

620.1(075.8)

С 13

В. І. Савуляк

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ
СКЛАДУ, СТРУКТУРИ
ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. І. Савуляк

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ,
СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ**

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2021

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 28.10.2021 р.)

Рецензенти:

Л. Г. Козлов, доктор технічних наук, професор

В. А. Матвійчук, доктор технічних наук, професор

П. В. Каплун, доктор технічних наук, професор

Савуляк, В. І.

C13 **Методи та засоби дослідження складу, структури та властивостей матеріалів : навчальний посібник / Савуляк В. І. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 73 с.**

ISBN 978-966-641-882-4

Навчальний посібник підготовлено відповідно до програми навчальної дисципліни «Методи та засоби дослідження складу, структури та властивостей матеріалів», яку внесено до навчального плану підготовки доктора філософії зі спеціальності 132 «Матеріалознавство».

У посібнику розглянуто найбільш широко вживані у машинобудуванні та матеріалознавстві методи визначення хімічного складу матеріалів, ідентифікації складових їх структури та основних практично значущих властивостей.

Посібник розрахований для здобувачів та викладачів закладів вищої освіти, що виконують дослідження за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

УДК 669.017.11

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	6
1.1 Основні терміни та положення.....	6
1.2 Розроблення плану-програми експерименту.....	8
1.3 Статистичні методи оцінення вимірювань.....	9
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОЛОГІЇ, ПОХИБОК ТА ДЕФЕКТІВ НАПЛАВЛЕННЯ ПОКРИТТІВ.....	13
2.1 Матеріали для досліджень.....	14
2.2 Визначення величин та характеру спрацювання отворів деталей.....	16
2.3 Підготовлення зразків для експериментальних досліджень.....	17
2.4 Визначення якості нанесення покриття наплавленням.....	18
2.5 Вимірювання температури на поверхні матеріалу.....	25
2.6 Вимірювання залишкових деформацій.....	26
2.7 Методика експериментального визначення похибок отворів, що спричинені температурними деформаціями деталі та інструменту в процесі розточування наплавлених отворів.....	26
3 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ СКЛАДУ ТА ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ І НАНЕСЕНИХ ПОКРИТТІВ.....	27
3.1 Дослідження контактної взаємодії в системах «тверда поверхня – металевий розплав».....	27
3.2 Метод диференційно-термічного аналізу.....	29
3.3 Методи дослідження структури, фазового і хімічного складу композиційних порошків, керметів і газотермічних покриттів.....	30
3.4 Методики дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів і покриттів.....	31
4 ТРИБОТЕХНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ.....	32
4.1 Методика та визначення коефіцієнтів тертя спокою.....	32
4.2 Методика та визначення зносостійкості металокарбідних матеріалів і покриттів.....	38
4.3 Конструкція експериментальної установки.....	39
4.4 Результати досліджень на зносостійкість.....	41
4.5 Дослідження зносостійкості в процесі абразивного зношування композиційних покриттів з використанням багатофакторного експерименту.....	43

4.6	Методика дослідження триботехнічних властивостей газотермічних покриттів.....	49
4.7	Зносостійкість високовуглецевих шарів, нанесених методом електродугового наплавлення з використанням вуглецевих волокнистих матеріалів	51
4.8	Статистична залежність «зносостійкість – твердість» високовуглецевого покриття за вибіркою експериментальних даних ...	54
5	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ МЕТАЛОКАРБІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКЗОТЕРМІЧНИХ СУМІШЕЙ	59
5.1	Обґрунтування основних методів дослідження.....	59
5.2	Методика та результати визначення характеристик порошкових компонентів.....	60
5.3	Методика проведення термічного аналізу зразків порошкових сумішей	61
5.4	Результати досліджень результатів екзотермічних процесів... ..	63
6	СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ	66
6.1	Дослідження поверхні твердих матеріалів на електронному мікроскопі	66
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

Вступ

Основою світу, сучасного виробництва та побуту є матеріали. Призначення, як і властивості, матеріалів безпосередньо пов'язане зі сферами їх використання. Якщо це стосується виробництва машин та конструкцій, а також їх експлуатації, то у цьому випадку широкого вжитку знайшли терміни: службове призначення, технічні характеристики, технічне завдання, довговічність, надійність тощо. Ці терміни підкріплюються конкретними числовими показниками, які мають бути забезпечені під час всього життєвого циклу машини. На основі цих показників машина чи інший технічний виріб проектується, виготовляється, експлуатується та утилізується. Важливе значення мають показники екологічного впливу на середовище, економічність виготовлення, експлуатації та утилізації. Без такого системного підходу неможливо досягти успіху у сфері механічної інженерії.

У матеріалознавстві давно встановилось чітке бачення єдності тріади: *склад – структура – властивості* в баченні сутності матеріального світу. Дослідження існуючих матеріалів, визначення причин аварій, втрати технічних характеристик, зовнішнього вигляду та інших показників починають, як правило, з визначення складу матеріалу. Водночас враховують, що властивості матеріалу залежать не тільки від основних складових, але і від мікродобавок чи забруднень, які потрапили в матеріал під час його виробництва, обробки чи експлуатації.

Історичний досвід та дані сучасної науки вказують, що навіть для матеріалів з однаковим хімічним складом може існувати величезна кількість варіантів їх внутрішньої будови – структури. Зерна, субзерна, кристали, кристаліти, вид і розташування дислокацій, границі зерен, когезія, властивості поверхонь та багато інших питань, які суттєво впливають на властивості матеріалів та виробів з них.

Відповідно до питань, які вирішують спеціалісти в процесі виробництва матеріалів, виробів з них та їх застосування, науковці та виробничники створили велику кількість приладів і складної сучасної апаратури для дослідження та контролю за компонентами тріади *склад – структура – властивості*. Основою визначення характеристик цих компонентів є експеримент.

1 МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

1.1 Основні терміни та положення

Найбільш складною та проблематичною частиною наукових досліджень є фізичні та математичні експерименти. Вони є одним з основних способів отримання нових знань. **Експеримент** є науково поставленим дослідом або спостереженням процесів, явищ з можливістю керування ними, для певних умов, які можуть бути відтворені. У разі повторення дослідів в аналогічних умовах результати мають відтворюватися. На відміну від звичайного спостереження під час експерименту дослідник активно впливає на процес або явище.

Під час експерименту виявляються закономірності процесів чи явищ або перевіряються теоретичні постулати, гіпотези, а також враховуються впливи нових факторів, умов та зовнішніх чинників. З економічного погляду експеримент бажано провести в найкоротші терміни з найменшими витратами. Важливо якісні результати отримати в короткі терміни, поки зберігається актуальність теми.

Експерименти класифікують на природні і штучні. **Природні** експерименти частіше виконують в умовах діючого виробництва чи експлуатації машин або технологічних процесів і под. **Штучний** експеримент застосовується під час розв'язання фізико-технічних проблем прикладних наук (насамперед у технічних). Це дає можливість уникнути впливу другорядних факторів, які створюють різні шуми, що важко фільтруються. У цьому випадку створюється можливість поступового ускладнення або спрощення дослідження та виявлення всіх факторів впливу.

За результатами попереднього експерименту розробляється повна програма досліджень.

Розрізняють лабораторні та виробничі експериментальні дослідження.

Лабораторні дослідження виконують на спеціальних установках або стендах з використанням універсальних чи створених давачів, приладів, реєструвальних засобів тощо. Достовірність та точність таких досліджень дозволяють досягти найбільш якісних результатів. Важливу роль відіграє математичне планування експерименту та автоматична фіксація результатів в сукупності з використанням математичної статистики.

Для врахування виробничих факторів та умов виконують виробничі експериментальні дослідження.

Виробничі експериментальні дослідження вивчають процеси в реальних умовах впливу різних випадкових або не врахованих факторів виробництва. Їх виконують на виробництвах, що будуються, діючих заводах, доробах, будівлях і спорудах. Через значні обсяги досліджень потрібним є чітке планування та організація досліджень.

Доцільно організувати виробничий експеримент шляхом збирання матеріалів у випробувальних лабораторіях, організаціях державної статистичної служби. Ця інформація збирається та накопичується багато років за єдиною методикою та з використанням одних блоків запитань. Це дозволяє прослідкувати динаміку зміни певних явищ та процесів. Дані експериментів можна обробляти статистично та отримувати рівняння трендів.

Важливо розробляти методику очищення таких матеріалів від шумів та похибок, які викликані зміною умов вимірювань або зміною вимірювальних інструментів.

У низці випадків результат можна отримати застосуванням методу анкетування.

Виробничі експерименти можуть бути замінені дослідженнями на спеціальних стендах. Ці стенди часто організують через дооснащення промислового обладнання спеціальним вимірювально-реєструвальним комплексом, який дозволяє виконувати досліди без втручання у діючий технологічний процес, що підвищує достовірність результатів та ефективність використання обладнання, машин і приладів.

Залежно від проблеми, яка вирішується, обсяг досліджень може значно відрізнятися. Інколи для підтвердження передбачень достатньо лабораторного експерименту, в несприятливому випадку доводиться виконувати їх цілу серію: попередні (пошукові), лабораторні, стендові на виробничому обладнанні.

Часто на експеримент витрачається багато фінансів та матеріальних ресурсів, часу без позитивного результату. Причина цього захована у недостатньо кваліфіковано поставлених завданнях, коли питання завчасно не вивчено достатньо повно за літературними джерелами та патентами, не враховано досвід виробництва. Не добре, якщо результати тривалих досліджень експерименту неповністю підтверджують робочу гіпотезу наукового дослідження. Часто це теж є наслідком недбалої підготовки експерименту, невдалого обґрунтування мети і завдань. Першочергово перед початком експериментальних досліджень розробляють їх методологію.

Методологія експерименту містить загальні постулати, структуру, постановку та послідовність виконання досліджень. Основні складові методології експерименту такі: розроблення плану-програми експерименту; оцінювання похибок вимірювань та вибір комплексу інструментів і приладів для проведення експерименту; проведення експерименту; обробка і аналіз результатів, визначення адекватності. Така схема експериментальних досліджень є традиційною. Використання математичної теорії експерименту дозволяє значно підвищити точність за менших обсягів досліджень. Для цього випадку методологія містить такі етапи: розроблення плану-програми експерименту, оцінення і вибір засобів вимірювань для проведення експерименту, математичне планування з одночасним прове-

денням експериментального дослідження, обробкою і аналізом отриманих результатів.

1.2 Розроблення плану-програми експерименту

План-програма досліджень містить найменування теми, мету виконання, робочу гіпотезу, методику експерименту, перелік необхідних матеріалів, приладів, установок, список виконавців, календарний план робіт. Сюди входять також роботи з конструювання і виготовлення приладів, апаратів, пристосувань, їх сертифікація, а також програми дослідних робіт на заводах і т. д.

Найважливішою частиною плану-програми є **методика експерименту**. У методиці систематизують прийоми, способи та послідовність експериментального дослідження, що забезпечує ефективне виконання мети і завдань експерименту; вибір змінних факторів впливу; інструментів та обладнання для вимірювання та обробки результатів; організацію проведення та аналіз результатів експерименту.

Аналіз інформації, гіпотез і наявних фундаментальних законів та досліджень дозволяють обґрунтувати та сформулювати **мету і завдання** експерименту. Потрібно обмежувати кількість завдань для одного дослідження кількістю до 5.

Вибір змінних факторів впливу та їх ранжирування є надзвичайно складним та відповідальним. Інколи початкові передбачення доводиться змінювати після перших попередніх дослідів або навіть завершення їх серії. У кожному конкретному випадку підходи можуть бути різними. Використання для цієї мети методів математичного планування експерименту дозволяє не тільки підвищити їх точність, але і зменшити обсяг та час проведення робіт. Особливо ефективний цей підхід за наявності значної кількості факторів впливу на досліджуване явище або процес.

Обґрунтований вибір та ранжування факторів є дуже важливим для забезпечення ефективності експерименту. Іноді для цього виконують спеціальне окремо заплановане попереднє дослідження.

Для виявлення пріоритетності (важливості) факторів впливу їх вивчають за умов фіксації всіх змінних крім однієї. Такий підхід, як зазначалося вище, доцільно використовувати для досліджень з малою кількістю аргументів.

Вибір комплексу вимірювальних інструментів та приладів є завжди багатоваріативним. Потрібно цей вибір виконувати в напрямку від універсальних до спеціальних, від простих до складних, від менш точних до надточних. Каталоги цього обладнання щорічно оновлюються. Краще коли цією справою займаються професіонали – метрологи. Адаже для визнання результатів додатково ще потрібна сертифікація і приладів, і комплексу взагалі. Під час розробки нових засобів вимірювання доцільно ви-

користувати готові апробовані блоки та вузли Це не тільки здешевить їх, але й значно прискорить виготовлення. Ефективно також реконструювати або модернізувати наявні стенди, прилади та інше устаткування.

Під час досліджень надзвичайно важко забезпечити стабільність умов проведення дослідів. Тому повторні досліді дають, як правило, результати, які відрізняються від попередніх. Тобто мають місце похибки. Відхилення мають різну природу: неомогенність матеріалів, випадкові фактори впливу, недосконалість приладів і клас їх точності, особливості експериментатора та ін. Чим більше випадкових факторів впливу на дослід, тим більше відхилення конкретного вимірювання від середньоарифметичного значення. Потрібна певна мінімальна кількість, яка забезпечить стабільне середнє значення вимірюваних параметрів, що задовольняє мету та завдання досліджень.

У методиці досліджень якомога детальніше розробляють технологію виконання дослідів. Для початку продумують маршрутну технологію досліджень, а потім детально проробляють окремі операції цього маршруту. Водночас враховують межі навантажень, прилади, засоби та обладнання. Важливе значення мають форми реєстрації результатів та умов проведення експериментів, що дуже важливо для їх аналізу та формулювання висновків.

Вибір методів обробки та аналіз результатів є предметом особливої уваги. Вони мають бути наочними та зрозумілими для тієї аудиторії, на яку вони розраховані. Дані мають бути відображені в таблицях, графіках, формулах, діаграмах, що доступні для швидкого розуміння та аналізу.

Дуже важливо наукові результати показувати з використанням засобів математики, статистики; з використанням відповідних широко вживаних термінів та означень.

Дуже бажаним є використання методів математичного планування експерименту.

1.3 Статистичні методи оцінення вимірювань

Вимірювання є основною складовою частиною будь-якого експерименту. Від ретельності вимірювань і подальших обчислень залежать результати експерименту. Тому кожен експериментатор має знати закономірності вимірювальних процесів: уміти правильно виміряти величини, що вивчаються; оцінити похибки під час вимірювань; правильно, з необхідною точністю, обчислити значення величин та мінімальну кількість вимірювань; визначити найкращі умови вимірювань, за яких помилки будуть найменшими, і виробити загальний аналіз результатів вимірювань.

Під час вимірювань використовують спеціальні технічні засоби, які називають вимірювальними інструментами та приладами. В основу

вимірювань покладено процес порівняння вимірної величини з відомою величиною, яку називають еталоном.

Якщо величина, яку вимірюють, не змінюється, то її називають постійною, а процес називають статичним. Вимірювання змінних величин називають динамічним. Вимірювання можуть здійснюватись безпосередньо та опосередковано (прямі і непрямі).

Визначено три класи вимірювань.

Особливо точні, високоточні, технічні вимірювання. У машинобудування переважно використовують технічні та рідше високоточні вимірювання. Використовують також абсолютні вимірювання і відносні.

Похибкою вимірювання називають алгебраїчну різницю між дійсним значенням вимірюваної величини a_0 і отриманим вимірюванням a_n . Величина a_0 – це таке значення вимірюваної величини, яке явно точніше, ніж одержуване під час вимірювання. З деяким допущенням a_0 можна вважати істинним або точним значенням величини

$$\varepsilon = a_0 - a_n.$$

Значення ε називають абсолютною похибкою вимірювання. Відносна похибка вимірювання, %:

$$\Delta = (a_0 - a_n) / a_0 \cdot 100\%. \quad (1.1)$$

Точність вимірювання – це ступінь наближення вимірювання до дійсного значення величини.

Достовірність вимірювання показує ступінь довіри до результатів вимірювання, тобто вірогідність відхилень вимірювання від дійсних значень.

Щоб підвищити точність і достовірність вимірювань, необхідно зменшити похибку. Похибки в процесі вимірювань виникають внаслідок ряду причин:

- недосконаlostі методів і засобів вимірювань;
- недостатньо ретельного проведення досліду;
- вплив різних зовнішніх факторів у процесі досліду;
- суб'єктивних особливостей експериментатора та ін.

Ці причини є результатом дії багатьох факторів.

Похибки класифікують на систематичні і випадкові.

Систематичні – це такі похибки вимірювань, які у разі повторних експериментів залишаються постійними (або змінюються за відомим законом). Якщо чисельні значення цих похибок відомі, їх можна врахувати під час повторних вимірювань.

Випадковими називають похибки, що виникають випадково під час повторного вимірювання. Ці вимірювання не можуть бути виключені як систематичні. Проте за наявності багатократних повторів за допомогою статистичних методів можна виключити випадкові вимірювання, що значно відхиляються від більшості.

Різновидом випадкових похибок є грубі похибки або промахи, що істотно перевищують систематичні або випадкові похибки. Промахи і грубі похибки спричинені, як правило, помилками експериментатора. Їх легко знайти. У розрахунок ці похибки не беруться і під час обчислень x_q ними нехтують. Отже, можна записати

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \quad (1.2)$$

де ε_1 , ε_2 – систематичні і випадкові похибки вимірювань.

