, які притерти силікатним складом вона складає $R_a = 0,53$ мкм, а для поверхонь, які оброблені пастою «КТ» – $R_a = 0,75$ мкм. При притиранні поверхонь з такою зворотно-обертальною швидкістю зразка, на нашу думку, абразивні зерна працюють локально, абразивний склад погано перемішується. В результаті цього виникають окремі мікроподряпини та «плями» через нерівномірне знімання металу. Тому шорсткість обробленої поверхні велика через появу поодиноких глибоких рисок.

При збільшенні зворотно-обертальної швидкості зразка шорсткість обробленої поверхні зменшується. При притиранні силікатним складом зі зворотно-обертальною швидкістю зразка $V_{z-o} = 0,3$ м/с шорсткість поверхні мінімальна і складає $R_a = 0,18$ мкм (рис. 3.5, *a*). Мінімальна шорсткість обробленої поверхні складає $R_a = 0,4$ мкм при обробці пастою «КТ» зі зворотно-обертальною швидкістю зразка $V_{z-o} = 0,4$ м/с. При таких зворотно-обертальних швидкостях зразка, на нашу думку, рух досить інтенсивний, щоб зерна абразиву рівномірно зрізали мікронні виступи, паста постійно перемішується, продукти зносу відводяться.

Подальше збільшення зворотно-обертальної швидкості зразка при притиранні силікатним складом від $V_{z-o} = 0,3$ м/с до $V_{z-o} = 0,9$ м/с шорсткість обробленої поверхні збільшується. При обробці пастою «КТ» це відбувається при підвищенні зворотно-обертальної швидкості зразка від $V_{z-o} = 0,3$ м/с до $V_{z-o} = 0,9$ м/с (рис. 3.5, *a*). Погіршення якості обробленої поверхні при високих зворотно-обертальних швидкостях притирання, на нашу думку, виникає в результаті того, що мастильний шар і паста частково вичавлюються з зони контакту, абразивні зерна починають діяти більш агресивно. Через це можуть утворюватися борозни, підвищуватися температура, з'являється ризик появи мікрозадирів.

Аналізуючи рис. 3.5, *б*, можна сказати, що при збільшенні зворотно-

обертальної швидкості при притиранні силікатним складом до $V_{z-o} = 0,3$ м/с, а при обробці пастою «КТ» до $V_{z-o} = 0,4$ м/с знімання металу збільшується. У цьому процесі абразивний склад рівномірно розподіляється і ефективність притирання збільшується. Максимальне знімання металу при притиранні силікатним складом складає $Q = 2,9$ мг/хв. для зразка і $Q = 5,0$ мг/хв. для контрзразка. При притиранні пастою «КТ» максимальне знімання металу складає $Q = 6,4$ мг/хв. для контрзразка і $Q = 4,5$ мг/хв. для зразка (рис. 3.5, б).

При подальшому збільшенні зворотно-обертальної швидкості притирання знімання металу зменшується, призводить до знижування ефективності процесу (рис. 3.5, б). Як і у попередніх дослідях бачимо, що при притиранні поверхні силікатним складом знімання металу Q в 1,4 рази менше, ніж при обробці пастою «КТ».

Підводячи підсумок аналізу рис.3.1-3.5 відмічаємо, що при притиранні силікатним абразивним складом якість обробленої поверхні вище ніж при притиранні пастою «КТ». Це пояснюється тим, що у процесі притирання силікатним абразивним складом відбувається утворення оксиду кремнію (SiO_2). Під дією абразивних частинок SiO_2 потрапляє у западини оброблюваної поверхні та зчіпляється з поверхнею. При багаторазовому впливі частинок відбувається щільна «упаковка» SiO_2 глибоких западин нерівностей, що дозволяє отримати високу якість поверхні [7].

Приймаючи до уваги отримані результати, було прийнято рішення у наступному підрозділі виконати оптимізацію параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом зі застосуванням математичного апарату.

3.2 Оптимізація параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом

З метою визначення оптимальних параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом, що забезпечує найменшу шорсткість поверхні після обробки, було розроблено та реалізовано план повного факторного експерименту типу $N = 2^3 = 8$ [2].

Граничні значення незалежних чинників (тиск на зразок (P), зворотно-обертальна швидкість зразка($V_{з-о}$), час притирання (t)) вибирали, з результатів попередніх експериментів.

Дослідження виконували на спеціальній установці, яка змонтована на станині універсального верстата ОПР-1841А призначеного для притирання клапанів автотракторних двигунів.

Для проведення дослідження використовували склад силікатної пасти з абразивом карбід кремнієм зелений зернистістю 50/40, що рекомендовано у роботі.

У якості зразка використовували конус зі сталі 40X (HRC 48) діаметром 23 мм, шириною 15 мм (рис. 2.6, а). Контрзразок мав форму кільця із чавуну СЧ 18-36 (HRC 32) діаметром 50 мм, шириною 10 мм з шириною робочої поверхні 3 мм (рис. 2.6, б). Вихідна шорсткість поверхонь тертя у всіх зразках була однаковою і становила $R_a = 1,25$ мкм [9].

Час притирання у всіх дослідах складав 10 хв. По закінченню притирання визначали шорсткість поверхні після обробки та масове знімання металу відповідно методики, яка наведена у підрозділу 2.1.

Середнє значення випробувань визначалося як середнє арифметичне п'ятьох дослідів з похибкою $\pm 3\%$ [8].

Отримані значення параметра оптимізації – шорсткості поверхні зразків (R_a , мкм) та значення незалежних факторів наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Значення незалежних факторів та параметра оптимізації

Номер дослідів	Значення незалежних факторів			Шорсткість поверхні зразків, R_a , мкм.
	Тиск на зразок, МПа, x_1	Зворотно-обертальна швидкість зразка, м/с, x_2	Час притирання, с, x_3	
1	2	3	4	5
1	0,01	0,3	240	0,118

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5
2	0,01	0,3	600	0,158
3	0,01	0,6	240	0,138
4	0,01	0,6	600	0,178
5	0,05	0,3	240	0,118
6	0,05	0,3	600	0,168
7	0,05	0,6	240	0,158
8	0,05	0,6	600	0,218

Проводився експеримент типу 2^3 , де число факторів $k=3$, кількість рівнів $p=2$, число дослідів $N=8$, повторних дослідів $n=5$.

Матриця планування наведена у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Матриця планування

Номер досліду	Матриця планування								Робоча матриця			Результати паралельних експериментів	Середнє значення, \bar{y}_i , мкм
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	Тиск на зразок, x_1	Зворотно-обертальна швидкість, x_2	Час притирання, x_3		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,01	0,3	240	0,12 0,12 0,12 0,11 0,12	0,118
2	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	0,01	0,3	600	0,16 0,15 0,16 0,16 0,16	0,158
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	0,01	0,6	240	0,14 0,14 0,14 0,13 0,14	0,138

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	0,01	0,6	600	0,18 0,18 0,18 0,17	0,178
5	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	0,05	0,3	240	0,12 0,12 0,12 0,11 0,12	0,118
6	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0,05	0,3	600	0,17 0,16 0,17 0,17 0,17	0,168
7	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,05	0,6	240	0,16 0,16 0,16 0,16 0,15	0,158
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0,05	0,6	600	0,21 0,22 0,22 0,22 0,22	0,218

Після проведення дослідів виконано статистичну обробку результатів.

Спочатку визначали помилки повторних (паралельних) дослідів.

Середньоквадратичне відхилення визначаємо за формулою [11]:

$$S_i^2 = \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (3.1)$$

де \bar{y} – середнє арифметичне значення параметра оптимізації з п'яти повторних дослідів (значення наведено у табл. 3.3).

Результати розрахунків зведено до табл. 3.3.

Для визначення браку використовуємо критерій Стьюдента [2]:

$$\frac{y-\bar{y}}{S} \geq t, \text{ або } t_{роз} \geq t_{табл.}, \quad (3.2)$$

Таблиця 3.3

Результати розрахунків

Номер досліджу	1	2	3	4	5	6	7	8	Сума
S_i^2	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00016
S_i	0,00447	0,00447	0,00447	0,00447	0,00447	0,00447	0,00447	0,00447	
$\frac{y_{max} - \bar{y}}{S}$	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	
$\frac{\hat{y} - y_{min}}{S}$	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	

де t – критерій Стьюдента, його значення для 5 повторних дослідів і довірчої ймовірності 0,95 дорівнює 2,78 [12].

Для всіх дослідів $t_{роз} = 1,79$ умова $t_{роз} \geq t_{табл.}$ не виконується, отже, результати повторних дослідів не можемо вважати помилковими.

Для проведення регресійного аналізу розраховали однорідності дисперсії паралельних дослідів за критерієм Кохрена:

$$G_{роз.} = \frac{S_{max}^2}{\sum_1^N S_i^2} = \frac{0,00002}{0,0016} = 0,125. \quad (3.3)$$

Розрахункове значення критерію порівнювали з табличним для ступенів свободи: $f_1 = r - 1$; знаменника $f_2 = N$ за обраного рівня значущості $\alpha = 0,05$; $G_{табл.}$ – табличне значення критерію Кохрена – 0,5157 [13].

$$G_{табл.} = 0,5157 > G_{роз.} = 0,125. \quad (3.4)$$

Отже, гіпотеза про однорідність дисперсії паралельних дослідів приймається. Звідси дисперсія відтворюваності склала $S_i^2 = 0,00002$. Помилка експерименту склала $S_i = 0,00447$.

Рівняння математичної моделі з урахуванням парних взаємодій має вигляд [11]:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (3.5)$$

Коефіцієнти регресії за повного факторного експерименту визначають за формулами [11]:

$$b_0 = \frac{\sum_1^N \hat{y}_u}{N}; \quad (3.6)$$

$$b_i = \frac{\sum_1^N x_{iu} \hat{y}_u}{N}; \quad (3.7)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_1^N x_{iu} x_{ju} \hat{y}_u}{N}; \quad i \neq j; \quad (3.8)$$

$$b_{ijk} = \frac{\sum_1^N x_{iu} x_{ju} x_{ku} \hat{y}_u}{N}; \quad i \neq j \neq k. \quad (3.9)$$

Коефіцієнти регресії, розраховані за наведеними вище виразами, дорівнюють: $b_0 = 0,15675$; $b_1 = 0,00875$; $b_2 = 0,01625$; $b_3 = 0,02375$; $b_{1,2} = 0,00625$.

З урахуванням значення дисперсії відтворюваності $S_i^2 = 0,00002$ довірчою ймовірністю $\alpha = 0,95$ знаходимо межі довірчих інтервалів для коефіцієнтів регресії [2]:

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot S_i}{\sqrt{N}} = \pm \frac{2,78 \cdot 0,00447}{\sqrt{8}} = \pm 0,004. \quad (3.10)$$

Порівнюючи значення коефіцієнтів регресії з межами довірчих інтервалів бачимо, що коефіцієнти b_{12} , b_{13} і b_{123} незначні. Тепер рівняння математичної моделі має вигляд:

$$\hat{y} = 0,15675 + 0,00875x_1 + 0,01625x_2 + 0,02375x_3 + 0,00625x_{1,2}. \quad (3.11)$$

Перевіряємо адекватність отриманого рівняння.

Обчислюємо теоретичні значення параметра оптимізації \hat{y} , величину похибки $\Delta y = y - \hat{y}$, результати занесені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Результати розрахунків

Номер досліджу	1	2	3	4	5	6	7	8
\hat{y}	0,114	0,162	0,134	0,18	0,119	0,167	0,164	0,212
Δy	0,004	-0,004	0,004	-0,002	-0,001	0,001	-0,006	0,006
Δy^2	0,00001	0,00001	0,00001	0,000006	0,000002	0,000002	0,00004	0,00004

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_1^N \Delta y_i^2}{f}, \quad (3.12)$$

де $f=N-(k+1) = 8-(3+1) = 4$ – число ступенів свободи.

$$S_{ад}^2 = \frac{0,000129}{4} = 0,000032.$$

Адекватність математичної моделі визначаємо за критерієм Фішера [12]:

$$F_{роз.} = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{0,000032}{0,00002} = 1,6. \quad (3.13)$$

$F_{табл.} = 6,39$ [13]. $F_{роз.} \leq F_{табл.}$, отже, модель адекватна.

Аналізуючи рівняння 3.11 математичної моделі можна відмітити, що на параметр оптимізації впливають незалежні фактори. Кожен коефіцієнт характеризує роль відповідної змінної у процесі чи силу впливу факторів. Чим більша чисельна величина коефіцієнта, тим більше впливає фактор. Якщо коефіцієнт має знак «+», то зі збільшенням значення чинника параметр відгуку (оптимізації) збільшується, і якщо «-» зменшується. Величина коефіцієнта відповідає вкладу даного фактора величину параметра оптимізації при переході фактора з нульового рівня на верхній або нижній [2].