Під час експерименту важко розділити систематичні похибки і випадкові. Але у випадку ретельного і багаторазового експерименту все ж таки можна виключити систематичні похибки (помилки). Основна задача вимірювань полягає у тому, щоб одержати, за змоги, результати вимірювань з меншими похибками. Нижче розглянуто основні принципи і методи усунення систематичних і випадкових помилок.

Систематичні похибки можна поділити на п'ять груп. **Перша** – інструментальні похибки, що виникають внаслідок порушень засобів вимірювань, додаткових люфтів або тертя, неточності градуйованої шкали, зносу і старіння вузлів та деталей засобів вимірювання і под.

Друга – похибки, які виникають через неправильне установлення засобів вимірювань.

Третя – похибки, що виникають в результаті дії зовнішнього середовища: високих температур повітря, магнітних і електричних полів, атмосферного тиску і вологості повітря, вібрації і коливань від рухомих частин та ін.

Четверта – суб'єктивні похибки, виникають внаслідок індивідуальних фізіологічних, психофізіологічних, антропологічних властивостей людини.

П'ята – похибки методу. Вони з'являються в результаті необґрунтованого методу вимірювань (за різних спрощень схем або функціональних залежностей, відсутності теоретичних обґрунтувань методу вимірювання, малої кількості повторюваностей та ін.).

Систематичні похибки можуть бути постійними або змінними, збільшуються або зменшуються у процесі експерименту. Їх обов'язково потрібно виключати. Відомі випадки, коли через наявність систематичних похибок робилися неправильні наукові висновки з експерименту. Систематичні помилки (похибки) можуть бути усунені такими методами.

Часто від систематичних похибок всіх груп можна позбавитися до початку експерименту шляхом регулювання або ремонту засобів вимірювання, ретельної перевірки установлення засобів вимірювань, усунення небажаних дій зовнішнього середовища. Особлива увага має бути надана обґрунтуванню теорії і методики вимірювань. Одним з ефективних методів усунення систематичних помилок 1–3 груп є виключення їх у процесі експерименту. Основним принципом цього виключення є повторне вимірювання величин.

Застосовують також метод заміщення.

Під час вимірювання x замість досліджуваного об'єкта встановлюють еталон, наперед заміряний з високою точністю. Різниця у вимірюваннях дозволить знайти похибку вимірювального засобу.

Якщо все ж таки не можна встановити значення систематичних похибок, то обмежуються оцінками їх меж.

Випадкові похибки. За умови проведення з однаковою ретельністю тих або інших експериментів результати вимірювань однієї і тієї самої величини (навіть з урахуванням відомого закону систематичних похибок), як правило, відрізняються між собою. Як наголошувалося вище, це свідчить про наявність випадкових похибок. Кожен експериментатор, аналізуючи результати вимірювань, має уміти правильно оцінити випадкові похибки, що неминуче виникають. До випадкових помилок відносять також, як вже відомо, промахи і грубі похибки.

Найтипівішими причинами промахів є помилки під час спостережень: неправильний відлік за шкалою вимірювальних приладів, описки (помилки) в процесі запису результатів вимірювань, різні маніпуляції з приладами або їх окремими вузлами (перестановка, заміна блоків, перевірка та ін.). Грубі похибки виникають внаслідок несправності приладів, а також умов експерименту, що раптово змінилися.

Аналіз випадкових похибок ґрунтується на **теорії випадкових помилок**. Ця теорія дає можливість з певною гарантією обчислити дійсне значення і оцінити можливі помилки, за якими роблять висновок про дійсне значення шуканої величини.

В основу теорії випадкових помилок покладено припущення про те, що у разі великої кількості вимірювань випадкові похибки однакової величини, але різного знака трапляються однаково часто; великі похибки трапляються рідше, ніж малі, або вірогідність появи похибки зменшується із зростанням її величини; за нескінченно великої кількості вимірювань істинне значення вимірюваної величини дорівнює середньоарифметичному значенню всіх результатів вимірювань: поява того або іншого результату вимірювання як випадкової події описується нормальним законом розподілу.

Теорія випадкових помилок дозволяє розв'язати дві основні задачі: оцінити точність і надійність вимірювання за певної кількості вимірів; визначити мінімальну кількість вимірів, що гарантує необхідну (задану) точність і надійність вимірювання. Разом з цим виникає необхідність виключити грубі помилки ряду, визначити достовірність одержаних даних та ін. Ці задачі розв'язують із залученням метрологів.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОЛОГІЙ, ПОХИБОК ТА ДЕФЕКТІВ НАПЛАВЛЕННЯ ПОКРИТТІВ

Підвищення довговічності неможливе без забезпечення якості, тобто експлуатаційних характеристик, деталей під час виготовлення заготовок, їх механічної обробки та на операціях зміцнення. У випадку виготовлення із використанням для заготовок зношених деталей з нарощуванням втрачених розмірів шляхом нанесення покриттів, технологічний процес має у своєму складі такі операції: миття, контроль стану (дефектування), підготовка деталі до нанесення покриття (механічна та термообробка), нанесення покриття, термічні обробки для знімання внутрішніх напружень та зміцнення, фінішні механічні операції. Вибір методів та складу нанесених покриттів і їх зміцнення визначаються умовами експлуатації, а також співвідношенням властивостей спряжених деталей.

В цьому розділі детально не розглядаються відомі технологічні прийоми контролю стану деталей, що вийшли з ладу, а також миття, попередній обробці деталей. Вони лише знайшли своє відображення в типовому технологічному процесі виготовлення (відновлення).

Особливу увагу приділено питанням пошуку раціональних технологічних схем проведення процесу нанесення функціональних покриттів методом наплавлення в середовищі захисних газів. Застосування наплавлення в середовищі захисних газів для компенсації зношеного шару та створення припуску під механічну обробку поверхонь деталей машин, обладнання, що в цих процесах використовується, досить детально описано в літературі [10-11]. Проте, в переважній більшості, традиційно режими ведення процесу визначались за типовими рекомендаціями. У випадках, коли наплавляються поверхні отворів або поверхні зі складною геометрією, використання типових режимів є недоцільним внаслідок впливу ряду несприятливих факторів на точність та якість поверхонь. Тому режими та схему ведення процесу наплавлення пропонується узгоджувати із результатами моделювання та експериментальних досліджень для конкретних деталей.

2.1 Матеріали для досліджень

2.1.1 Матеріали деталей, на які наносяться покриття, та їх характеристики. Розглянемо широко застосовувані у машинобудуванні сталі якісні і низьколеговані: 40X, 45, 45X, 50, 50Г2. Вибір вказаних матеріалів зумовлений тим, що ці матеріали використовуються для виготовлення осей, валів, штоків, тяг, цапф, колінчастих валів та інших деталей, до яких висуваються вимоги підвищеної міцності. Довговічність цих деталей лімітується довговічністю робочих поверхонь базових поверхонь. Хімічний склад і механічні властивості вказаних сталей наведено у таблицях 2.1 та 2.2.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад досліджуваних матеріалів

Марка сталі	Хімічний склад, %							
	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	P	S
40X	0,36-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	0,3	0,3	0,8-1,1	0,035	0,035
45	0,42-0,5	0,17-0,37	0,5-0,8	0,3	0,3	0,25	0,035	0,04
45X	0,41-0,49	0,17-0,37	0,5-0,8	0,3	0,3	0,8-1,1	0,035	0,035
50	0,47-0,55	0,17-0,37	0,5-0,8	0,3	0,3	0,25	0,035	0,04
50Г2	0,46-0,55	0,17-0,37	1,4-1,8	0,3	0,3	0,3	0,035	0,035

Таблиця 2.2 – Фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів

Марка сталі	Модуль пружності, 10^3 , МПа	Межа міцності при розтягу, МПа	Межа текучості, МПа	НВ	Теплопровідність, Вт/м \times °C	Питома теплоємність, Дж/кг \times °C
40X	214	980	785	217-552	43-46	
45	200	610-800	360-650	220-229	47-48	469-481
45X	206	850-1710	650-1490	229-500		
50	216	640-830	380-600	170-240	48-48	561-787
50Г2	204	750-1320	430-1200	229		

2.1.2 Матеріали та характеристики електродних дротів для наплавлення, що використовувались (Св-08, Св-08Г2С, Нп-30ХГСА). Зварювальний низьковуглецевий дріт марок Св-08, Св-08Г2С виготовляється згідно з ГОСТ 2246-70. Наплавлювальний холоднокатаний дріт марки Нп-30ХГСА виготовляється згідно з ГОСТ 10543-82.

Хімічний склад дротів, що використовувались для наплавлення, наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад зварювальних та наплавлювальних дротів

Марка дроту	Хімічний склад, %							
	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	P	S
Св-08	0,1	0,03	0,35-0,6	0,2	0,25	0,12	0,03	0,03
Св-08Г2С	0,05-0,11	0,7-0,95	1,8-2,1	0,2	0,25	0,2	0,015	0,01
Нп-30ХГСА	0,25-0,35	0,8-1,2	0,8-1,2	0,4	0,4	0,8-1,2	0,015	0,01

2.1.3 Склад наплавлених покриттів. В процесі наплавлення вищевказаними дротами в середовищі вуглекислого газу без додаткового легування вуглецем та іншими елементами наплавлений метал буде мати певний хімічний склад (табл. 2.4, 2.5) та механічні властивості (табл. 2.6) [22].

Таблиця 2.4 – Хімічний склад наплавленого металу, %, за використання дроту марки Св-08Г2СА за ГОСТ 2246-70

Вуглець, не більше 0,30	Кремній	Марганец	Хром	Фосфор	Сірка
1,0 – 1,50	1,0 – 1,50	2,50 – 3,20	не більше		
			0,030	0,030	

Таблиця 2.5 – Хімічний склад наплавленого металу, % за використання дроту марки Нп-30ХГСА за ГОСТ 10543-82

Вуглець, не більше 0,55	Кремній	Марганец	Хром	Фосфор	Сірка
2,60 – 3,20	1,50 – 2,30	4,30– 4,90	не більше		
			0,030	0,030	

Таблиця 2.6 – Механічні властивості наплавленого металу

Марка дроту	Температура досліджень, °С	Твердість наплавленого металу, НРС
Св-08Г2СА	20	42 – 46
Нп-30ХГСА	20	53 – 58

2.1.4 Вуглецеві тканини та нитки, що використовувались для науглецювання

Структурування наплавленого шару забезпечувалось шляхом комбінування наплавлювальних дротів Св-08, Св-08Г2СА, Нп-30ХГСА та вуглецевої тканини марки УУТ-2 ТУ6-06 И 78-85, із щільностями 150, 200, 250г/м² та різними варіантами переплетення волокон (рис. 2.1).

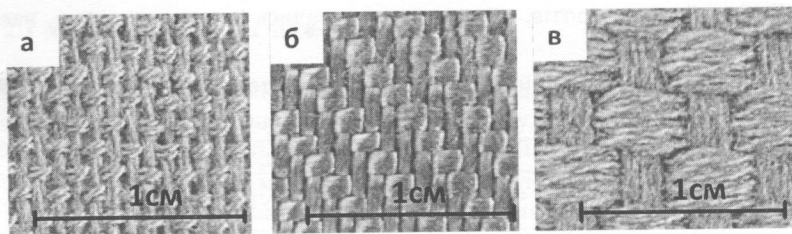


Рисунок 2.1 – Вуглецеві тканини марки УУТ-2: щільність 150 г/м² (а), 200 г/м² (б), 250г/м² (в)

2.2 Визначення величин та характеру спрацювання отворів деталей

Дослідження характеру та величини спрацювань проводили на кулаках поворотних тролейбусів, які надходили в капітальний ремонт. Вимірюванню підлягали очищені, ретельно промиті та просушені поверхні отворів кулаків поворотних. Додаткова увага була приділена визначенню стану заводських технологічних баз і можливості їх використання під час технологічного процесу виготовлення (відновлення) деталей.

Для вимірювання величини зносу отворів кулаків використовували перевірені службою метрології індикаторні нутроміри нормальної точності (ГОСТ 868-82). Перед вимірюванням індикаторний нутромір налагоджували на вимірювальний розмір за допомогою мікрометра (ГОСТ 6507-88). Кожний отвір вимірювали у шести осьових перерізах з кроком 30° та у п'яти діаметральних перерізах (рис. 2.2). Дані замірів заносили в карти вимірювань.

Кількість площин для вимірювань обумовлена характером спрацювання отворів кулаків поворотних. В процесі їх експлуатації під дією навантажень формується значна овальність та сідлоподібність профілю отворів.

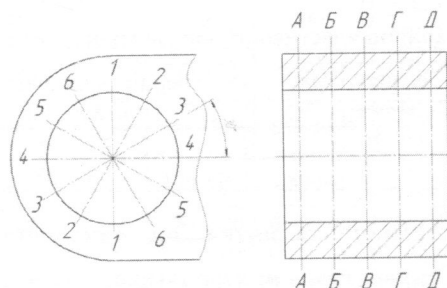


Рисунок 2.2 – Схема вимірювання досліджуваних отворів кулаків поворотних: 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6 – площини вимірювання в осьових перерізах; А-А, Б-Б, В-В, Г-Г, Д-Д, Е-Е – площини вимірювання в діаметральних перерізах

2.3 Підготовки зразків для експериментальних досліджень

Технологія нанесення функціональних покриттів на поверхні отворів деталей шасі транспортної техніки полягала у попередній підготовці поверхні отвору; нанесенні шару покриття із заздалегідь визначеними характеристиками шляхом електродугового наплавлення в середовищі вуглекислого газу; механічній обробці нанесеного покриття для досягнення необхідної геометрії поверхні.

Для проведення експериментальних досліджень з метою визначення впливу режимів та параметрів операцій технологічного процесу виготовлення деталей з отворами на їх точність та якість поверхневого шару було використано зразки двох типів: деталі, що надійшли на капітальний ремонт та мають неусувні дефекти; спеціально виготовлені циліндричні заготовки, що імітують характерні елементи деталей машин із отворами.

2.3.1 Використання як зразків «бракованих» деталей. З метою дослідження структури основного металу, перехідної зони та нанесеного шару в процесі наплавлення було використано кулаки поворотні, які надійшли на ремонт, але були вибракувані за результатами дефектоскопії, тобто які мають тріщини, сколи. Це дало змогу максимально врахувати процес тепловідведення від зони наплавлення та взаємодію основного металу деталі з наплавленим, що значною мірою визначає структуру, а отже і фізико-механічні характеристики нанесеного покриття.

Після проведення процесу наплавлення та подальшої механічної обробки, з метою досліджень експлуатаційних властивостей нанесеного покриття, було вирізано темплети. Вирізання крупних частин наплавлених заготовок проводилось механічним способом тонкими відрізними абразивними кругами із значним охолодженням, а зразків для виготовлення мікрошліфів – за допомогою електроерозійного верстата.

2.3.2 Виготовлення елементів деталей з отворами. Для проведення досліджень зі встановлення впливу кількості легувальних елементів, зокрема вуглецю, на якість нанесеного покриття було виготовлено зразки у формі циліндрів (рис. 2.3) із матеріалу сталь 45. Вибір матеріалу ґрунтувався на попередньому аналізі деталей машин із отворами, який показав, що ця сталь є найбільш широко використовуваною.

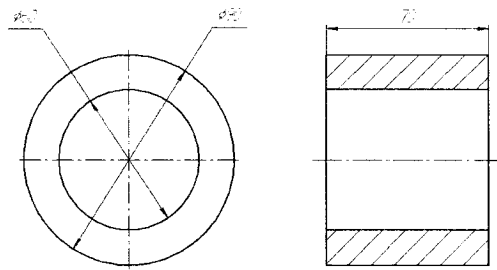


Рисунок 2.3 – Зразки для досліджень операції наплавлення

З метою перевірки на адекватність моделей процесів теплових деформацій інструменту та деталі під час розточування отворів було виготовлено зразки, які показано на рис. 2.4. Вони імітують тонкостінні (а) та товстостінні (б) елементи деталей з отворами.

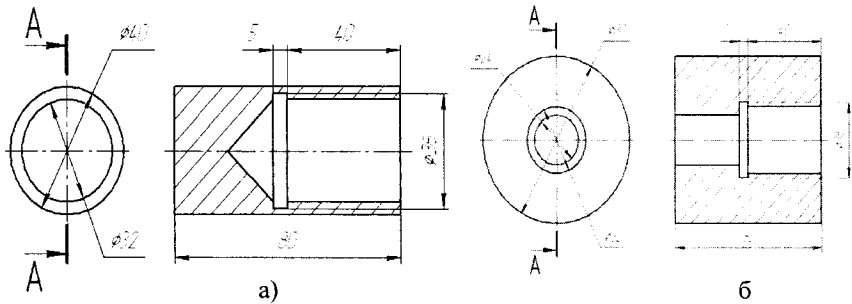


Рисунок 2.4 – Зразки для дослідження теплових процесів під час розточування отворів

2.4 Визначення якості нанесення покриття наплавленням

2.4.1 Ультразвукова дефектоскопія (виявлення пористості та інших дефектів). Ультразвуковий контроль, як один із методів неруйнівного контролю наплавленого металу, здійснювався за ГОСТ 14782-86 та рекомендаціями, що описані в роботах [29-30].