Якісний аналіз отриманого рівняння 3.11 дозволяє зробити такі висновки щодо впливу незалежних факторів при притиранні спряження силікатним абразивним складом на шорсткість обробленої поверхні (R_a). Найбільший вплив на шорсткість обробленої поверхні має час притирання. Про це свідчить значення коефіцієнта регресії b_3 у рівнянні 3.11, яке складає 0,02375. Менший

вплив на шорсткість обробленої поверхні дають зворотно-обертальна швидкість зразка ($b_2 = 0,01625$) і тиск на зразок ($b_1 = 0,00875$).

З рівняння 3.11 також видно, що на шорсткість обробленої поверхні впливає взаємодія зворотно-обертальної швидкості зразка та тиск на зразок і цей вплив найменший ($b_{1,2} = 0,00625$).

З метою визначення оптимальних значень параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом проводили оптимізаційне дослідження методом «крутого сходження». Під час руху в факторному просторі незалежні змінні змінювали пропорційно до величин коефіцієнтів регресії з урахуванням їх знаків. Для цього визначали крок руху по кожному фактору і проводили «уявні» досліди, які полягали у обчисленні значень функції відгуку в точках факторного простору, що лежать на шляху до оптимуму. Здійснювали уявний рух до оптимуму. Для зручності розрахунків кодові значення факторів були переведені у натуральні шляхом декодування за формулами 2.5 та 2.6 [2].

Отримані значення наведено у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Стандартна матриця експерименту

Фактори	Верхній рівень, C_i^+	Нижній рівень, C_i^-	Основний рівень, C_i^0	Інтервал варіювання, Δx_i	Залежність кодової змінної від натуральної
1	2	3	4	5	6
C_1	0,05	0,01	0,03	0,02	$x_1 = \frac{C_1 - 0,03}{0,02}$
C_2	0,6	0,3	0,45	0,15	$x_2 = \frac{C_2 - 0,45}{0,15}$
C_3	600	240	420	180	$x_3 = \frac{C_3 - 420}{180}$

У таблиці 3.6 представлені результати здійснених та «уявних» дослідів руху по лінії «крутого сходження».

Таблиця 3.6

Результати здійснених та «уявних» дослідів

Досліди	Незалежні фактори			Параметр оптимізації R_a , мкм
	C_1 Тиск на зразок, МПа (P)	C_2 Зворотно-обертальна швидкість зразка, м/с (V_{3-0})	C_3 Час притирання, с (t)	
1) Уявний	0,05	1,1	600	0,193
2) Здійснений	0,05	1,1	600	0,218
3) Уявний	0,01	1,1	600	0,163
4) Здійснений	0,01	1,1	600	0,178
5) Уявний	0,05	0,3	600	0,148
6) Здійснений	0,1	0,3	240	0,168
7) Уявний	0,1	0,3	600	0,143
8) Здійснений	0,1	0,3	600	0,158
9) Уявний	0,5	1,1	240	0,157
10) Здійснений	0,5	1,1	240	0,158
11) Уявний	0,1	1,1	240	0,131
12) Здійснений	0,1	1,1	240	0,138
13) Уявний	0,1	0,3	240	0,107
14) Здійснений	0,1	0,3	240	0,118
15) Уявний	0,3	0,3	240	0,109
16) Уявний	0,3	0,3	600	0,145
17) Уявний	0,3	1,1	420	0,16

Значення параметра оптимізації в «уявних» дослідах, на підставі значень таблиці 3.5 визначали за такою формулою:

$$R_a = 0,15675 + 0,00875 \cdot \left(\frac{C_1 - 0,3}{0,2}\right) + 0,01625 \cdot \left(\frac{C_2 - 0,7}{0,4}\right) + 0,02375 \cdot \left(\frac{C_3 - 420}{180}\right) + 0,00625 \cdot \left(\frac{C_1 - 0,3}{0,2}\right) \cdot \left(\frac{C_2 - 0,7}{0,4}\right), \text{ мкм};$$

$$R_a = 0,0762 - 0,0109C_1 + 0,0172C_2 + 0,0001C_3 + 0,0781C_1C_2, \text{ мкм}, \quad (3.16)$$

де C_1 – тиск на зразок (P), МПа;

C_2 – зворотно-обертальна швидкість зразка (V_{3-0}), м/с;

C_3 – час притирання (t), с.

Уявні досліди були припинені в досліді 17. Подальше дослідження було припинено, оскільки, як видно з табл. 3.6, параметр оптимізації (R_a) починає зростати. Це дає підставу вважати, що область оптимуму досягнуто [2].

Аналіз результатів таблиці 3.6 показав, що найменша шорсткість (R_a) обробленої поверхні отримана у дослідях 13 (уявний, $R_a=0,107$) та 14 (здійснений, $R_a=0,118$) при наступних значеннях параметрів режиму: $P = 0,1$ МПа; $V_{z-o} = 0,3$ м/с; $t = 240$ с. При збільшенні тиску на зразок ($P = 0,3$ МПа), при тих же значеннях $V_{z-o} = 0,3$ м/с; $t = 240$ с, шорсткість обробленої поверхні незначно збільшується, як показано у таблиці 3.6 (дослід 15, уявний, $R_a=0,109$ мкм). При збільшенні часу притирання (дослід 16, уявний, $t = 600$ с) та зворотно-обертальної швидкості (дослід 17, уявний, $V_{z-o} = 1,1$ м/с) шорсткість обробленої поверхні значно погіршується, $R_a=0,145$ мкм та $R_a=0,16$, відповідно.

Таким чином, з аналізу результатів здійснених та «уявних» дослідів (табл. 3.6) видно, що за оптимальні значення параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом можна прийняти результати дослідів 13 (уявний) та 15 (уявний) на підставі кращої шорсткості обробленої поверхні.

Враховуючи те, що при більшому тиску на зразок можна усунути більш глибокі нерівності, пропонуємо для досягнення мінімального значення параметра оптимізації (R_a) наступні значення параметрів режиму притирання силікатним абразивним складом:

- питомий тиск на зразок – $P = 0,03$ МПа;
- зворотно-обертальна швидкість зразка – $V_{z-o} = 0,3$ м/с;
- час притирання – $t = 240$ с.