Основний спосіб контролю – ехометод з використанням суміщеного нахиленого перетворювача поперечних хвиль. Водночас використовувався ультразвуковий дефектоскоп УД-10УА. Відповідно до рекомендацій було вибрано такі параметри проведення ультразвукової дефектоскопії: частота хвиль – 4 МГц; розмір п'єзопластини – 5 мм; кут введення – 60°; рівень фіксації – 1 мм².

2.4.2 Вимірювання твердості нанесеного покриття. Вимірювання твердості, як одного із показників якості нанесеного покриття, проводилось за методом Роквелла [88]. Під час вимірювань залежно від умов використовувались: твердомір динамічний малогабаритний ТДМ-1 (рис. 2.5, а); твердомір ТК-2М (рис. 2.5, б).



а



б

Рисунок 2.5 – Використані твердоміри

2.4.3 Визначення структури нанесеного покриття. Дослідження мікроструктури нанесеного покриття та перехідної зони проводять на мікрошліфах. В процесі виготовлення зразків намагалися уникнути процесів нагрівання та наклепування. Для виготовлення мікрошліфів використовували електро-ерозійні верстати. Приготування мікрошліфа здійснювали за ГОСТ 11545-65. Зразок, розміщений в металевій оправці, заливали епоксидною смолою або сплавом Вуда. Процес підготовки мікрошліфа складався з декількох етапів: підготовка плоскої поверхні; шліфування; полірування. Мікрошліфи для проявлення мікроструктури підлягали хімічному травленню в 4 % розчині азотної кислоти в етиловому спирті протягом 5-30 с, залежно від структури нанесеного покриття. Потім промивали водою, протирали поверхню спиртом й просушували. Зразки підготовлених мікрошліфів показано на рис. 2.6.

Мікроструктурний аналіз проводиться паралельно з використанням оптичної та електронної мікроскопії. Це дає змогу більш детально та повно проаналізувати мікроструктуру покриття.

Оптична мікроскопія проводиться на мікроскопі МИМ-8М (рис. 2.7) з подальшою фіксацією зображень за допомогою цифрової фотокамери Kodak C813.

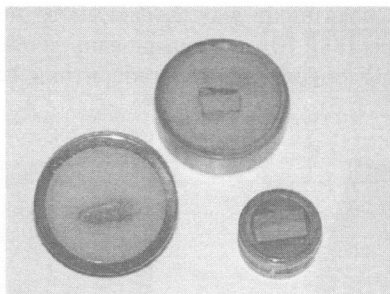


Рисунок 2.6 – Зразки мікрошліфів

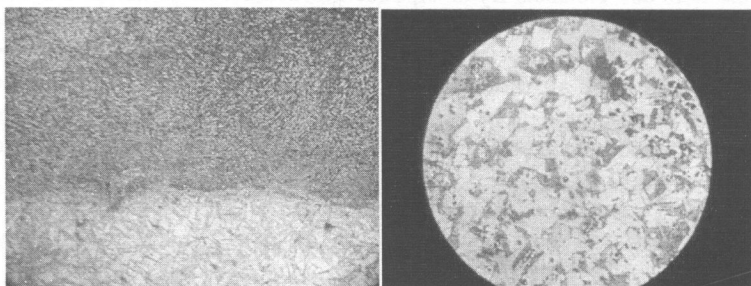
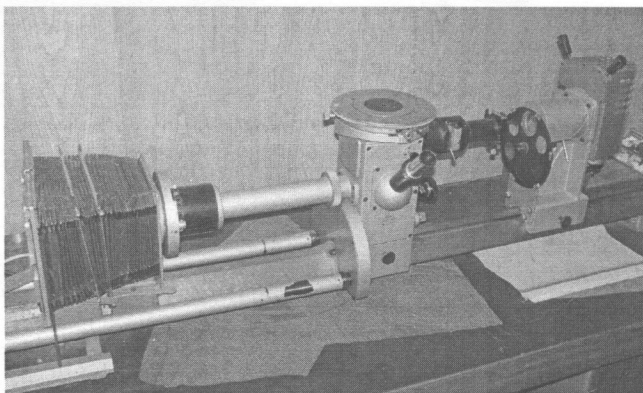


Рисунок 2.7 – Мікроскоп МІМ-8М та приклади мікроструктур

Електронна мікроскопія проводиться на мікроскопі РЕМ-106И (рис. 2.8).

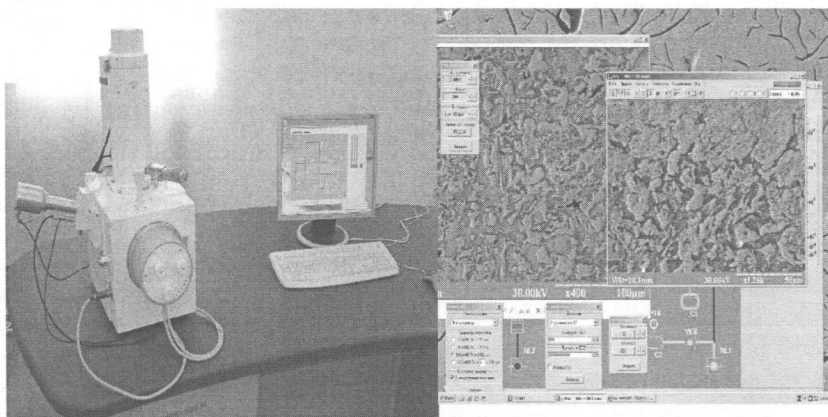


Рисунок 2.8 – Електронний мікроскоп РЕМ-106І

Мікроскоп призначений для вимірювання лінійних розмірів елементів топології та параметрів мікрорельєфу поверхні різноманітних об'єктів в твердій фазі та вимірювання масової частини елементів у складі об'єктів методом рентгенівського мікроаналізу, для дослідження поверхні непровідних об'єктів без спеціальної підготовки в режимі низького вакууму.

Технічні характеристики

Роздільна здатність мікроскопу у вторинних електронах в режимі високого вакууму не більше 4 нм.

Діапазон зміни збільшення від 15...300000 крат.

Діапазон регулювання прискорювальної напруги від 0.5...30 кВ.

Граничний залишковий тиск в колоні мікроскопу (в області гармати) не більше $6,7 \cdot 10^{-4}$ Па.

Час зміни об'єкта не більше 10 хв.

Універсальний механізм переміщення зразків забезпечує:

- установлення зразка з максимальним діаметром 50 мм,
- переміщення по координатах X, Y на ± 25 мм з кроком 0,5 мкм,
- точність позиціонування по координатах X, Y 1 мкм,
- переміщення по координаті Z на 60 мм,
- обертання зразка на 360°,
- нахил платформи від 0 до -20° та від 0 до 60°,

Діапазон вимірювання лінійних розмірів від 0,2 мкм до 5000 мкм.

Похибка вимірювання 4%.

Формування зображення здійснювалось за допомогою вторинних електронів із прискорювальною напругою 18-20 кВ. Фотографії мікроструктур покриттів, після відповідної комп'ютерної обробки результатів сканування

електронним зондом, зберігаються у вигляді цифрових зображень безпосередньо у пам'яті ПК.

2.4.4 Дослідження складу та будови тонких плівок на твердих поверхнях. Раманівська спектроскопія є ефективним, експресним, неруйнівним та багатоінформативним методом діагностики матеріалів, оксидних плівок та інших вторинних структур, які виникають під час тертя. Це стосується і вуглецевих матеріалів, таких як графіт, фулерени, вуглецеві нанотрубки, карбін, алмаз, графен та ін. Для кожного з вищеназваних матеріалів в раманівських спектрах проявляються характерні смуги, причому їхня форма, частота та інтенсивність дозволяють їх кількісно характеризувати.

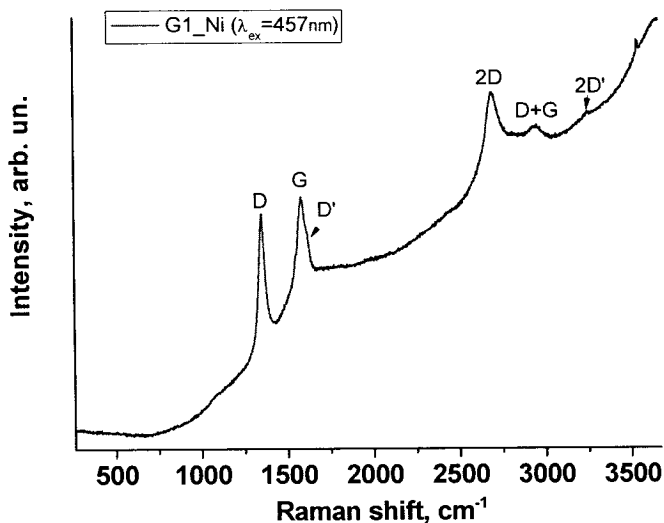


Рисунок 2.9 – Приклад раманівського спектра тонких вуглецевих плівок

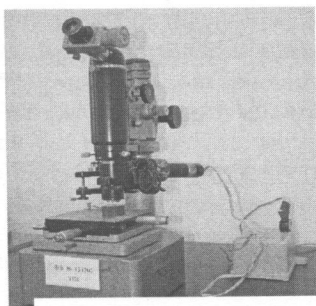
Під час вирощування вуглецевих наноструктур використання для їх діагностування раманівської спектроскопії дозволяє контролювати формування тієї чи іншої модифікації чи їх суміші та визначати вплив технологічних параметрів на їхні властивості. В процесі синтезу вуглецевих структур раманівська діагностика важлива для оцінення їх якості та визначення типу наявних дефектів.

Важливе значення та можливість дає використання раманівської спектроскопії на різних етапах відпрацювання технології під час

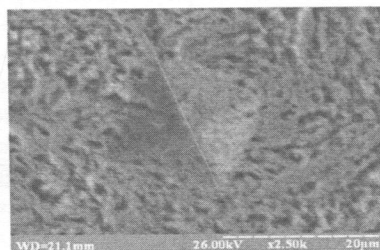
вищування графену та надтонких графенових шарів (≤ 10), а також в процесі його виробництва. Для цього використовують раманівський спектрометр та цілий ряд лазерів (з такими довжинами хвиль: гелій-кадмієвий з $\lambda=442$ нм, гелій-неоновий з $\lambda=663$ нм та твердотільні з $\lambda=457$, 532 й 671 нм) для збудження раманівських спектрів.

Важливо для діагностування матеріалів мати також ультрафіолетовий лазер з довжиною хвилі 355 нм. По-перше, велика енергія квантів лазерного випромінювання дозволяє збуджувати спектри випромінювання у широкозонних матеріалах, по-друге, у непрозорих матеріалах глибина проникнення ультрафіолетового випромінювання досить мала, що дозволяє діагностувати тільки їхній приповерхневий шар. Що стосується вуглецевих матеріалів, то тільки використання ультрафіолетового випромінювання для збудження раманівських спектрів дозволяє зареєструвати в них sp^3 фазу. Як відомо, в графена наявні тільки sp^2 зв'язки, а в багатошарових структурах наявні як sp^2 , так і sp^3 зв'язки.

2.4.5 Вимірювання мікротвердості структурних складових. Мікротвердість структурних складових нанесеного покриття по глибині вимірювали на металографічних шліфах за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 відповідно до ГОСТ 9450-76 (рис. 2.10, а). Мікросліфи виготовлялися за технологією, що описана вище. Навантаження на інденторі становило 0,5 та 1 Н залежно від структури, що вимірювалась. Як індентор використовувалась алмазна піраміда із кутом сходження граней 45° .



а)



б)

Рисунок 2.10 – Вимірювання мікротвердості

Подальше кількісне визначення величини мікротвердості проводилось шляхом вимірювання діагоналі відбитку на електронному мікроскопі РЕМ-106И, що дало змогу уникнути похибки визначення довжини за оптичного методу вимірювання та перерахунку отриманих значень за ГОСТ 9450-76. Приклад вимірювання діагоналі показано на рисунку 2.10, б.

2.4.6 Визначення зносостійкості нанесеного покриття при фретингу. Часто ресурс роботи окремих вузлів і з'єднань обмежується передчасним зношуванням деталей, що контактують; у результаті фретинг-зношування, яке виникає на спряжених поверхнях у разі дуже малих взаємних переміщень внаслідок різного виду вібрацій. Внаслідок інтенсивного зношування контактуючих поверхонь за фретинг-процесу у деталей різко змінюються конструктивні розміри і порушується робота спряжень.

Досліди за фретинг-зношування проводили на установці МФК-1 за схемою «площина-площина» (рис. 2.11) під час зворотно-поступального руху контр-зразка відносно нерухомого зразка. Зразок і контрзразок (рис. 2.12) закріплювали в цангових затискачах та притискали один до одного їх робочими поверхнями із зусиллям $P = 250 \text{ Н}$, забезпечуючи взаємне прилягання за допомогою самофіксувальної цанги зразка, після чого жорстко фіксували положення цанги зразка.

Зразки дотикали один до одного і прикладали задане стискальне навантаження, після чого вмикали привод з заданою амплітудою та частотою зворотно-поступального руху. Досліди проводили за умови постійних амплітуди та частоти зворотно-поступального руху ($A = 80 \text{ мкм}$, $\nu = 20 \text{ Гц}$), питоме навантаження P змінювали ступенево, не перериваючи експеримент у діапазоні від 5 МПа до 55 МПа з дискретністю 10 МПа . Тривалість дослідів усього експерименту становила $N = 2 \cdot 10^6$ циклів.

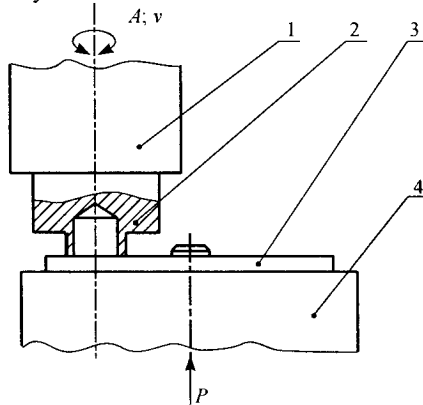


Рисунок 2.11 – Схема досліджень під час фретинг-зношування за схемою *площина-площина*: 1, 2 – рухомий та нерухомий зразки; 3, 4 – пристосування

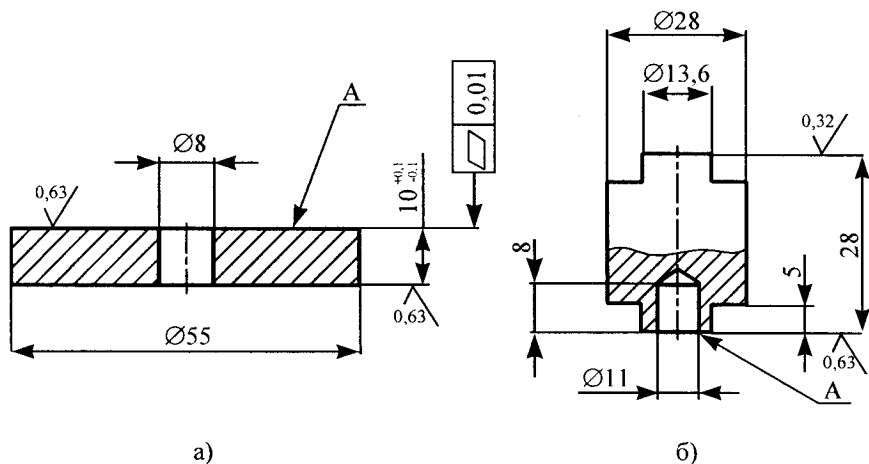


Рисунок 2.12 – Зразок (а) і контрзразок (б) для досліджень на фретинг-зношування за схемою «площина-площина»

Лінійне зношування кожного зразка вимірювали за допомогою профілографа-профілометра моделі 253. Знімали профілограми з декількох ділянок робочої поверхні зразка у радіальному напрямку. Для ділянок профілограми, які відповідали незношеній і робочій поверхням, проводили середні лінії профілю. Відстань між середніми лініями профілів дорівнює лінійному зношуванню зразка. Також під час дослідів неперервно записували величину лінійного зношування пари тертя за допомогою тензодавачів.

Зразки було виготовлено шляхом електродугового наплавлення на сталь 45 покриття з використанням дротів марок Св-08, Св-08Г2С, Нп-30ХГСА. Контрзразки було виготовлено із бронзи БрА5. Дослідження проводили без мащення. Під час дослідження на фретинг-корозію у область контакту вводився соляний розчин, таким чином створювалась гальванічна пара *сталь-електроліт-бронза*.

2.5 Вимірювання температури на поверхні матеріалу

Температурні поля під час проведення процесу наплавлення визначали за схемою, показаною на рис. 2.13. Для цього шляхом засвердлювання у характерних точках дослідних зразків встановлювали термопари. Сигнал від яких через аналогово-цифровий перетворювач надходив на ПК. Фіксування зміни температури у часі виконувалося за допомогою розробленого програмного забезпечення.

Дистанційно вимірювання температури зручно здійснювати за допомогою пірометрів.

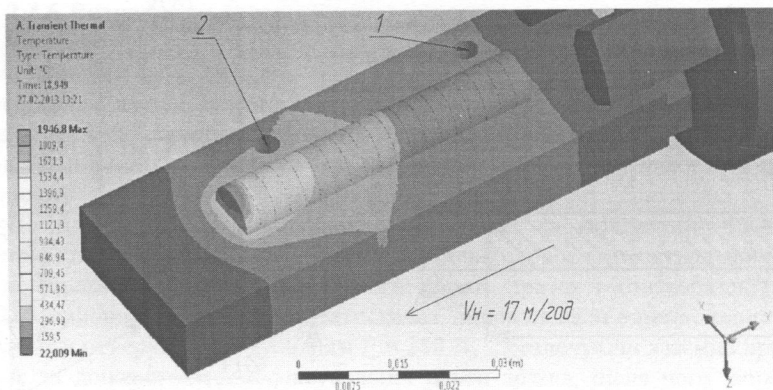


Рисунок 2.13 – Схема вимірювання температури деталі під час наплавлення (1 та 2 – місця встановлення термопар)

2.6 Вимірювання залишкових деформацій

Для вимірювання деформацій заготовки на зовнішні поверхні зношеної деталі перед початком наплавлення наносилась координатна сітка, яка фотографувалась за допомогою цифрової фотокамери. Для цього деталь та цифрова фотокамера встановлювались у спеціальних пристосуваннях. Аналогічне фотографування виконувалось після проведення процесу наплавлення. Отримані зображення зберігались та оброблялись з використанням пакета прикладних графічних програм. Після порівняння положення вузлів сітки визначалась фактична залишкова деформація заготовки. Враховуючи значну інерційність системи, вимірювання залишкових температурних деформацій у разі наплавлення проводили після охолодження деталі до початкової температури.

2.7 Методика експериментального визначення похибок отворів, що спричинені температурними деформаціями деталі та інструменту в процесі розточування наплавлених отворів

Для експериментального визначення впливу температурних деформацій інструменту та деталі в процесі розточування отворів на їх точність було виготовлено тонкостінні та товстостінні зразки, які розділено на дві групи, що розточувались за однаковою схемою, з однією відмінністю. Перша група деталей розточувалась із значним охолодженням як зони різання, так і зовнішньої поверхні деталі. Друга група розточувалась без охолодження. Такий підхід дозволив виділити температурну складову похибки розточування.

Спотворення профілю отвору після механічної обробки визначалось за показниками відхилення від циліндричності: відхилення від круглості у поперечному перерізі за стандартними методами вимірювання та відхилення від прямолінійності у повздовжньому перерізі отвору деталі.

Відхилення профілю у повздовжньому перерізі отвору досліджувалось на спеціально виготовлених та розрізаних повздовж на електроерозійному верстаті в дистильованій воді зразках, що забезпечує мінімальні спотворення профілю, за двома схемами:

- шляхом прямого вимірювання з використанням інструментального мікроскопа ОРІМ-1;
- фотографуванням профілю цифровими пристроями з високою роздільною здатністю (10 МР) та наступним вимірюванням його параметрів з використанням пакета прикладних графічних програм КОМПАС-ГРАФІК, Solid Works тощо.

Дані вимірювання профілограм піддавались статистичній обробці з використанням математичного пакета MathCAD. За даними статистичної обробки будувався статистично-очікуваний профіль отвору та визначались температурні похибки.

3 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ТА ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ І НАНЕСЕНИХ ПОКРИТТІВ

В процесі розробки нових композиційних матеріалів, покриттів, дослідження їх структурно-фазового складу та його впливу на механізми зношування, а також під час вивчення фізико-механічних властивостей одержуваних з них покриттів важливу роль відіграє вибір методів досліджень. Отримання достовірних результатів досліджень забезпечують використанням сучасного обладнання та приладів, перевірених і каліброваних метрологічними службами, апробованих методик, ретельною підготовкою зразків та обробкою результатів експерименту, строгим дотриманням порядку проведення експерименту.

Для дослідження змочування рідкими сплавами твердих поверхонь матеріалів використовують шліфовані пластинки, отримані гарячим пресуванням, вирізані та відполіровані зразки, які відповідно очищені від забруднень та окислів.

3.1 Методика дослідження контактної взаємодії в системах «поверхня твердого тіла - металевий розплав»

Розтікання рідини по поверхні твердого тіла відбувається за рахунок зменшення вільної енергії у випадку збільшення площі контакту рідкої і твердої фаз. Для рівноважної системи Юнгом [171] було виведено рівнян-

ня (3.1), яке пов'язує кінцевий контактний кут θ з міжфазною енергією на межі розділу (σ_{TP}) і поверхневим натягом твердої (σ_{TT}) і рідкої (σ_{pr}) фаз (рис. 3.1):

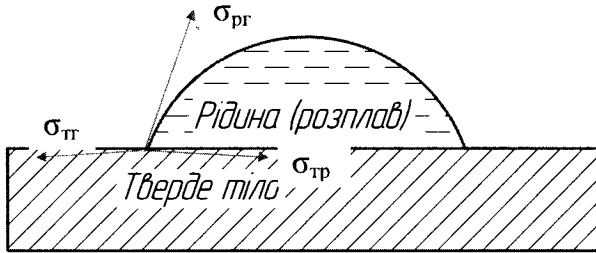


Рисунок 3.1 – Схема векторів поверхневих натягів σ_{TT} , σ_{pr} і σ_{TP} для системи «тверде тіло – рідина»

Реальні процеси розтікання нерівноважні: міжфазна енергія змінюється в часі. Але ця зміна відбувається з малою швидкістю і рідина, деформуючись, утворює контактний кут такої величини, що вектори (σ_{TP}), (σ_{TT}) і (σ_{pr}) урівноважуються. Застосовуючи принцип Д'Аламбера для будь-якого моменту часу можна записати (для проєкцій векторів на горизонтальну вісь):

$$\sigma_{TP} - \sigma_{TP} = \sigma_{pr} \cdot \cos(\theta). \quad (3.1)$$

Робота адгезії, тобто енергія відриву рідкого сплаву від поверхні твердої фази визначається із співвідношення (3.2):

$$W_A = \sigma_{pr} \cdot (1 + \cos \theta). \quad (3.2)$$

Міфазний натяг на межі «тверде – рідке» визначається із співвідношення (3.3):

$$\sigma_{TP} = \sigma_{TT} - \sigma_{pr} \cdot \cos \theta. \quad (3.3)$$

Вивчення змочування металевим розплавом поверхонь металів та кераміки різного складу (TiC , TiB_2 , ZrB_2 та CrB_2) проводиться методом «лежачої» краплі. Перевагами цього методу є його простота та можливість визначення енергетичних параметрів змочування (міжфазного натягу, роботи адгезії). Дослідження кінетики змочування проводять у вакуумі 1,33 мПа за температури, яка на 50 °С перевищує температуру плавлення сплаву. Контроль температури в печі здійснюють вольфрам-ренієвою термопарою ВР 5/20 та мікропірометром ОМП – 43М. Для дослідження кінетики змочування використовують установку, схему якої зображено на рис. 3.2.

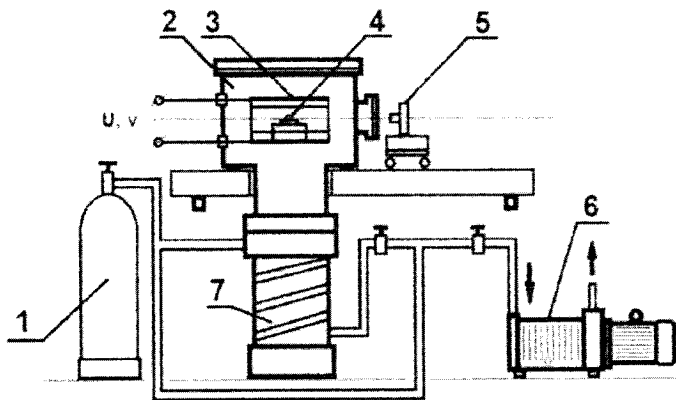


Рисунок 3.2 – Установка для визначення кінетики розтікання:

1 – резервуар для очищеного інертного газу; 2 – вакуумна камера; 3 – піч; 4 – зразок; 5 – фотокамера; 6 – форвакуумний насос; 7– дифузійний насос

Основною частиною установки є горизонтальна піч опору 3, яка являє собою вольфрамовий нагрівач з молібденовими та нікелевими екранами. Піч розташована у вакуумній камері 2, що має вікна для фіксування за допомогою фотокамери 5 контактних кутів. До складу установки також входять форвакуумний і дифузійний насоси 6, 7.

Перед змочуванням зразки знежирюють, з поверхні сплаву видаляють оксидну плівку, тугоплавкі підкладки полірують. На плоскій поверхні досліджуваної кераміки або металу розміщують зразок сплаву і поміщають їх в піч 3, після чого проводять нагрівання з максимально можливою швидкістю. Процес розтікання сплаву по твердій поверхні і контактні кути змочування визначають за допомогою цифрової фотокамери 5. Процес змочування продовжують протягом 30–40 хвилин до встановлення постійного значення контактного кута θ .

3.2 Метод диференційно-термічного аналізу

Визначення температур фазових перетворень в сплавах, композиційних матеріалах і дослідження процесів фазоутворення в них здійснюють методом диференційно-термічного аналізу (ДТА) на установці ВДТА-8М, створеній в ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України. Установка складається з вакуумної камери з піччю, пристрою, що регулює швидкість нагріву, термпарного датчика, ресструвального приладу і термостата. Досліджуваний порошковий матеріал попередньо ущільнюють і відважують 0,25 – 0,35 грам, поміщають в алундовий тигель. Досліди проводять в середовищі ге-

лію марки «ВЧ» (гелій високої чистоти з вмістом основної речовини більше 99,985%). Швидкість нагрівання 20–80 град./хв Для вимірювання температури використовують вольфрам-ренієві термопари ВР 5/20, з'єднані за схемою «комбінованої термопари». Застосування методу ДТА до досліджуваних композиційних матеріалів дає можливість визначити температурні області протікання різних стадій. фазових перетворень.

3.3 Методи дослідження структури, фазового і хімічного складу композиційних порошків, керметів і газотермічних покриттів

Для досліджень структури і фазового складу сплавів, композиційних порошків, керметів і газотермічних покриттів, а також контактних зон взаємодії «сплав–підкладка» проводять металографічний, рентгенофазовий, мікрорентгеноспектральний аналізи.

Металографічний аналіз досліджуваних матеріалів проводять на оптичних мікроскопах ММР–4, МИМ-8М і растрових електронних мікроскопах типу РЕМ-106И.

Рентгенографічні дослідження проводять в монохроматичному Cu_α -випромінюванні на дифрактометрах ДРОН–УМІ, ДРОН-3. Як монохроматор використовують монокристал графіту, встановлений на дифрагованому пучку. Дифрактограми знімають методом крокового сканування в інтервалі кутів $2\theta - 20-90^\circ$. Крок сканування становить $0,05^\circ$, час експозиції в точці 3 – 7 с. Обробку даних дифрактометричного експерименту здійснюють з використанням програми для повнопрофільного аналізу рентгенівських спектрів від суміші полікристалічних фазових складових PowderCell 2.4. Аналіз дифракційних профілів і виділення істинного фізичного розширення піків проводять методом апроксимацій. Поділ ефектів розширення дифракційних максимумів, пов'язаних з розмірами областей когерентного розсіювання (ОКР) і напругами II роду, здійснюють в наближенні Холла–Вільямса (Hall-Williamson).

Для вивчення мікроструктури, фазового та хімічного складу, а також розподілу і вмісту елементів у кожній з фаз в досліджуваних матеріалах використовують мікрорентгеноспектральний аналіз (МРСА) на мікроаналізаторах Camebax SX-50 і JEOL JAMP 9500. Кількісний МРСА в цих приладах ґрунтується на збудженні електронами в досліджуваному зразку характеристичного рентгенівського спектра хімічних елементів, які містяться в поверхневому шарі досліджуваної ділянки, та на прямо-пропорційній залежності між інтенсивністю ліній характеристичного спектра і кількістю атомів елемента в опромінюваному електронному об'ємі.

Для визначення пористості покриттів, а також кількості різних фаз в композитах і покриттях використовують лінійний метод Розівала (метод січних), оснований на тому, що за співвідношенням площ фаз, з яких скла-

дається структура досліджуваного матеріалу, можна визначити їх об'ємне співвідношення [9].

3.4 Методики дослідження фізико-механічних властивостей порошків і покриттів

Важливими характеристиками порошкових матеріалів, що визначають їх технологічні властивості, є плинність і насипна щільність. Плинність отриманих порошків визначають за допомогою каліброваної лійки (приладу Холла) відповідно до ГОСТ 20899-98, а насипну щільність – з використанням воронки і волюмометра Скотта (для порошків з низькою плинністю) згідно з ГОСТ 19440-94.

Мікротвердість керметів та отриманих покриттів визначають на приладі ПМТ-3 вдавлюванням алмазної піраміди Віккерса в поліровану поверхню шліфа за навантаження 0,05 – 0,1 Н.

Адгезійний зв'язок покриттів з підкладкою визначають за клейовою пробою відповідно до ГОСТ 9.304-87. Вигляд зразка з покриттям, склеєного з контрольним зразком показано на рис. 3.3.

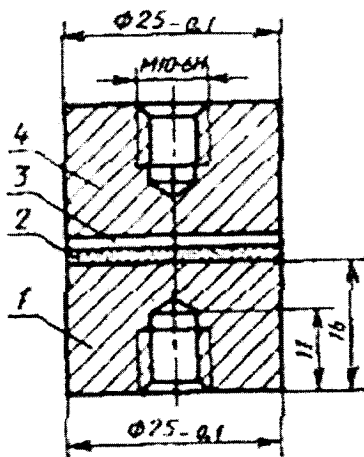


Рисунок 3.3 – Зразок з покриттям, склеєний з контртілом для випробувань на адгезійну міцність: 1 – зразок з покриттям; 2 – покриття; 3 – прошарок клею; 4 – контртіло

Міцність зчеплення покриття визначають за формулою (3.5):

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (3.5)$$

де σ – міцність зчеплення, МПа;

F – зусилля відриву, Н;

S – площа поперечного перерізу зразка, см².

Міцність зчеплення випробовуваного покриття визначають як середнє арифметичне з результатів п'яти випробуваних зразків.

4 ТРИБОТЕХНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

Під час триботехнічних випробувань матеріалів, які призначені для роботи в умовах тертя ковзання та зношування, визначаються такі характеристики:

- коефіцієнти тертя спокою залежно від умов навантаження та умов середовища;
- коефіцієнти тертя ковзання залежно від параметрів руху, умов середовища в зоні трибоконтракту;
- зносостійкість для заданих або екстремальних умов роботи.

4.1 Методика та визначення коефіцієнтів тертя спокою

Вибір або синтез матеріалів триботехнічних пар для використання в приводах технологічних машин відіграє важливу роль не тільки з погляду мінімізації енергетичних втрат і зносу, але і як важливий фактор забезпечення стійкого руху без автоколиваний. Це особливо актуально для механізмів з широким діапазоном робочих швидкостей, для запуску під навантаженням та з високими вимогами до плавності та точності перемішень. Для таких механізмів важливо мати малі коефіцієнти тертя з оптимальними характеристиками. Особливо жорсткі вимоги висувуються до характеристик тертя у напрямних металорізальних верстатів, розподільних пар гідромоторів та інших точних механізмів, що працюють в умовах малих швидкостей переміщення, де зазвичай виникають автоколивання. Рядом дослідників встановлено, що причиною виникнення автоколиваний у механізмах з парами ковзання є нелінійність їхніх характеристик тертя. Для різних пар матеріалів і режимів тертя, параметрів привода виявлено дуже різноманітні закони зміни коефіцієнта тертя від тривалості нерухомого контакту, швидкості ковзання, виду і складу мастила та ін. Як правило, для кожної конструкції і поєднання матеріалів пари тертя необхідно на етапі дослідного конструювання експериментально визначити можливість реалізації варіанта проектного рішення і вносити необхідні корективи.

Далі запропоновано методику і результати експериментального визначення залежності сили тертя спокою від різних факторів. Визначити статичні характеристики тертя (тертя спокою) дозволяє використання спеціальної установки (рис. 4.1), що складається з регульованого привода і досліджуваної пари тертя. Привод дозволяє одержувати стабільні швидкості в діапазоні від $V=0.005 \cdot 10^{-2}$ м/с до $V=1 \cdot 10^{-2}$ м/с. Досліджувана пара тертя виконана у вигляді товстостінної втулки з композиційного матеріалу і сталевого циліндричного повзуна, що переміщається в ній.

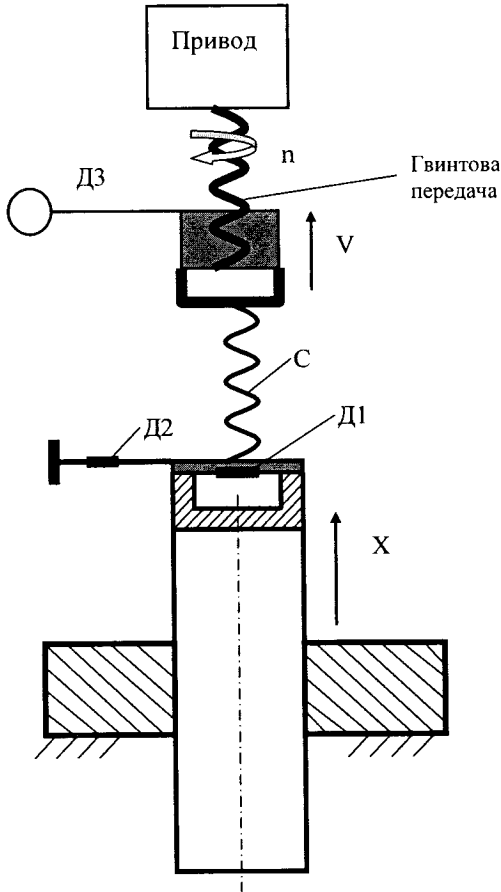


Рисунок 4.1 – Установка для експериментального визначення коефіцієнтів тертя спокою

Експерименти проводяться за наявності постійного натягу між втулкою та повзуном порядку 2 мкм за шорсткості поверхонь $Ra < 0,03$ мкм. Пе-

редача руху від привода на повзун відбувається через пружний зв'язок (пружину) із жорсткістю $C=640000$ Н/м.