3.3 Висновки до третього розділу

1. Підтверджено, що висока якість поверхні після притирання силікатним абразивним складом відбувається за рахунок утворення оксиду кремнію (SiO_2). Під дією абразивних частинок SiO_2 потрапляє у западини оброблюваної поверхні

та зчіпляється з поверхнею. При багаторазовому впливі частинок відбувається щільна «упаковка» SiO_2 глибоких западин нерівностей.

2. Встановлено, що шорсткість поверхні при притиранні як силікатним складом так і пастою «КТ» спочатку зменшується зі збільшенням питомого тиску, але після певного «оптимуму» ($P = 0,03$ МПа) починає зростати через глибокі риски та нестачу мастильного шару.

3. Встановлено, що шорсткість поверхні при притиранні абразивним складом спочатку зменшується із зростанням зворотно-обертальної швидкості зразка до оптимального значення, а при надмірному підвищенні швидкості знову зростає. При притиранні силікатним складом оптимальне значення зворотно-обертальної швидкості складає $0,3$ м/с, а пастою «КТ» – $0,4$ м/с.

4. Підтверджено, що продуктивність притирання силікатним абразивним складом в $1,5$ рази вище, ніж при обробці пастою «КТ».

5. Підтверджено, що при притиранні поверхонь пари тертя силікатним складом знімання металу в $1,4$ рази менше, ніж при обробці пастою «КТ».

6. Проведено експериментальні дослідження та отримано рівняння математичної моделі режиму притирання силікатним абразивним складом з якого видно, що найбільший вплив на шорсткість обробленої поверхні має час притирання.

7. Оптимізовано параметри режиму притирання силікатним абразивним складом методом математичного планування експериментів.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ОБРОБЛЕНИХ СИЛКАТНИМ АБРАЗИВНИМ СКЛАДОМ

4.1 Дослідження зносостійкості поверхонь тертя оброблених силікатним абразивним складом на оптимальному режимі притирання

Дослідження зносостійкості поверхонь тертя, оброблених пастами для притертя, має важливе значення для підвищення експлуатаційної надійності та довговічності вузлів машин і механізмів. Тертя між контактними поверхнями в умовах високих навантажень і температур є однією з основних причин їх зносу. Результати попередніх досліджень показують, що застосування силікатного абразивного складу при притиранні клапанів може дозволити не тільки покращити якість оброблених поверхонь, але й вплинути на їхню зносостійкість, яка визначає довговічність деталей.

Під зносостійкістю розуміють властивість матеріалу чинити опір зношуванню за визначених умов тертя, яка оцінюється величиною, оберненою швидкості зношування чи інтенсивності зношування [8, 14]. Зносостійкі матеріали вирізняються підвищеною зносостійкістю при роботі в певних умовах зовнішнього впливу. Зносостійкість матеріалу є характеристикою його здатності опору до зношування в заданих умовах, що оцінюється величиною, зворотною до швидкості (інтенсивності) зношування [8, 15].

Для проведення дослідження зносостійкості поверхонь тертя були підготовлені зразок і контрзразок. Підготовка зразків здійснювалася шляхом притертя вказаної пари силікатним абразивним складом і для порівняння пастою «КТ», як застосовується у даний час для притирання клапанів автомобільних двигунів. Режим притирання силікатним складом наступний: питомий тиск на зразок – $P = 0,3$ МПа; зворотно-обертальна швидкість зразка – $V_{з-о} = 0,3$ м/с; час притирання – $t = 240$ с. Режим притирання пастою «КТ» наступний: питомий тиск на зразок – $P = 0,3$ МПа; зворотно-обертальна швидкість зразка – $V_{з-о} = 0,3$ м/с; час притирання – $t = 360$ с.

Після проведення кожного притирання зразка і контрзразка силікатним складом пара тертя промивали водою і ацетоном, а потім висушували. Пара тертя, яка оброблялась пастою «КТ» промивали керосином і ацетоном, так як склад виготовлений на масляній основі.

Дослідження виконували на спеціальній установці, торцевого тертя (рис. 2.10). Зразки мали вигляд конуса зі сталі 40Х, HRC 48 (рис. 2.6, а). Контрзразки мали форму кільця із чавуна СЧ 18-36, HRC 32 (рис. 2.6, б).

Вагу зразків до проведення досліду і після визначали на мікроаналітичних терезах типу ВЛР-200 з точністю $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г (рис. 2.7, 2.8).

За результатами всіх вимірювань для кожного зразка визначали середнє значення параметрів, що вимірювали, і обчислювали масове знімання металу за формулою 2.1 [8]. Коефіцієнт тертя визначали за формулами 2.2 та 2.3.

За допомогою профілографа-профілометра була виміряна шорсткість поверхні (R_a) та записані профілограми поверхонь оброблених силікатним складом і пастою «КТ». Результати вимірювань наведено на рисунку 4.1.

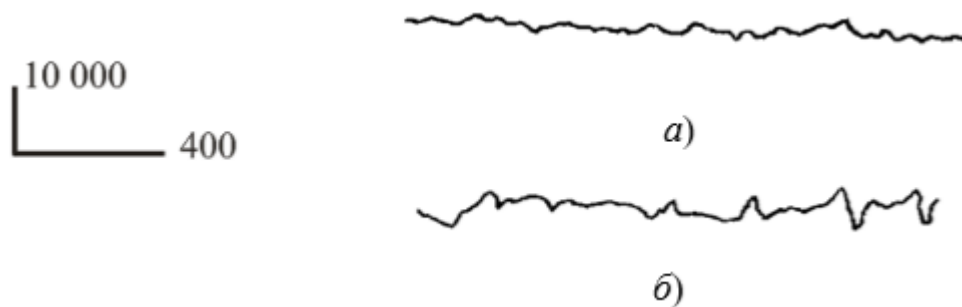


Рис. 4.1. Профілограми поверхонь притертих (x400):
 а) – силікатним абразивним складом ($R_a = 0,16$ мкм);
 б) – пастою «КТ» ($R_a = 0,34$ мкм)

Для вимірювання температури мастильного матеріалу використовували термометр. Тривалість випробувань складала три години.

Найкращу зносостійкість мала те спряження, у якої стабілізація коефіцієнта тертя була швидше, зразок та контрзразок мали найменшу шорсткість і інтенсивність зношування.

Результати досліджень наведено на рис. 4.1-4.3.

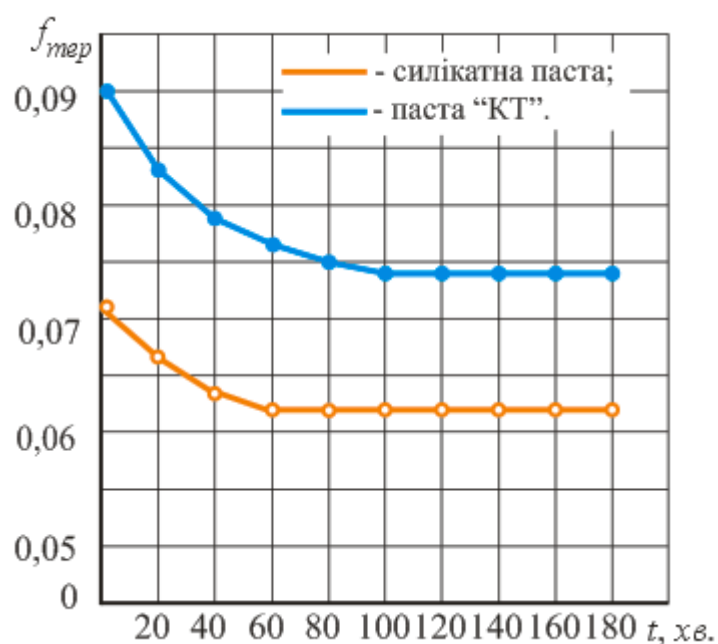


Рис. 4.1. Зміна коефіцієнта тертя ($f_{тер}$) при роботі в оливі «М-8В» пари тертя сталь 40X (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32), обробленої силікатним абразивним складом та пастою «КТ»

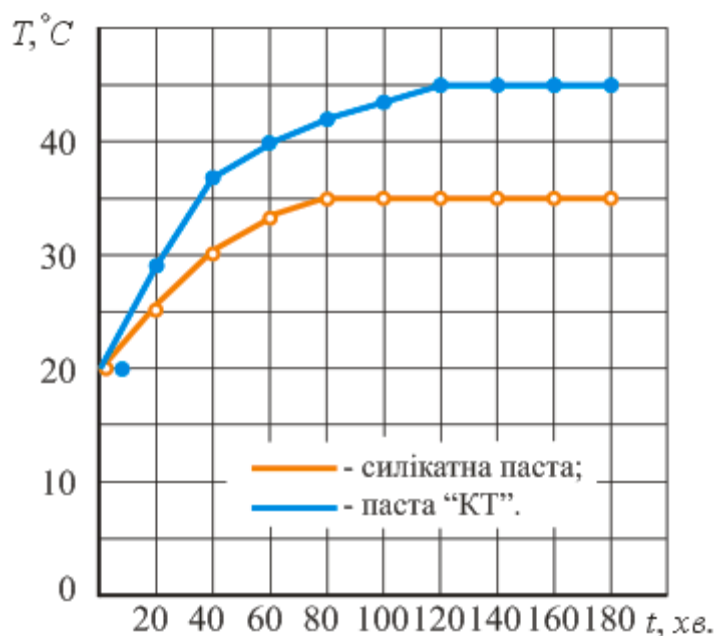


Рис. 4.2. Зміна температури (T , °C) при роботі в оливі «М-8В» пари тертя сталь 40X (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32), обробленої силікатним абразивним складом та пастою «КТ»

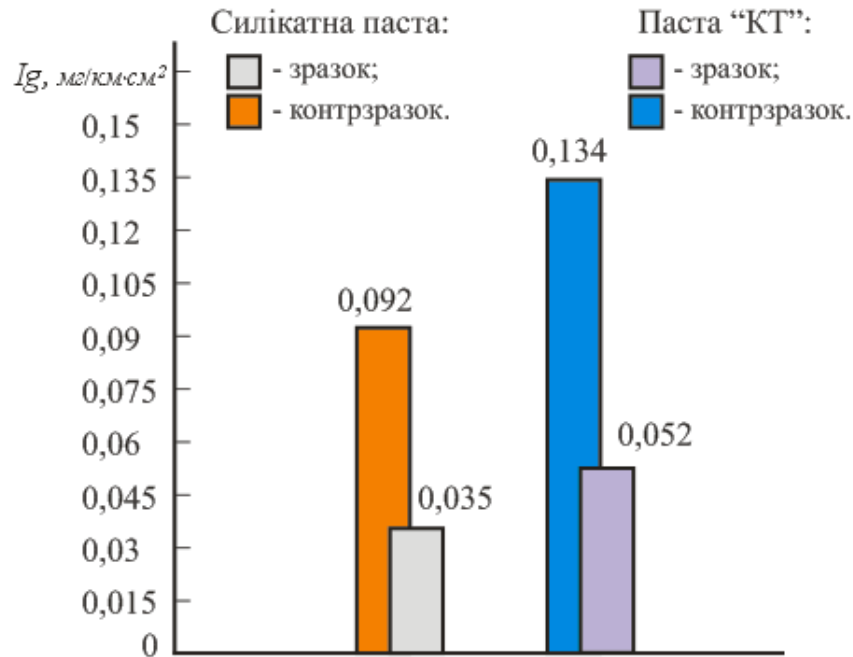


Рис. 4.3. Зміна інтенсивності зношування ($I_g, \frac{\text{мг}}{\text{км}\cdot\text{см}^2}$) при роботі в оливі «М-8В» пари тертя сталь 40Х (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32), обробленої силікатним абразивним складом та пастою «КТ»

Аналіз результатів досліджень показав, що стабілізація коефіцієнта тертя (рис 4.1) у пар тертя сталь 40Х (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32), які оброблені силікатним абразивним складом відбувається на 60-хвилині і складає $f_{\text{тер}} = 0,062$. Стабілізація температури відбувається на 80-хвилині і дорівнює $T = 35^\circ\text{C}$ (рис 4.2). У той час, у пари, яка притерта пастою «КТ» стабілізація коефіцієнта тертя (рис 4.1) відбувається на 100-хвилині ($f_{\text{тер}} = 0,074$), а температури (рис. 4.2) – на 120-хвилині ($t = 45^\circ\text{C}$). Таким чином, на підставі отриманих результатів встановлено, що застосування силікатного абразивного складу для притирання клапанів дозволить змінити структуру поверхневого шару після обробки та скоротити час припрацювання поверхней в 1,6 рази у порівнянні з поверхнями, які притерті пастою «КТ».