Тангенціальна сила, що прикладається до повзуна уздовж його осі, формувалася в пружному зв'язку C шляхом його деформації приводом зі швидкістю V і дорівнює:

$$P=C(Vt-X),$$

де X – переміщення повзуна,

t – незалежний час.

Установка оснащена давачем Д1 сили P , яка діє на повзун, переміщення повзуна Д2, його швидкості Д3. Така схема з парою тертя – товстотинна втулка – циліндричний повзун є механічною системою з одним ступенем вільності, де нормальні переміщення повзуна відносно фрикційного контакту поверхонь малоймовірні. Це дозволяє трактувати всі процеси, які проявляються під час навантаження повзуна, а потім і під час його руху, як такими, що породжені властивостями процесів виникнення та зміни сили тертя в трибоконтакті, а не кінематикою, наприклад відривом одного тіла тертя від іншого в парі внаслідок їх нормального зміщення.

Вимірювання сили тертя спокою виконуються в умовах руху із самозбудними релаксаційними коливаннями. Водночас вивчається вплив похідної dP/dt від сили, що зрушує, та тривалості витримки нерухомого контакту перед стартом повзуна на силу тертя спокою.

На рис. 4.2 показано приклад типової осцилограми руху з релаксаційними коливаннями. На осцилограмі добре видно періоди відносного спокою, коли швидкість руху $dx/dt=0$ та періоди руху (стрибка), де швидкість майже миттєво зростає від нуля до максимуму, а потім зменшується до нуля. У період спокою рушійна сила P зростає прямо пропорційно до швидкості V розтягування пружини, що задається приводом, а сила тертя проявляється як реакція на цю силу. У цей період фактична міцність фрикційних зв'язків, що утворилися, більша сили тертя, яка фіксується давачем. І тільки в момент зрушення повзуна з місця рушійна сила дорівнює силі тертя, що, звичайно, і називають силою тертя спокою.

Спостереження за рухом повзуна на таких малих швидкостях дозволяє більш глибоко зрозуміти фізику процесів формування взаємодії пари тертя в трибоконтакті та постулат, що сила тертя F проявляється лише як реакція на зовнішні впливи.

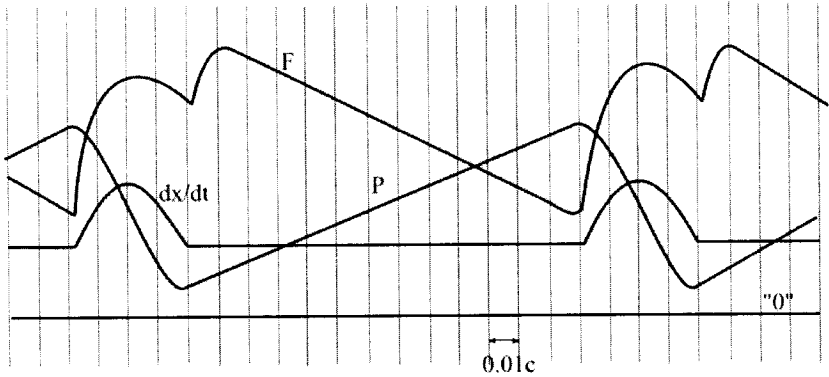


Рисунок 4.2 – Приклад типової осцилограми руху з релаксаційними коливаннями

На рис. 4.3 показано приклади осцилограм руху повзуна з різними швидкостями наростання рушійної сили. Умовою початку руху повзуна є однаковість рушійної P і сили тертя F . Тому за значенням сили, що зрушує повзун з місця, визначають силу тертя спокою. Для вивчення факторів, що впливають на величину сили F , виконувалося осцилографування зміни рушійної сили P в режимі релаксаційних коливань (в цій серії покази давача швидкості dx/dt , давачів сили тертя F і переміщення на осцилограф не виводилися). Виникнення в досить широкому діапазоні швидкостей стійких релаксаційних коливань руху повзуна, отримані на цій експериментальній установці, і їх ідентичність релаксаційним коливанням руху повзуна в системі з двома чи декількома ступенями вільності, дозволяє стверджувати про їх єдину природу.

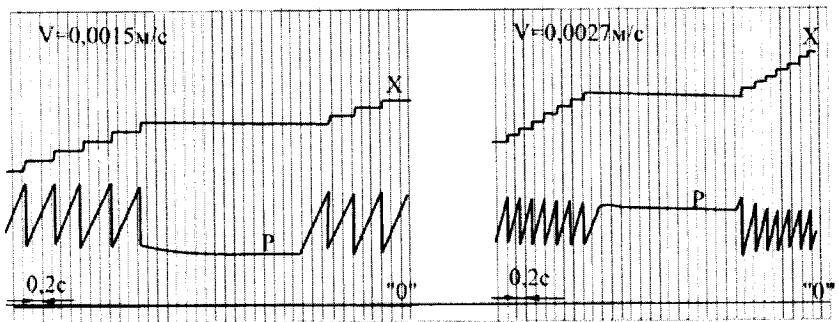


Рисунок 4.3 – Приклади осцилограм руху повзуна з різними швидкостями наростання рушійної сили

Для визначення залежності сили тертя спокою від різних факторів виконуються досліди з визначення впливу величини рушійної сили за витримки фрикційних поверхонь у нерухомому контакті, на силу тертя спокою в 1-му стрибку, впливу напряму руху перед витримкою, а також характеру установчих переміщень повзуна перед початком експериментів. Установлено, що перераховані вище фактори не мають істотного впливу на формування фрикційних зв'язків і величину сили тертя спокою. Виключенням є випадки, коли фрикційний контакт навантажувалася рушійною силою, яка майже забезпечувала зрушення та втримувався в такому стані певний час. В цьому випадку тертя спокою має величину, що перевищує його значення за інших умов. Потрібно зазначити, що в такому випадку істотний вплив на силу тертя спокою має ступінь близькості рушійної сили до сили тертя спокою. Очевидно, що збільшення міцності фрикційних зв'язків є наслідком їх упорядкування в процесі попереднього мікрозсуву, характерного для подібних пар тертя.

Для виключення впливу положення повзуна у втулці і можливої нерівномірності зносу тертьових поверхонь експеримент проводився для кожної швидкості декілька разів по всій довжині повзуна. Стабільність одержуваних результатів на всіх ділянках повзуна була підставою їхньої достовірності. Для обробки результатів широко використовувалися методи теорії імовірностей і математичної статистики. Установлено, що всі параметри характеристик сил тертя в партії експериментів досить добре підпадають під закони нормального розподілення.

Серією експериментів із сухим тертям отримано характеристику тертя спокою залежно від параметрів швидкості навантаження для пари сталь – композиційний чавун (рис. 4.4). Вплив тривалості нерухомого контакту на тертя спокою в цій серії експериментів не виявлено. Експериментальні дослідження процесів ковзання зі змащенням проводилися з використанням олів I-20, Ткп-22, АМГ-10. Якісної різниці між характеристиками тертя за змащення різними оливами не виявлено. На рис. 4.3 показано приклади осцилограм повільних переміщень за мащення оливою марки Ткп-22 для режиму з швидкістю розтягування пружини $V = 0,004$ м/с. Перший стрибок на осцилограмі відбувається за рушійної сили, яка значно перевищує її значення в наступних стрибках. Після декількох стрибків сила тертя спокою поступово зменшується, а потім стабілізується і залишається постійною. Осцилограми показали залежність різниці між силою тертя спокою в 1-му стрибку й у сталих коливаннях, а також залежність сили тертя спокою в сталих коливаннях від величини швидкості зростання навантаження V .

Це є наслідком залежності сили тертя спокою від двох основних факторів: тривалості нерухомого контакту (сила тертя спокою в 1-му стрибку більша, ніж у наступних) і швидкості тангенціального навантаження (сила

тертя спокою в сталих коливаннях неоднакова для різних швидкостей розтягування пружини V).

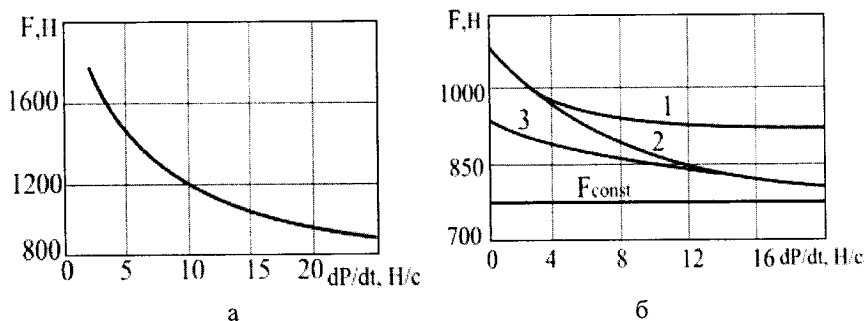


Рисунок 4.4 – Вплив на силу тертя спокою швидкості наростання зсувної сили (ковзання без мастила)

Для поділу сили тертя спокою на дві складові: як функцію тривалості нерухомого контакту $F(t)$ і функцію швидкості тангенціального навантаження $F(dP/dt)$ використовують спеціальну методику. В такому разі встановлюють певну швидкість V привода і виконують осцилографування зміни рушійної сили після витримок фрикційної пари в нерухомому стані з різною фіксованою тривалістю t . Оскільки в момент зрушення рушійна сила і сила тертя однакові, то за рушійною силою визначають силу тертя спокою. Будують залежність $F(t)$ сили тертя спокою як різниці її значення в 1-му стрибку й у сталих коливаннях. Виявлено, що збільшення тривалості нерухомого фрикційного контакту до 2–3 секунд призводить до відповідного зростання сил тертя спокою за умови наявності мастила. Подальше збільшення тривалості нерухомого фрикційного контакту впливу на силу тертя спокою не має. На рис. 4.5, б показано зміни сили тертя спокою (крива 2) $F(t)$ як функції тривалості нерухомого контакту.

На рис. 4.5, а показано складову сили тертя, що залежить від швидкості тангенціального навантаження $F(dP/dt)$, яка може бути отримана зі значень сили тертя спокою в 1-му стрибку після тривалої зупинки шляхом вирахування з неї максимального значення складової сили тертя $F(t)$.

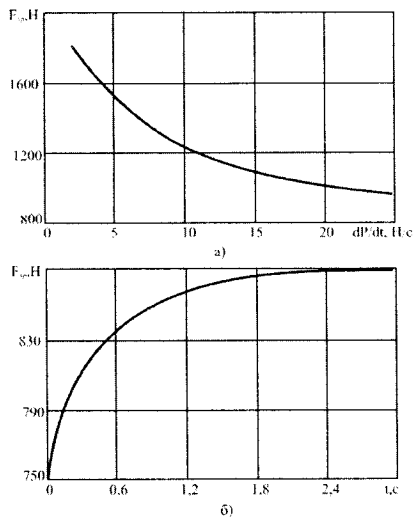


Рисунок 4.5 – Статичні характеристики тертя (трибоконтакт з мастилом):
 а) залежність сили тертя спокою від швидкості зростання зсувної сили;
 б) залежність сили тертя спокою від тривалості нерухомого контакту

Висновки

1. У парах з тертям ковзання зі змащенням на малих швидкостях силу тертя спокою варто розглядати як таку, що складається з таких найбільш істотних частин: постійна складова – крива, рис. 4.4, б; складової тертя, що залежить від тривалості нерухомого контакту $F(t)$ – рис. 4.5, б; складова тертя, що залежить від швидкості тангенціального навантаження $F(dP/dt)$ – рис. 4.5, а.

2. У парах з тертям ковзання без змащення на малих швидкостях силу тертя спокою варто розглядати як таку, що містить постійну складову і залежну від швидкості тангенціального навантаження $F(dP/dt)$ – рис. 4.4.

4.2 Методика та визначення зносостійкості металокарбідних матеріалів і покриттів

Більшість робочих поверхонь деталей машин працює в умовах абразивного зношування. Це зумовлено високим рівнем забруднення абразивними частинками (пилом), які потрапляють із зовнішнього середовища та продуктів зношування поверхонь ковзання. Робочі органи сільськогосподарських, гірничих, дорожніх машин призначені для функціонування в абразивному середовищі.

Відомо різні методики лабораторних випробувань матеріалів на зношування під впливом абразивних частинок. Абразив може бути закріпле-

ним (наприклад, наждачне полотно) або незакріпленим – наприклад, кварцовий пісок в рідкому середовищі. Мікротвердість піску звичайно оцінюється в 10,0 – 13,0 ГПа. За результатами експерименту (див. розділ 5) мікротвердість зміцнювальних карбідних структурних складових одержаних покриттів близька до цієї величини, а мікротвердість матриці в два – три рази менша, але все ж таки порівнянна з нею. Тому планувалося проведення двох етапів випробувань. Перший передбачав зношування зразків на шліфувальному полотні з абразивом з карборунду і другий – зношування на абразивному прошарку з кварцового піску в рідкому середовищі. Твердість карборунду значно вища (вона становить близько 20,0 ГПа) і перший етап випробувань дає можливість оцінити граничні характеристики міцності покриття, а другий – моделює умови експлуатації, максимально наближені до реальних умов роботи.

Еталонні зразки для визначення відносної зносостійкості виготовлялись з сталі 40ХН (поширений матеріал для різальних органів землеробних та бурильних машин), які піддавались термообробці (загартовування з 820 °С за охолодження в масло та відпуску за 300-350 °С). Твердість таких зразків становила HRC 53-56.

4.3 Конструкція експериментальної установки

Для оцінення триботехнічних властивостей покриттів використовували експериментальну установку для випробувань робочих поверхонь на зношування по абразивному прошарку. Принципову схему установки подано на рис. 6.6. За умовами зношування вона подібна до машини типу «нерухоме кільце» [24], але одночасно зношуванню піддаються три зразки, закріплені під кутом 120°, один з яких – еталон.

Зносостійкість оцінювалась як абсолютна (за лінійним зносом) та відносно еталонного зразка (зі сталі 40ХН). Використання трьох точок опори забезпечує площинність траєкторії руху зразків по абразивному прошарку. Конструктивно установку можна використовувати в двох модифікаціях, які відповідають умовам абразивного зношування на закріпленому та незакріпленому абразивах.

Під час виконання першого варіанта випробувань шліфувальний папір закріплюється на нерухомому диску. Зразки та еталон закріплювались на диску 3, який встановлено на вертикальному шпинделі установки. Диск з закріпленими зразками обертається від привода з частотою обертання n . Зразки зношуються, описуючи колові траєкторії близьких радіусів, причому еталон – по середньому колу.

Умови проведення випробувань: зусилля на зразок – 150 Н; частота обертання вала з закріпленими зразками – 1.0 с^{-1} ; шлях тертя зразка за один інтервал досліду – 100 м (10 хв). Розміри зразків – $5 \times 15 \text{ мм}^2$. Площа зразка, по якій проходить процес тертя, 75 мм^2 , тиск – 2,0 МПа.

За другим варіантом всі три зразки вмішувались у ємність, заповнену піском з водою, і проходили однаковий шлях тертя. Частота обертання вала – 3,0 оберти за секунду.

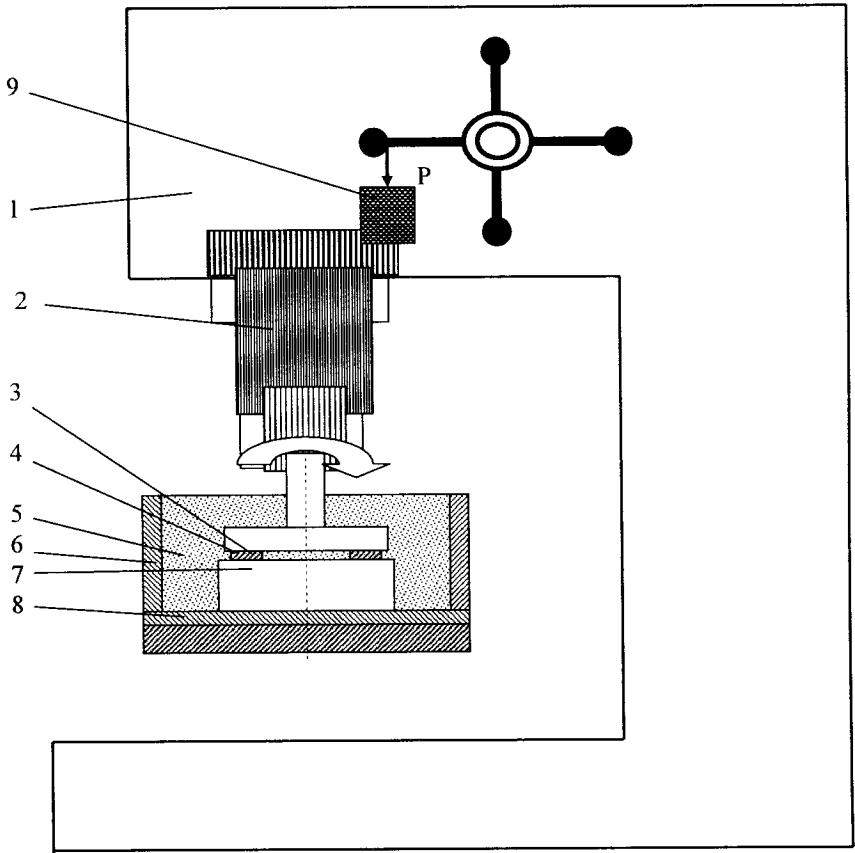


Рисунок 4.6 – Схема експериментальної установки для випробувань на абразивну зносостійкість:

- 1 – станина ; 2 – шпindelъ ; 3 – приводний диск із зразками, які досліджуються; 4 – зразки; 5 – середовище процесу тертя; 6 – ємність;
7 – контртіло; 8 – стіл установки; 9 – навантаження P

4.4 Результати досліджень на зносостійкість

Результати експерименту показано в таблицях 4.1 – 4.3.