Аналіз рис. 4.3 показав, що інтенсивності зношування при роботі в оливі «М-8В» пари тертя сталь 40Х (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32), обробленої силікатним складом складає для зразків $I_g = 0,035 \frac{\text{мг}}{\text{км}\cdot\text{см}^2}$, контрзразків $I_g = 0,092 \frac{\text{мг}}{\text{км}\cdot\text{см}^2}$. Інтенсивності зношування при роботі в оливі «М-8В» пари, обробленої

пастою «КТ» складає для зразків $Ig=0,052 \frac{\text{мг}}{\text{км}\cdot\text{см}^2}$, контрзразків $Ig=0,134 \frac{\text{мг}}{\text{км}\cdot\text{см}^2}$.

За результатами проведених дослідів відзначаємо, що інтенсивність зношування поверхонь пари тертя, яка притерта силікатним складом в 1,5 рази менше ніж поверхонь оброблених пастою «КТ».

На нашу думку це відбувається за рахунок того, що після притирання силікатним складом формується поверхня близька до оптимальної і, як було вказано раніше, ця поверхня насичена оксидом кремнію. Така вихідна якість поверхні зумовлює низькі коефіцієнти тертя, температуру та інтенсивність зношування, що підтверджує результати, які отримані в попередніх роботах [2, 8].

Таким чином можна стверджувати, що найкращими властивостями чинити опір зношування мають поверхні пари тертя, які притерті силікатним абразивним складом і, в свою чергу, використання цього складу дозволить підвищити зносостійкість клапанного спряження автомобільного двигуна в 1,5 рази.

4.2 Визначення критичних навантажень поверхонь оброблених силікатними брусками

Критичні навантаження поверхні пари тертя визначають для оцінки її працездатності, міцності та зносостійкості під час експлуатації.

Критичне навантаження – це максимальне навантаження, яке може витримати поверхня деталі без виникнення руйнування, пластичної деформації або задиру (схоплювання).

Під схоплюванням металу в процесі тертя розуміють особливий вид руйнування або зношування, коли відбувається злипання і перенесення частинок одного металу на інший у зоні контакту. Під час тертя двох металевих поверхонь відбувається наступне:

- між мікронерівностями (мікровиступами) виникають дуже великі локальні тиски і температура;
- оксидна плівка, яка зазвичай захищає метал, руйнується;
- оголені чисті метали злипаються між собою – утворюються так звані

адгезійні містки;

- при подальшому русі ці з'єднання розриваються, і частина матеріалу переноситься з однієї поверхні на іншу;

- в результаті утворюються задири, пригар, глибокі риси – тобто поверхня руйнується.

У парі «клапан – сідло клапана» двигуна внутрішнього згорання схоплювання може статися, якщо поверхні погано притерті або неякісно загартовані контактні зони. Тоді при великому тиску клапан може «прихопити» – тобто на фасці з'являться пригар або задир.

Основні цілі визначення критичних навантажень:

1. Оцінка міцності поверхневого шару. Допомагає з'ясувати, чи витримає поверхня контактні сили під час тертя або удару.

2. Контроль якості обробки. Дає змогу оцінити адгезію (зчеплення) покриття.

3. Порівняння різних технологій обробки. Дає можливість визначити, яка технологія (наприклад, притирання силікатним абразивним складом чи пастою «КТ») забезпечує вищу зносостійкість.

4. Прогноз довговічності деталей. Критичне навантаження вказує на межу, після якої починаються мікротріщини, відшаровування або втомне руйнування.

5. Вибір оптимальних режимів роботи вузлів тертя.

Враховуючи вище наведено, перед нами стояло завдання – визначити при яких навантаженнях виникне схоплювання або заїдання поверхонь притертих абразивним силікатним складом та пастою «КТ».

Підготовка зразків та контрзразків до випробувань наведено вище (підрозділ 4.1). Після цього зразок та контрзразок встановлювали на машину тертя 2070 СМТ-1 і фіксували. Оливу «М-8В», як змащувальний матеріал, заливали у ванночку так, щоб нижня поверхня ролика (контрзразка) знаходилася повністю в мастильному матеріалі. Під час обертання ролика олива подається у зону контакту вкладиша (зразка) та ролика (контрзразка). У такий спосіб

здійснювалося змащування поверхонь тертя [15].

Навантаження зразків здійснюється за допомогою пружинного механізму. Випробування починали з питомого навантаження 1,0 МПа і вели до закінчення періоду опрацювання, про що свідчили стабілізація моменту тертя та температури. Навантаження поступово підвищували через 10 Н і стежили за стабілізацією моменту тертя та температури. Зміна режиму характеризувалося зростанням звуку, різким коливанням сили тертя та зростанням температури. За результатами випробування визначали коефіцієнт тертя, після чого будували трибограми залежності коефіцієнта тертя від навантаження [5, 15].

За критичне навантаження заїдання приймали мінімальне осьове навантаження, при якому відбувався перехід до стрибкоподібної зміни моменту тертя, швидкого підвищення температури мастильного матеріалу в об'ємі та різкої зміни звуку [5, 15].

Результати випробувань наведено на рис. 4.4-4.5.

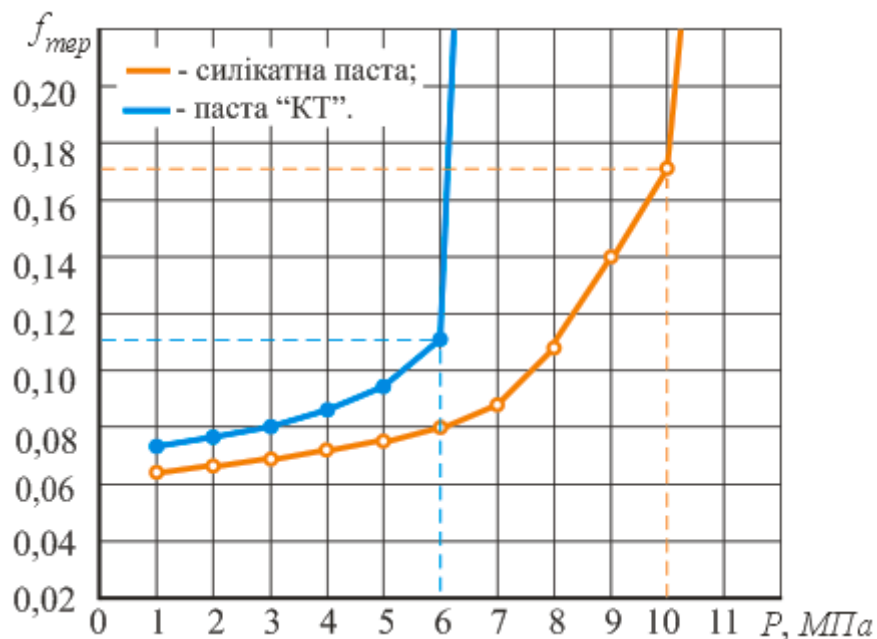


Рис. 4.4. Залежність коефіцієнта тертя ($f_{тер}$) від навантаження (P , МПа) під час роботи в оливі «М-8В» пари тертя сталь 40Х (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32) обробленої силікатним абразивним складом і пастою «КТ»

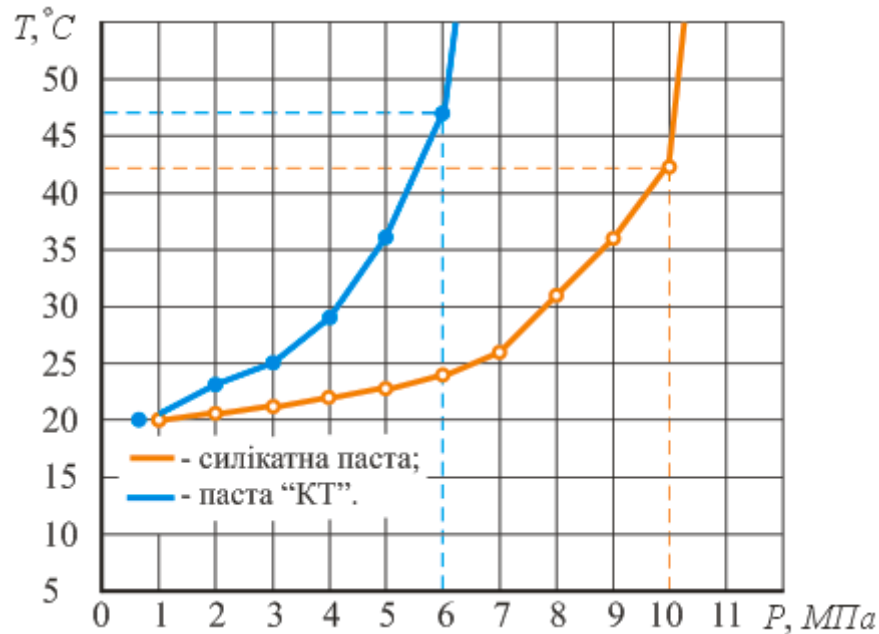


Рис. 4.5. Залежність температури ($T, ^\circ\text{C}$) від навантаження ($P, \text{МПа}$) під час роботи в оливі «М-8В» пари тертя сталь 40Х (HRC 48) – чавун СЧ 18-36 (HRC 32) обробленої силікатним абразивним складом і пастою «КТ»

Навантаження до заїдання (рис. 4.4), що витримує поверхня, яка оброблена силікатним складом, складає $P = 10 \text{ МПа}$ і на нашу думку, це відбувається через утворення на поверхні тертя кремнієвих сполук. В роботі [5] стверджено, що під дією абразиву оксид кремнію (SiO_2) потрапляє у западини оброблюваної поверхні та зчіпляється з поверхнею. Для підтвердження цієї гіпотези із зразків, оброблених силікатним абразивним складом, було проведено змив і хімічний аналіз підтвердив наявність на обробленій поверхні SiO_2 . Результати рентгеноспектрального аналізу поверхонь притертих силікатним складом підтвердили наявність сильного зв'язку кремнієвих сполук з поверхневим шаром металу.

При навантаженні пари тертя від $1,0 \text{ МПа}$ до $6,0 \text{ МПа}$ в зоні контакту працює плівка кремнієвих сполук, яка виконує роль демпфера. Тому в цьому випадку коефіцієнта тертя плавно збільшується від $f_{\text{тер}} = 0,061$ до $f_{\text{тер}} = 0,08$ (рис. 4.4). При збільшенні навантаженні поверхні до $P = 9 \text{ МПа}$ ця плівка починає

зношуватися, що призводить до різкого зростання коефіцієнта тертя від $f_{тер} = 0,08$ до $f_{тер} = 0,14$ (рис. 4.4). Після подальшого підвищення навантаження масляна плівка зникає і у роботу вступають кремнієві сполуки, які виконують роль демпфера, що дозволяє витримувати навантаження $P = 9$ МПа. При навантаженні $P = 10$ МПа кремнієві сполуки зношуються, різко підвищується коефіцієнт тертя до $f_{тер} = 0,172$ (рис. 4.4), температура оливи підвищується до $T = 42$ °С (рис. 4.5), з'являється металевий звук. Це свідчить про те, що виникає сухе тертя на поверхні у зоні контакту зразка та контрзразка і відбувається схоплення [15].

Навантаження до заїдання (рис. 4.4), що витримує поверхня, яка притерта пастою «КТ», складає $P = 6$ МПа. При навантаженні пари тертя від 1 МПа до 5 МПа працює масляна плівка в зоні контакту коефіцієнта тертя збільшується від $f_{тер} = 0,078$ до $f_{тер} = 0,098$ (рис. 4.4). При навантаженні $P = 6$ МПа масляна плівка зношуються, різко підвищується коефіцієнт тертя до $f_{тер} = 0,115$ (рис. 4.4), температура оливи підвищується до $T = 47$ °С (рис. 4.5), з'являється металевий звук, виникає схоплення.

На підставі цього можна стверджувати, що поверхні пари тертя, які притерті силікатним абразивним складом, витримують навантаження до заїдання в 1,6 рази більше, ніж поверхні, які оброблені пастою «КТ». Відзначаємо, що за рахунок формування високої якості поверхні при притиранні силікатним складом можна підвищити довговічність клапанного sprzęження автомобільного двигуна.

4.3 Висновки до четвертого розділу

1. Встановлено, що застосування силікатного абразивного складу для притирання клапанів дозволить змінити структуру поверхневого шару після обробки та скоротити час припрацювання поверхней в 1,6 рази у порівнянні з поверхнями, які притерті пастою «КТ».

2. Показано, що інтенсивність зношування поверхонь пари тертя, яка притерта силікатним складом в 1,5 рази менше ніж поверхонь оброблених

пастою «КТ».