В таблицях подано опис структури покриттів. Карбідна фаза розміром більше ніж 0.5 - 1 мкм розглядалася як надлишкова, структурно вільна, хоча за походженням це евтектичні карбіди, що виростили за розміром протягом часу витримки зразків в процесі формування покриття.

При випробуваннях по закріпленому абразиву зносостійкість отриманих покриттів в 2 – 2,4 раза вища, ніж у сталі 40ХН. Вона залежить від об'ємного співвідношення між матрицею та зміцнювальною карбідною фазою, їх мікротвердості. Вплив мікротвердості матриці на зносостійкість покриття проявляється більш виразно, ніж карбідної фази. Це можна пояснити тим, що твердість карбідів та абразиву ближчі. Підвищення твердості та вмісту структурно вільної карбідної фази за одночасного зниження твердості матриці не призводить до підвищення зносостійкості.

Таблиця 4.1 – Відносна зносостійкість композиційних покриттів за випробовувань по закріпленому абразиву

№	Товщина покриття, мм	Структура покриття	Мікротвердість, ГПа		Відносна зносостійкість
			Карбідів	Матриці	
1	1.6	карбідна фаза – 10%(0.5 – 1,5 мкм)	10,0	6,0	2.3
2	1,6	карбідна фаза - 20% (~1 мкм)	10,0	8,0	2, 6
3	1.8	карбідна фаза – 30% (~ 3 мкм) дендрити твердо-го розчину – 25%	12,0	6,0	1.8
4	1.4	карбідна фаза –20% (1-2 мкм)	10,0	8,0-9,0	2.5
5	1.5	карбідна фаза 30% (5 – 10 мкм)	13,0	8,0	2,4
6	1.6	карбідна фаза – 10% (2 мкм)	11,0	8,0	2,2
7	1.5	карбідна фаза –30% (15 – 20 мкм)	11,0	7,0	2.5
8	1.4	карбідна фаза – 25% (25 – 40), евтектика	14,0	8,0	2.4
9	1.5	карбідна фаза –25% (40 – 50 мкм), евтектика	13,0	7,0	2.35
10	1.5	карбідна фаза – 10% (5 – 15 мкм)	12,0	8,0	2.2
11	1.5	карбідна фаза –30% (до 100 мкм), твердий розчин	10,0 – 13,0	7,0	2.0

Таблиця 4.2 – Відносна зносостійкість композиційних покриттів за зношування у гідроабразивному середовищі

Покриття №	Товщина покриття, мм	Відносна зносостійкість
1	1.5	1.9
2	1.5	2.5
3	1.5	2.6
4	1.5	2.7
5	1.5	2.3

Під час випробовувань у гідроабразивному середовищі зносостійкість всіх проаналізованих покриттів вища, що пояснюється нижчою мікротвердістю абразивних частинок піску, ніж у шліфувального полотна і зношування іде менш інтенсивно.

Таблиця 4.3 – Лінійне зношування композиційних покриттів на основі карбідів тугоплавких металів під час тертя по закріпленому абразиву

Система / режим	Структурні складові	Співвідношення між структурними складовими	Мікротвердість, ГПа	Лінійний знос, мм/100 м
Cr + C / 1	карбідна фаза + твердий розчин	1 : 3	11,0 - 5,0	0.1
Cr + C / 2	карбідна фаза + евтектика	1 : 4	12,5 - 6,0	0.05
V + C / 1	карбідна фаза + твердий розчин	1 : 3	11,0 - 5,0	0.1
V + C / 2	карбідна фаза + евтектика + твердий розчин	1 : 2 : 2	13,0 - 7,0	0.02
W + C / 1	карбідна фаза + твердий розчин	1 : 2	14,0 - 5,5	0.01

Аналіз результатів показує, що зносостійкість покриттів визначається кількістю та величиною карбідної фази, мікротвердістю матриці і особливо підвищується за наявності евтектики. Знижує зносостійкість наявність та несприятлива орієнтація дендритів твердого розчину, які мають порівняно низьку мікротвердість. Збільшення розмірів карбідів не дають значного впливу на зносостійкість.

Склад суміші, характеристики компонентів, тепловий режим процесу утворення покриття визначають його структуру і, як результат, його зносостійкість. Тому для розробки технології формування покриттів насамперед потрібно визначити взаємозалежність між параметрами технологічного процесу, структурою та зносостійкістю.

4.5 Дослідження зносостійкості в процесі абразивного зношування композиційних покриттів з використанням багатофакторного експерименту

Для визначення технологічних факторів формування покриттів на деталях, що найбільш впливають на зносостійкість, характер і ступінь їх впливу на неї, тобто для встановлення безпосередніх зв'язків між режимом нанесення покриттів та їх властивостями, було проведено дослідження з використанням методів багатофакторного експерименту. Для всіх зразків нанесення покриттів здійснювалось з використанням пічного підігріву, за схемою укладання шарів «деталь – металевий порошок – вуглецевий волокнистий матеріал». Випробування проводили на вищеописаній установці з вказаними параметрами. Досліджувалось масове зношування, яке визначалось на аналітичних вагах з ціною поділки 0.1 мг через кожні 10 хвилин випробувань.

На основі проведених експериментів для дослідження обрано такі фактори:

- температура зовнішнього підігріву;
- тривалість зовнішнього підігріву;
- вміст у суміші вуглецевого матеріалу (розраховувався через його поверхневу щільність, щільність і товщину шару порошку).

Припускалось на основі попередніх даних, що всі ці параметри, як фактори експерименту дослідження зносостійкості, відповідають умовам їх керованості, незалежності і сумісності один з одним. Керованість факторів розглядали як можливість передавати їм довільний рівень в області визначення і фіксувати сталим протягом всього дослідження, незалежність – як відсутність між ними кореляційного зв'язку, а сумісність – як можливість зафіксувати кожен з них на будь-якому рівні незалежно від значень рівнів інших факторів.

Проведення повного багатофакторного експерименту сплановано в інтервалі допустимих значень цих трьох факторів, які визначено попередніми розрахунками та експериментальними дослідженнями. Обрано методику розробки математичної моделі зносостійкості покриттів [25], яка дозволяє подати його у вигляді поліному першого степеня:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (4.1)$$

Обрані фактори позначено через X_1 , X_2 , X_3 . Для спрощення розрахунків було введено кодовані змінні. Рівні факторів, експерименту та інтервали зміни в натуральних і в кодованих значеннях наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Рівні факторів експерименту та інтервали зміни в натуральних і в кодованих значеннях

Рівні факторів	Найменування факторів та їх натуральні значення		
	Температура підігріву, °С X_1	Тривалість підігріву, хв X_2	Вміст вуглецю в суміші, % ваг., X_3
Основний рівень (0)	1200	40	15
Інтервал варіювання (I)	100	20	5
Верхній рівень (+1)	1300	60	20
Нижній рівень (-1)	1100	20	10

Таблиця 4.5 – Матриця планування та результати експерименту на зносостійкість

№ досл.	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	У
1	+	+	+	+	+	+	+	+	0.55
2	+	-	+	+	-	-	+	-	0.49
3	+	+	-	+	-	+	-	-	0.55
4	+	-	-	+	+	-	-	+	0.7
5	+	+	+	-	+	-	-	-	0.6
6	+	-	+	-	-	+	-	+	0.68
7	+	+	-	-	-	-	+	+	0.7
8	+	-	-	-	+	+	+	-	0,75

В таблиці 4.5 наведено кодування значень факторів +1 і -1. Для спрощення запису одиниця звичайно пропускається.

В матрицю введено стовпчик фіктивної змінної X_0 , яка в усіх випадках набуває тільки значення «+» і слугує для розрахунку вільного члена b_0 . Стовпці подвійної і потрійної взаємодії отримуються перемноженням стовпців X_1 , X_2 , X_3 і призначаються для розрахунку відповідних коефіцієнтів рівняння (1). Для постановки кожного із восьми дослідів фактори X_1 , X_2 , X_3 задаються згідно з матрицею планування (таблиця 4.5 на верхньому (+) або нижньому (-) рівні).

Для забезпечення необхідної точності експерименту проводилось три незалежних досліди з незмінними режимами. Однорідність дисперсії паралельних дослідів оцінювалась за такою методикою.

Середнє арифметичне значення параметра оптимізації для кожного рядка матриці визначалось за формулою

$$\bar{y}_j = \sum_u \frac{y_{ju}}{r},$$

де r – кількість паралельних дослідів;

u – номер паралельного досліду;

y_{ju} – значення функції відгуку в u -му паралельному досліді j -го рядка матриці.

Для оцінення відхилень її від середнього значення обчислювалась дисперсія паралельних дослідів

$$S_j^2 = \sum_{u=1}^r \frac{(y_{ju} - \bar{y}_j)^2}{(r-1)}.$$

Однорідність дисперсії паралельних дослідів перевірялась за критерієм Кохрена, що являє собою відношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій

$$G_p = \frac{S_{j\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}.$$

Гіпотеза про однорідність дисперсій підтверджується, якщо розрахункові значення критерію не перевищують табличного (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Значення G- критерію Кохрена ($\alpha=0.05$)

$f_2=N$	$f_1=r-1$				
	1	2	3	4	5
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895
6	0,7808	0,6161	0,5821	0,4863	0,4447
8	0,6798	0,5057	0,4377	0,3910	0,3595
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029

Рівень значущості всіх розглянутих критеріїв – $\alpha=0,05$. За таких умов вірогідність P правильного досліді становить

$$P=1-0,05=0,95 \text{ або } 95\%.$$

Розрахункове значення критерію порівнюється з табличним для ступенів вільності чисельника $f_1=r-1=3-1=2$ і знаменника $f_2=N=8$. Якщо $G_{\text{табл}} > 0$, то гіпотеза про однорідність паралельних дослідів приймається.

Звідки дисперсія повторюваності буде дорівнювати

$$S^2(y) = \sum_{j=1}^N \frac{S_j^2}{N}$$

Похибка експерименту становить

$$S(y) = \sqrt{S^2(y)}$$

Для проведення розрахунків було складено програму мовою програмування Паскаль для персонального IBM-сумісного комп'ютера. Далі подано результати роботи програми.

Таблиця 4.7 – Значення дисперсії паралельних дослідів

Номер дослідів №	1	2	3	4	5	6	7	8
Дисперсія паралельних дослідів	0.0045	0.001	0.0014	0.0053	0.0022	0.0032	0.0021	0.0017

Розраховане значення G-критерію Кохрена становить 0.3231, табличне значення (за $f_1 = 2$ і $f_2 = 8$) дорівнює 0.5057, тобто гіпотеза про однорідність паралельних дослідів приймається. Дисперсія повторюваності дорівнює 0.00218, а похибка експерименту – 0,0467.

Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії (4.1) виконувався за наведеною нижче послідовністю.

Вільний член b_0 обчислюється за формулою

$$b_0 = \sum_{j=1}^N \frac{y_j}{N}$$

Коефіцієнти, що характеризують лінійні ефекти моделі (b_1, b_2, b_3), визначаються із виразу

$$b_u = \sum_{j=1}^N \frac{X_u y_j}{N}$$

Коефіцієнти ефекту взаємодії ($X_1 X_2, X_2 X_3, X_1 X_3, X_1 X_2 X_3$) розраховують з залежності

$$b_{12} = \sum_{j=1}^N \frac{X_{1j} X_{2j} y_j}{N}$$

За результатами проведених досліджень отримано рівняння регресії:

$$Y = 0.63 - 0.028X_1 - 0.047 X_2 - 0.055 X_3 + 0.022 X_1 X_2 + 0.005 X_1 X_3 - 0.006 X_2 X_3 + 0.03 X_1 X_2 X_3$$

Перевірка статистичної значущості коефіцієнтів виконувалась за t -критерієм Стьюдента. Для повнофакторного експерименту помилки всіх коефіцієнтів однакові між собою і визначаються за формулою

$$S(b_i) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nr}}$$

Далі визначається інтервал довіри довжиною $2\Delta b_i$:

$$\Delta b_i = \pm t_{кр} S(b_i).$$

Критичне значення $t_{кр} = 2,12$ вибиралось за табл. 4.8 для числа ступенів вільності $N(r-1) = 16$.

Таблиця 4.8 – Значення t - критерію Стьюдента

$f(r-1)$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Значення t -критерію	22,571	22,447	22,365	22,306	22,262	22,228	22,201	22,179	22,160	22,145	22,131	22,12

Коефіцієнт є значущим, якщо $|b_i| \geq \Delta b_i$. Статистично незначні елементи виключаємо з рівняння. Коефіцієнти в рівнянні будуть показувати на силу впливу факторів. Чим більший за величиною коефіцієнт, тим більший вплив він має.

Якщо коефіцієнт має знак «+», то зі збільшенням значення фактора параметр оптимізації збільшується.

Знак «-» біля коефіцієнта показує, що якщо збільшується цей фактор, то вплив параметра оптимізації зменшується.

Перевірка показала, що два коефіцієнти (b_{13} і b_{23}) мають бути виключені з рівняння регресії (інтервал довіри становив 0.2). Після коректування рівняння регресії було отримано математичну модель залежності зносостійкості покриття від параметрів його нанесення:

$$Y = 0.63 - 0.028X_1 - 0.047X_2 - 0.055X_3 + 0.022X_1X_2 + 0.03X_1X_2X_3.$$

Перевірка на адекватність проводилась за критерієм Фішера

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S^2(n)}.$$

Тут дисперсія адекватності

$$S_{ad}^2 = r \sum_{j=1}^N \frac{(\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - \lambda},$$

де λ – кількість значимих коефіцієнтів рівняння;

\bar{y}_j – середнє арифметичне значення параметра оптимізації в j -му досліді;

\hat{y}_j – значення параметра оптимізації, яке обчислюється за моделлю для умови j -го досліді.

Оскільки виконується умова $F_p < F_{табл}$, то розроблена модель є адекватною.

Аналіз отриманої моделі показав, що всі обрані фактори, зі збільшенням в досліджуваному інтервалі, впливають на зносостійкість покриттів в сторону її підвищення, оскільки коефіцієнти в рівнянні регресії, яке моделює процес зношування, від'ємні. Але кількісно вплив часу витримки системи з підігрівом та вмісту вуглецю більш значний, ніж у такого фактора, як температура підігріву, а коефіцієнти, що враховують ефекти взаємодії цього фактора з іншими, виявилися незначними. Це означає, що підвищення температури підігріву вище 1100 °С не дає такого ефекту підвищення зносостійкості, як інтенсифікація інших технологічних параметрів. Це може пояснюватись тим, що температура підігріву менше впливає на кількість карбідної фази, яка утворюється, а надмірне зростання карбідів вище оптимального розміру навіть може негативно впливати на зносостійкість (рис. 4.7).

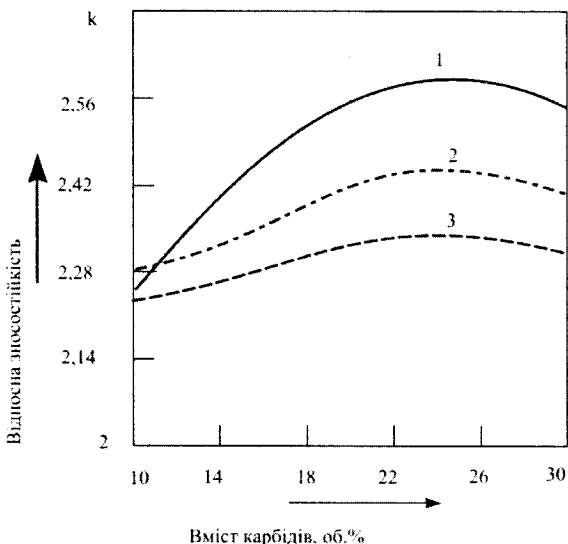


Рисунок 4.7 – Залежність зносостійкості композиційних покриттів від вмісту карбідів з розмірами: 1) 2 – 5 мкм; 2) 5 – 15 мкм; 3) більше 15 мкм

Тому для забезпечення високої зносостійкості процес нанесення покриттів вигідніше організувати з більшою тривалістю витримки на мінімально необхідних температурах підігріву та збільшувати вміст вуглецю в початковій суміші. На користь цього висновку також свідчить те, що витримка з високими температурами призводить до погіршення структури металу підкладки.

4.6 Методика дослідження триботехнічних властивостей газотермічних покриттів

Дослідження процесу зношування матеріалів та покриттів з сплавів із композиційних покриттів проводять за двома методиками.