3. Підтверджено, що найкращими властивостями чинити опір зношування мають поверхні пари тертя, які притерті силікатним абразивним складом і, в свою чергу, використання цього складу дозволить підвищити зносостійкість клапанного спряження автомобільного двигуна в 1,5 рази.

4. Встановлено, що поверхні пари тертя, які притерті силікатним абразивним складом, витримують навантаження до заїдання в 1,6 рази більше, ніж поверхні, які оброблені пастою «КТ» і це дозволить підвищити довговічність клапанного спряження автомобільного двигуна.

ВИСНОВКИ

1. Підтверджено, що висока якість поверхні після притирання силікатним абразивним складом відбувається за рахунок утворення оксиду кремнію (SiO_2). Під дією абразивних частинок SiO_2 потрапляє у западини оброблюваної поверхні та зчіпляється з поверхнею. При багаторазовому впливі частинок відбувається щільна «упаковка» SiO_2 глибоких западин нерівностей.

2. Встановлено, що шорсткість поверхні при притиранні як силікатним складом так і пастою «КТ» спочатку зменшується зі збільшенням питомого тиску, але після певного «оптимуму» ($P = 0,03$ МПа) починає зростати через глибокі риски та нестачу мастильного шару.

3. Встановлено, що шорсткість поверхні при притиранні абразивним складом спочатку зменшується із зростанням зворотно-обертальної швидкості зразка до оптимального значення, а при надмірному підвищенні швидкості знову зростає. При притиранні силікатним складом оптимальне значення зворотно-обертальної швидкості складає $0,3$ м/с, а пастою «КТ» – $0,4$ м/с.

4. Підтверджено, що продуктивність притирання силікатним абразивним складом в $1,5$ рази вище, ніж при обробці пастою «КТ».

5. Підтверджено, що при притиранні поверхонь пари тертя силікатним складом знімання металу в $1,4$ рази менше, ніж при обробці пастою «КТ».

6. Проведено експериментальні дослідження та отримано рівняння математичної моделі режиму притирання силікатним абразивним складом з якого видно, що найбільший вплив на шорсткість обробленої поверхні має час притирання.

7. Оптимізовано параметри режиму притирання силікатним абразивним складом методом математичного планування експериментів.

8. Встановлено, що застосування силікатного абразивного складу для притирання клапанів дозволить змінити структуру поверхневого шару після обробки та скоротити час припрацювання поверхней в $1,6$ рази у порівнянні з поверхнями, які притерті пастою «КТ».

9. Показано, що інтенсивність зношування поверхонь пари тертя, яка

притерта силікатним складом в 1,5 рази менше ніж поверхонь оброблених пастою «КТ».

10. Підтверджено, що найкращими властивостями чинити опір зношування мають поверхні пари тертя, які притерті силікатним абразивним складом і, в свою чергу, використання цього складу дозволить підвищити зносостійкість клапанного спряження автомобільного двигуна в 1,5 рази.

11. Встановлено, що поверхні пари тертя, які притерті силікатним абразивним складом, витримують навантаження до заїдання в 1,6 рази більше, ніж поверхні, які оброблені пастою «КТ» і це дозволить підвищити довговічність клапанного спряження автомобільного двигуна.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. І. В. Шепеленко, «Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування» дис. докт. техн. наук, Центральноукраїнський нац. техн. ун-т, Нац. техн. ун-т України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [dis_Shepelenko I.V.pdf](#)

2. О. В. Левадний, «Розробка силікатного абразивного складу для притирання з метою підвищення довговічності деталей автомобільних двигунів». Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра, Донб. нац. акад. буд. і арх., Івано-Франківськ, 2023.

3. О.В. Закалов Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 322 с.

4. В. А. Макаров, Т. В. Макарова, М. С. Виноградов, С. М. Мастепан, Д. В. Савенок, О. В. Левадний «Удосконалення механізму притирання вільним абразивом за допомогою використання силікатного складу», *Вісник машинобудування та транспорту*, №2(18), с. 94-100. 2023.

5. В. А. Макаров, Т. В. Макарова, М. С. Виноградов, М. А. Мастепан, Д. В. Савенок, О. В. Левадний «Експериментальне дослідження можливості використання силікатної пасти для підвищення довговічності деталей автомобільних двигунів», *Вісник машинобудування та транспорту*, №1(17), с. 92-98. 2023.

6. Притирання ущільнюючих поверхонь. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [Притирання ущільнюючих поверхонь \(ni.biz.ua\)](#)

7. Н. С. Виноградов, «Исследование возможности использования силикатной пасты для притирки сопряженных деталей», *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Науково-виробничий збірник*, № 1, с. 70-74. 2006.

8. М. І. Івасюк, «Підвищення зносостійкості поверхонь клапанного спряження при їх відновленні та використанні силікатної пасти». Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра, Донб. нац. акад. буд. і арх., Івано-

Франківськ, 2024.

9. Є. Нікітішин, «Оптимізація комплексу експериментів методом Бокса-Вілсона» / Євген Нікітішин, Олег Шевчук, Тарас Чайківський // Хімія та хімічні технології : матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених ССТ-2011, 24-26 листопада 2011 року, Україна, Львів / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – с. 100-101. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [content \(lpnu.ua\)](#)

10. Сутність методу Бокса-Уілсона. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [238. Сутність методу Бокса-Уілсона.](#)

11. Суть методу Бокса-Вілсона та його реалізація. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [\(1\) 3.5.2 Суть методу](#)

12. А.М. Плічко, К.С. Акбаш, М.В. Луньова Математична статистика: навчальний посібник. – Кропивницький: «КОД», 2024. – 220 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [Математична статистика: навчальний посібник](#)

13. В. М. Руденко Математична статистика. Навч. посіб. – К.: Центр учбової літератури, 2012. – 304 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [<4D6963726F736F667420576F7264202D20D2E8F2F3EB5FCCE0F2E5ECE0F2E8F7EDE05FF1F2E0F2E8F1F2E8EAE05FD0F3E4E5EDEAE>](#)

14. ДСТУ 2823-94 Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та змащення. Терміни та визначення \(62330\) \(dnaop.com\)](#)

15. Г. А. Баглюк *Зносостійкі матеріали* [Архівовано 6 серпня 2020 у Wayback Machine.] // Енциклопедія сучасної України / ред. кол.: І. М. Дзюба [та ін.]; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2001–2022. – ISBN 966-02-2074-X.