За першою методикою випробування проводилися в умовах тертя ковзання без мастила за схемою «вал – частковий вкладиш» на машинах тертя, конструкція яких дозволяє в процесі експерименту вимірювати одночасно лінійний знос пари і коефіцієнт тертя. Ваговий знос зразка та контртіла визначається зважуванням через кожен кілометр шляху тертя. Як контртіло (вал) використовують диски діаметром від 40 мм із загартованої сталі ШХ15 (HRC 55), 40X. Як зразок (вкладиш) – стрижень діаметром 5 мм з покриттям товщиною 0,5 – 0,7 мм або призматичний зразок. Попереднє припрацювання покриття проводять на алмазному крузі, який встановлюється замість диска із сталі ШХ15 і має однакові розміри. Після припрацювання зразка до алмазного диску встановлюється контртіло і на ньому покриття припрацьовується остаточно. Для отримання достовірних порівняльних результатів випробування всіх матеріалів і покриттів проводяться в однакових умовах. Величина навантаження становить $P = 2$ кг (діаметр 5 мм, тиск $p_{\text{пит}} = 1$ МПа), довжина шляху тертя $L = 5$ км, швидкість ковзання $V = 0,5; 1,0; 3,0$ і $6,0$ (м/с) або інші відповідно до умов експлуатації.

За іншою методикою випробування також проводяться в умовах тертя ковзання без мастила за схемою «палець – диск» на триботестері Bruker UMT Multi-Specimen Test System (рис. 4.7 і 4.8).

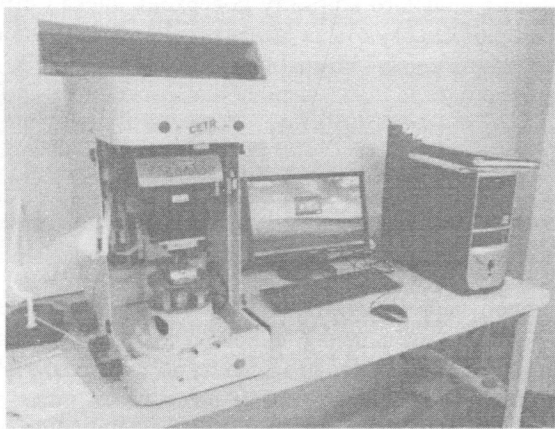


Рисунок 4.7 – Триботестер фірми Bruker UMT Multi-Specimen Test System

Цей прилад дозволяє за короткий час автоматично проводити вимірювання основних параметрів процесу тертя в широких діапазонах швидкостей і навантажень з їх реєстрацією на комп'ютері.

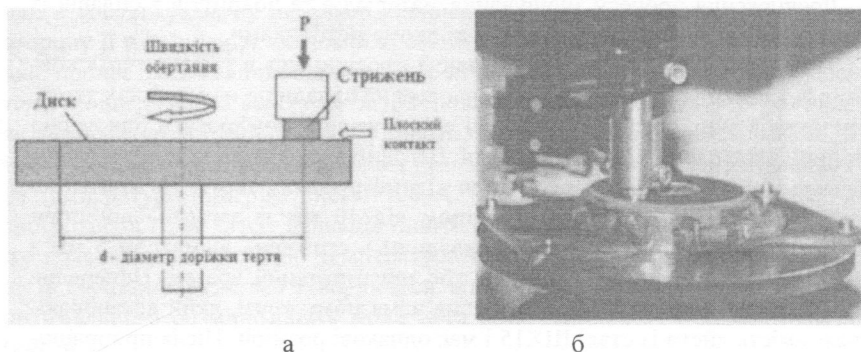


Рисунок 4.8 – Схема випробувань (а) і вигляд вузла тертя (б) на триботестері Bruker UMT Multi-Specimen Test System

За зразок використовують циліндричний стрижень діаметром 5 мм висотою 15 мм, а як контртіло – сталевий циліндричний диск діаметром 40 мм і висотою 10 мм. Поверхні диска і стрижня шліфують, а потім полірують до шорсткості $R_a = 0,5$ мкм. Безпосередньо перед випробуваннями зразки очищують ультразвуком в середовищі ацетону протягом 2 хвилин для видалення можливих забруднень.

Для забезпечення щільного контакту поверхонь диска і стрижня, пару тертя попередньо припрацьовують за навантаження 800 г і швидкості обертання 60 об/хв. Припрацювання виконують в кілька етапів до повного прилягання дотичних поверхонь, використовуючи абразивний папір з карбідом кремнію із середнім розміром зерна 12 мкм і 4 мкм. Після припрацювання поверхні диска і стрижня обробляють спиртом для видалення продуктів зносу і частинок абразиву.

Величина навантаження становить $P = 0,4 - 0,8$ кг (за діаметра 5 мм, $p_{\text{пит}} = 0,2 - 0,4$ МПа), довжина шляху тертя $L = 680 - 1800$ м, швидкість ковзання $V = 0,5; 1,0; \text{ та } 1,5$ (м/с).

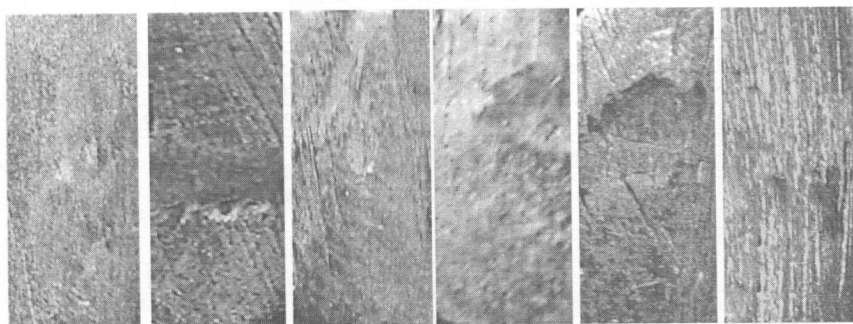
У процесі випробувань фіксують коефіцієнт тертя і вертикальне переміщення пальця. Після завершення випробувань визначають сумарний знос кожної пари тертя і приводять ці значення до 1 км шляху.

В обох методиках основні параметри визначають після завершення пропрацьовування як середньоарифметичне значення від вимірювань, проведених на 5 – 7 зразках.

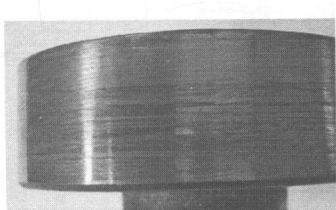
4.7 Зносостійкість високовуглецевих шарів, нанесених методом електродугового наплавлення з використанням вуглецевих волокнистих матеріалів

Поверхні тертя наплавлених високовуглецевих покриттів та контртіла з гартованої сталі 45 після роботи у спряженні на шляху близько 1800 метрів показані на рис. 4.9.

Загальний вигляд, втрату маси та значення твердості зразків, після наплавлення електродним дротом з використанням вуглецевих волокнистих матеріалів та відповідного контртіла, до і після випробувань подано на рис. 4.10 та у табл. 4.9.



а)



б)

Рисунок 4.9 – Загальний вигляд поверхонь пари тертя зразків (а) та контртіла (б) після зношування в умовах сухого тертя

Таблиця 4.9 – Основні параметри пар тертя: високовуглецеве покриття – сталь 45, з різними швидкості наплавлення покриття

Покриття і контртіло	Твердість, HRC	Маса, г		Ваговий знос, г
		до тертя	після тертя	
1	2	3	4	5
швидкість наплавлення 11 м/год				
Зразок 1	50	34,8498	34,8483	0,0013
Зразок 2	52	34,8512	34,8495	
Зразок 3	54	34,8365	34,8358	
Контртіло	54-56	182,6150	180,3210	2,294
швидкість наплавлення 14 м/год				
Зразок 1	52	36,8115	36,8103	0,0011
Зразок 2	53	36,9527	36,9517	
Зразок 3	51	36,8017	36,8006	
Контртіло	54-56	183,9090	181,62	2,289
швидкість наплавлення 17 м/год				
Зразок 1	48	32,4627	32,4612	0,0014
Зразок 2	50	32,2158	32,2141	
Зразок 3	46	32,9035	32,9025	
Контртіло	54-56	182,3260	180,4070	1,919
швидкість наплавлення 20 м/год				
Зразок 1	44	37,1072	37,1054	0,0014
Зразок 2	47	37,5612	37,5597	
Зразок 3	41	36,9873	36,9864	
Контртіло	54-56	185,7921	184,4733	1,3188
швидкість наплавлення 23 м/год				
Зразок 1	44	33,0835	33,0823	0,0015
Зразок 2	45	33,1642	33,1626	
Зразок 3	43	33,5316	33,5299	
Контртіло	54-56	189,6928	188,3895	1,3033
швидкість наплавлення 26 м/год				
Зразок 1	40	34,3149	34,3127	0,0021
Зразок 2	42	34,7359	34,7335	
Зразок 3	38	34,2951	34,2934	
Контртіло	54-56	187,6951	186,3492	1,3459

За зміною втрати маси визначали вагове зношування покриттів Δm , які було отримано за різних швидкостей наплавлення. Як видно з рис. 4.10, вагове зношування високовуглецевих покриттів у випадку шляху тертя

1756 м за середнім значенням змінюється в межах 0,0011–0,0021 г. Однак, втрата маси контртіла змінюється в межах 1,3033–2,294 г. Характер зношування є лінійним, що притаманно композиційним матеріалам (рис. 4.11).

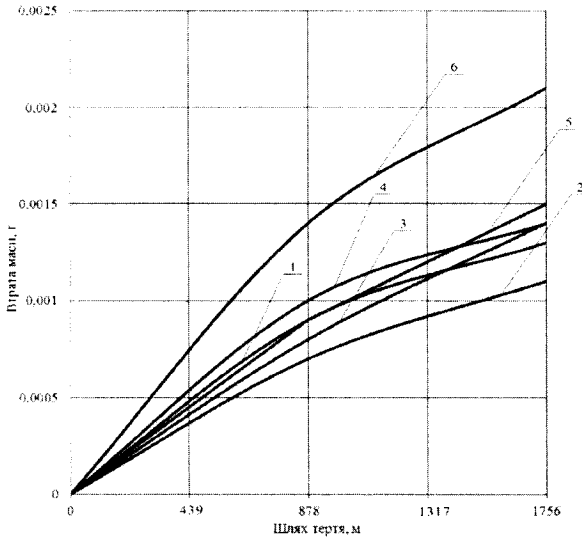


Рисунок 4.10 – Кінетика зношування високочуглецевих покриттів наплавлених на швидкостях: 1) $V_{\text{напл}}=11$ м/год; 2) $V_{\text{напл}}=14$ м/год; 3) $V_{\text{напл}}=17$ м/год; 4) $V_{\text{напл}}=20$ м/год; 5) $V_{\text{напл}}=23$ м/год; 6) $V_{\text{напл}}=26$ м/год

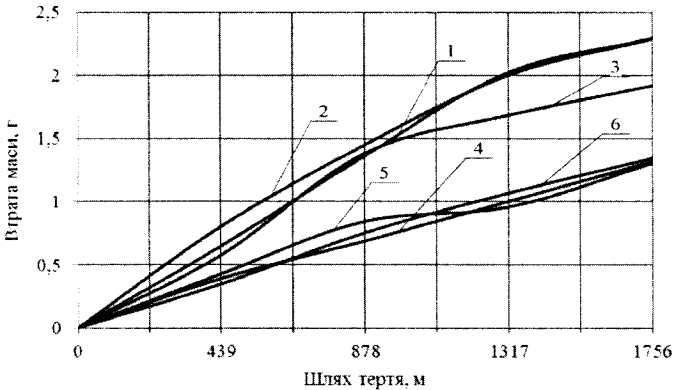


Рисунок 4.11 – Кінетика зношування контртіла зі сталі 45 за таких швидкостей наплавлення: 1) $V_{\text{напл}}=11$ м/год; 2) $V_{\text{напл}}=14$ м/год; 3) $V_{\text{напл}}=17$ м/год; 4) $V_{\text{напл}}=20$ м/год; 5) $V_{\text{напл}}=23$ м/год; 6) $V_{\text{напл}}=26$ м/год

Кількісно зносостійкість поверхні I визначають як величину, обернену ваговому зносу (г^{-1}) [5].

$$I = \Delta m^{-1},$$

де Δm – ваговий знос, г;

I – знос зразка в г^{-1} .

Отримані розрахунки зведено до таблиці 4.10 та показано на діаграмі (рис. 4.12).

Таблиця 4.10 — Зносостійкість високовуглецевого покриття залежно від зміни швидкості його наплавлення

Зносостійкість $\text{H} \times \text{км} / \text{мг}$					
Зразок 1 $V_{\text{напл}}=11$ м/год	Зразок 2 $V_{\text{напл}}=14$ м/год	Зразок 3 $V_{\text{напл}}=17$ м/год	Зразок 4 $V_{\text{напл}}=20$ м/год	Зразок 5 $V_{\text{напл}}=23$ м/год	Зразок 6 $V_{\text{напл}}=26$ м/год
769,2	909,1	714,3	714,3	666,7	476,2

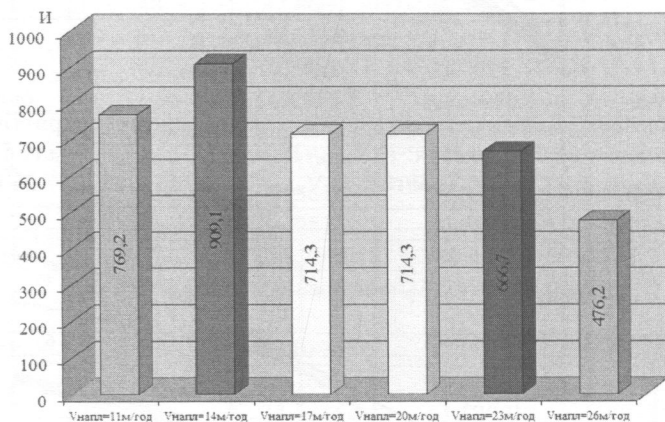


Рисунок 4.12 – Зносостійкість високовуглецевого покриття за зміни швидкості наплавлення

4.8 Статистична залежність «зносостійкість - твердість» високовуглецевого покриття за вибіркою експериментальних даних

Досліджується залежність масового зносу наплавлених високовуглецевих зразків від твердості після зміни швидкості наплавлення. Твердість визначалася на приладі Роквелла, зношування – в умовах ковзання зразка по

поверхні індентора, виготовленого з матеріалу сталь 45, загартованого та відпущеного. Величину зносу визначали за втратою маси зразка зважуванням на аналітичних вагах. Як значення твердості і зносу бралось середнє арифметичне трьох вимірювань. Отримано такі пари значень (HRC, Δm) (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 – Вихідні дані

№ зразка	Швидкість наплавлення, м/год	Твердість, HRC (X)	Знос Δm , г	Зносостійкість, $г^{-1}$ (Y)
1	11	54	0,0007	1428,57
2	11	50	0,0017	588,24
3	11	52	0,0015	666,66
4	14	53	0,0012	833,33
5	14	52	0,0010	1000
6	14	51	0,0011	909,09
7	17	46	0,0015	666,66
8	17	48	0,0017	588,23
9	17	50	0,0010	1000
10	20	47	0,0018	555,5
11	20	44	0,0015	666,66
12	20	41	0,0009	1111,11
13	23	45	0,0012	833,33
14	23	44	0,0016	625
15	23	43	0,0017	588,23
16	26	40	0,0022	476,2
17	26	38	0,0024	416,66
18	26	42	0,0017	588,23

Завдання регресійного аналізу полягають в:

1. Отримати рівняння регресії $I = I(\text{HRC})$ для кожного зразка і для всієї вибірки ($n = 18$).
2. Перевірити наявність кореляційного зв'язку $I = I(\text{HRC})$ в кожному випадку.
3. Проаналізувати отримані результати.

4.8.1 Розрахунок характеристик вибірки

1. Середнє арифметичне вимірювання X

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i; \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (4.2)$$

2. Емпірична дисперсія S^2 (середнє квадратичне відхилення)

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n} \right]$$

$$S_Y^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n} \right]$$
(4.3)

3. Емпіричне стандартне відхилення

$$S = \sqrt{S^2}$$

4. Емпірична коваріантність

$$S_{XY} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})$$
(4.4)

5. Коефіцієнт кореляції

$$r_{XY} = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_X^2 \cdot S_Y^2}}$$
(4.5)

6. Коефіцієнти лінійної регресії

$$b = \frac{S_{XY}}{S_X^2} ; a = \bar{Y} - b\bar{X}$$
(4.6)

7. Під час роботи з малими вибірками ($n < 30$) необхідно визначити наявність кореляційного зв'язку між вимірними величинами X_i , Y_i зі співвідношення

$$r_{XY} \geq r_{XY \min}$$
(4.7)

Рівняння регресії має вигляд

$$Y = a + bX$$

Таблиця 4.12 – Розрахункова таблиця для побудови статистичної моделі

I	X _i	Y _i	(X _i) ²	(Y _i) ²	X _i Y _i
1	54	1428,57	2916	2040812,245	77142,78
2	50	588,24	2500	346026,2976	29412
3	52	666,66	2704	444435,5556	34666,32
4	53	833,33	2809	694438,8889	44166,49
5	52	1000	2704	1000000	52000
6	51	909,09	2601	826444,6281	46363,59
7	46	666,66	2116	444435,5556	30666,36
8	48	588,23	2304	346014,5329	28235,04
9	50	1000	2500	1000000	50000
10	47	555,5	2209	308580,25	26108,5
11	44	666,66	1936	444435,5556	29333,04
12	41	1111,11	1681	1234565,432	45555,51
13	45	833,33	2025	694438,8889	37499,85
14	44	625	1936	390625	27500
15	43	588,23	1849	346014,5329	25293,89
16	40	476,2	1600	226766,44	19048
17	38	416,66	1444	173605,5556	15833,08
18	42	588,23	1764	346014,5329	24705,66
Сума	840	13541,7	39598	11 307 653,89	643530,1

Розрахунок ведеться за формулами 4.2 – 4.7.

Таблиця 4.13 – Результат розрахунку

Вибірка	Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції
Зразок 1 (3 точки)	$Y = -10029,8 + 210,082X$	0,905
Зразок 2 (3 точки)	$Y = 2883,9 - 37,88X$	-0,454
Зразок 3 (3 точки)	$Y = -3249,08 + 83,335X$	0,763
Зразок 4 (3 точки)	$Y = 4852,232 - 92,602X$	-0,945
Зразок 5 (3 точки)	$Y = -4710,01 + 122,55X$	0,927
Зразок 6 (3 точки)	$Y = -1221,9 + 42,89X$	0,985
Всі зразки (18 точок)	$Y = -601,883 + 29,019X$	0,547

Для всієї вибірки рівняння регресії має вигляд

$$Y = -601,883 + 29,019X. \quad (4.8)$$

Коефіцієнт кореляції

$$r_{xy} = 0,547$$

Перевіримо наявність кореляційного зв'язку для вибірки даних по всіх зразках. Визначимо допустиме значення коефіцієнта кореляції.

Для $n=18$ та $\alpha=0,90$ маємо коефіцієнт Стьюдента $t=1,717$

$$r_{XY \min} = \sqrt{\frac{t_{\alpha, n}}{t_{\alpha, n} + n - 2}}$$

$$r_{xy \min} = \sqrt{\frac{1,717}{1,717 + 18 - 2}} = 0,3113$$

Умова (4.7) виконується.

4.8.2 Побудова рядів зносостійкості наплавлених зразків. Виконаємо ранжування зразків за зносостійкістю з використанням експериментальних даних (таблиця 4.11). З метою проведення аналізу пропонуємо залежностей, розрахунок зносостійкості виконуємо за рівнянням регресії (4.8). Результати вносимо в табл. 4.14.

Таблиця 4.14 – Експериментальний I_E і розрахунковий I_P ряди зносостійкості

Швидкість наплавлення, м/год	I_E	I_P
11	1428,57	965,143
11	588,24	849,067
11	666,66	907,105
14	833,33	936,124
14	1000	907,105
14	909,09	878,086
17	666,66	732,991
17	588,23	791,029
17	1000	849,067
20	555,5	762,01
20	666,66	674,953
20	1111,11	587,896
23	833,33	703,972

Продовження таблиці 4.14

Швидкість наплавлення, м/год	I_E	I_p
23	625	674,953
23	588,23	645,934
26	476,2	558,877
26	416,66	500,839
26	588,23	616,915

За отриманими результатами будують відповідні графіки або діаграми для спрощення аналізу впливу різних факторів на зносостійкість наплавлених зразків, визначену експериментально (за I_E) та розрахунково (за I_p). За отриманими результатами визначають оптимальні режими нанесення покриття.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ МЕТАЛОКАРБІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКЗОТЕРМІЧНИХ СУМІШЕЙ

5.1 Обґрунтування основних методів дослідження

Проведений теоретичний аналіз синтезу металокарбідних матеріалів в екзотермічних сумішах виявив вплив параметрів вихідної системи та термодинамічних умов на ймовірність утворення фаз та їх кількісне співвідношення. Кількісне визначення ступеня цього впливу і розробка методів формування покриттів потребували проведення серії експериментів:

- дослідження закономірностей процесів синтезу композиційних матеріалів в екзотермічних порошкових та порошково-волокнистих сумішах на основі тугоплавких металів та вуглецю;

- розробка складу сумішей для одержання матеріалів з гетерогенною структурою, які містять тверді та м'які структурні складові;

- дослідження характеру і ступеня впливу характеристик вихідних інгредієнтів, складу суміші, її щільності, температури зовнішнього підігріву та кінетики процесу на структуру матеріалів та їх антифрикційні властивості;

- розробка технології синтезу металокарбідних матеріалів.

Для отримання необхідної інформації про властивості вихідної суміші і її компонентів та одержуваних дослідних зразків необхідно використати такі методи аналізу;

- визначення екзотермічного ефекту під час проходження в досліджуваних порошкових сумішах процесів синтезу металокарбідних матеріалів методом їх термічного аналізу з використанням електронагріву;
- металографічний та мікродюрOMETричний методи визначення структури сформованих покриттів та властивостей окремих складових;
- рентгенофазовий метод визначення складу матеріалів;
- випробовування зразків на зносостійкість.

Фактори, вплив яких на процеси синтезу досліджувався, було обрано на основі теоретичного аналізу.

Дисперсність порошків

Процеси, що відбуваються в суміші, є гетерогенними, їх перша стадія відбувається на поверхні порошкових та волокнистих компонентів і механізм та кінетика такої реакції залежать від загальної площі поверхні та її властивостей.

Поверхнева енергія порошків

Ця характеристика також залежить від багатьох факторів: дисперсності, поверхневого натягу, дефектності поверхні, форми та морфології порошків. Її можна значно підвищити шляхом попередньої обробки – поверхневої активації порошків. Тому її можна задавати як величину, таку як підвищення реакційної активності порошків після певної попередньої обробки.

Щільність суміші

Цей фактор відзначається як впливовий у численних роботах, але підкреслюється, що характер його дещо суперечливий. Для сумішей існують певні оптимальні значення, у разі виходу за їх межі швидкість процесів спадає. Це іноді пояснюють існуванням оптимальних умов руху газів, які виділяються в процесі горіння і забезпечують високу теплопровідність у системі. Проведений теоретичний аналіз показав, що щільність порошкової суміші в умовах експерименту визначає кількість газової фази та вуглецевий потенціал газової фази і напрямок основних процесів навугльцювання металевих компонентів системи.

Температура зовнішнього підігрівання

За попередніми розрахунками вона становить для сумішей на основі хрому 900 – 1100 °С.

5.2 Методика та результати визначення характеристик порошкових компонентів

Гранулометричний аналіз порошків та виявлення їх структури і морфології проводились методами кількісної металографії.

Кількісне вимірювання порошків та аналіз їх розподілу за розмірами виконувались згідно з ГОСТ 23402-78, визначення форми порошкових частинок – згідно з ГОСТ 25849-83. Питома поверхня визначалася

методами лінійного аналізу і статистичної обробки результатів по металографічних шліфах.

Таблиця 5.1 – Характеристики порошкових компонентів

Характеристики порошків	Порошки				
	Cr	W	Mo	V	C(сажа)
Насипна щільність, г/см ³	3,57	4,1	2,86	2,7	0,15
Гранулометричний склад: $d_{сер}$, мкм:					
300 - 400	-	-	-	23	-
200 - 300	5	-	50	7	-
100 - 200	60	-	40	40	-
50 - 100	25	-	10	10	-
20 - 50	10	-	-	9	-
5 - 20	8	-	-	5	-
1 - 5	1,5	60	-	1	-
< 1,0	0,5	40	-	5	100
Чистота порошків, %	98,5	99,0	96,0	97,5	не визн.
Питома поверхня, м ² /г	0,008	0,04	0,005	0,007	~ 10,0
Структура і морфологія	Кристали компактної форми	Кристали геометрично правильної форми	Кристали з нерозвиненою пористістю	Полікристали з розвиненою відкритою пористістю	Сферичні частинки

5.3 Методика проведення термічного аналізу зразків порошкових сумішей

Термічний аналіз сумішей проводився на установці, принципова схема якої наведена на рис. 5.1. Зразки сумішей запресовувались до сталевій оболонки і по ній пропускався змінний електричний струм постійної величини. Температура контролювалася платино - платинородієвою термопарою, яка приварювалася до сталевій оболонки, і фіксувалася на термограмі. Після нагріву до температури близько 1100 °С та ізотермічної витримки 1...5 хвилин на термограмі з'являється екзотермічний пік – підвищення температури на 80 – 400 °С, що свідчить про проходження екзотермічної реакції.

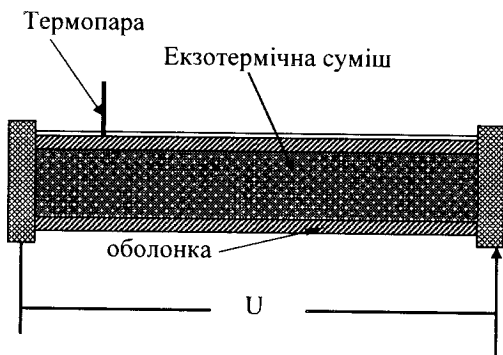


Рисунок 5.1 – Схема установки для синтезу металокарбідного матеріалу з електричним підігрівом та проведення термічних досліджень

Проводились дослідження режиму та механізму реакцій між карбідотворюючими матеріалами Cr, V, W та вуглецем у різних формах. Сумішми з Me та C (порошок, волокно) заповняли сталеві оболонки під певним тиском так, що щільність їх варіювалася від 0,4 до 0,7. Кінці оболонок також запресовувались або залишались вільними для витікання газів. Склади сумішей та умови експерименту:

№ 1. Cr+C:

а) 0,95:0,05 (масовий склад);

б) щільність суміші 3,45 г/см³ за теоретичної 6,32 г/см³;

в) пористість 0,45;

г) зусилля запресовування – 50 000 кг;

д) міжфазна поверхня – 0,0035 м²/г;

е) поверхня металевих частинок, що межують з поровим простором – 0,0027 м²/г;

Час нагріву: \uparrow 4,6 – \rightarrow 20,0 – \downarrow 19,0 (нагрів – ізотермічна витримка – охолодження). Швидкість нагріву до 1100 °C – 240 °C/хв.

№2. Cr+C:

а) 0,90-0,10; б) 2,96/5,18; в) 0,5; г) 50 000 кг; д) 0,0026 м²/г; е) 0,002.

Час нагріву 4,6-20,5-13,3 за швидкості нагріву до 1100 °C – 240 °C/хв.

№3. Cr+C:

а) 0,85-0,15; б) 2,4/5,14; в) 0,53; г) 50 000 кг; д) 0,0022; е) 0,0015.

Час нагріву 5,0-22-14 – за швидкості нагріву до 1100 °C – 240 °C/хв.

№4. Cr+C:

а) 0,80-0,20; б) 2,06/4,7; в) 0,56; г) 50 000 кг; д) 0,0018; е) 0,0012.

Час нагріву 4,5-20,0-13 за швидкості нагріву до 1100 °С – 240 °С/хв.

№5. Cr+C:

а) 0,95-0,05; б) 2,86/6,32; в) 0,55; г) 10 000 кг; д) 0,0035; е) 0,0027.

Час нагріву 4,5-21,00-12,5 за швидкості нагріву до 1100 °С – 240 °С/хв.

№6. Cr+C:

а) 0,90-0,10; б) 2,4/5,88; в) 0,58; г) 10 000 кг; д) 0,0026; е) 0,002.

Час нагріву 4,5-21,0-14,0 за швидкості нагріву до 1100 °С – 240 °С/хв.

№7. Cr+C:

а) 0,85-0,15; б) 2,07/5,14; в) 0,6; г) 10 000 кг; д) 0,0022; е) 0,0015.

Час нагріву 4,5-20,0-13,0 за швидкості нагріву до 1100 °С – 240 °С/хв.

№8. Cr+C:

а) 0,8-0,2; б) 1,7/4,7; в) 0,64; г) 10 000 кг; д) 0,0018; е) 0,0012.

Час нагріву 4,5-20,0-12,8 за швидкості нагріву до 1100 °С – 240 °С/хв.

№9. Cr+W+C:

Час нагріву 4,5-20,0-13,2 за швидкості нагріву до 1200 °С – 240 °С/хв.

5.4 Результати досліджень результатів екзотермічних процесів

Характер впливу основних факторів на структуру матеріалів, синтезованих в екзотермічних сумішах

Одержані структури було проаналізовано металографічним та рентгенофазовим методами.

Експериментальні дані показують, що у системі можливі 2 процеси.

Перший – утворення карбідів хрому, що супроводжується екзотермічним ефектом і утворенням рідкої фази, склад якої – Cr і карбід хрому, яка з'являється як результат оплавлення частинок хрому, які поступово розчиняються в ній. Такий процес проходить за температур ≈ 1100 °С. Розрахунками показано його можливість за температур, більших 1000 °С, але ця розбіжність є наслідком складнощів, з якими пов'язані теплові розрахунки, що містять, як складову, тепловитрати. Залізна оболонка не науглецьована, а покрита розплавленою карбідомісткою фазою по всій внутрішній поверхні товщиною до 0,01 мм. Такий процес визначає мікроструктуру у сумішах 1-6.

Конкуруючий процес – науглецьовування сталеві оболонки. Він частково проходить у сумішах 7-8. У суміші 9, де щільність найбільша (0,7), а нагрів відбувається до температури 1200 °С, мікроструктура одержаного сплаву являє собою доевтектичний білий чавун, цементит у якому легований хромом.

Таблиця 5.2 – Характеристики одержаних структур

№ суміші	Екзотермічний тепловий ефект	Фазовий склад сплаву	Характеристика мікроструктури	Супутні ефекти
1	+40	$Cr+Cr_7C_3$	Частинки Cr, що спеклись між собою за рахунок оплавлення і появи рідкої фази	Під час нагріву оболонка збільшилась в об'ємі на 5%
2	+80	$Cr+Cr_7C_3$	Частинки Cr оточені оболонкою з карбідної евтектики товщиною 0,1-0,4 мм	Збільшення об'єму оболонки на 15%. Внутрішня поверхня оболонки покрита рідкою фазою на базі Cr
3	+80°	$Cr+Cr_7C_3$	Спечений сплав на основі $Cr+Cr_7C_3$. Спечення за участю рідкої фази. Окремі ділянки мають повністю литу структуру	Під час нагріву оболонка збільшилась в об'ємі на 15%
4	+100°	$Cr+Cr_7C_3$	Те саме	Під час нагріву оболонка збільшилась в об'ємі на 17%
5	+115°	$Cr+Cr_7C_3$	Спечений сплав з частинок Cr, оплавлених з утворенням рідкої фази	Те саме
6	+60	$Cr+Cr_7C_3$	Те саме	Те саме
7	+130°	$(Cr+Fe) + Cr_7C_3$	Напівлита структура з карбідів, металу з нерозчинними частинками порошку	На 10-й хвилині відбувається розплавлення оболонки на одній ділянці
8	+280°	$Fe+Cr + Cr_7C_3$	Те саме	Розплавлення на 5 хвилині
9	+300°	$(Fe, Cr)C$ – легований хромом ледебурит	Легований хромом білий чавун	Розплавлення через 8 хвилині

Карбідів хрому у ньому не виявлено. Навуглецьовування заліза в цій суміші відбулося до утворення евтектики Fe-C і евтектичного плавлення.

Ці самі суміші були піддані пічному нагріванню. Зразки з сумішами поміщалися у камерну піч за температур 800, 900, 1000, 1100, 1200 °С, на-

грівалися разом з піччю до температури 900–1200 °С та ізотермічно витримувалися протягом 1,5–2,0 год. У всіх випадках у разі нагріву з $T = 800$ –900 °С відбулося окислення хромового порошку і відновлювальні процеси не встигли пройти. За нагрівання з 900 °С до 1000–1100 °С хромовий порошок не прореагував, але й не був окислений. За нагрівання з 1000 до 1100 °С одержані структури аналогічні вище описаним. За нагрівання до 1200 °С спостерігається утворення залізо-хромової матриці, кількість якої залежить від пористості. За пористості 30–50% карбідний каркас оточений матрицею типу ферохрому з різним вмістом Fe та Cr. Типову структуру наведено на рис. 5.2. Такі експерименти проводились для 3-х форм вуглецю: графіту, активованого вуглецю, ВВМ. Час обробки – 0,5 год. Визначалася частка металевого порошку, який не прореагував і на цій підставі – активність джерела вуглецю як постачальника окису вуглецю CO. За цією ознакою їх було оцінено таким чином: ВВМ→графіт→активований вуглець.

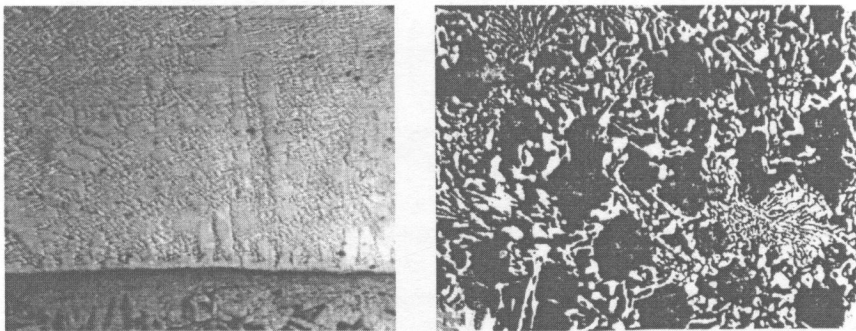


Рисунок 5.2 – Типова структура металокарбідного покриття

На підставі проведених експериментів було зроблено висновок, що можливі 2 режими проходження реакції – твердофазний і газозфазний, але процес переважно зі стадією науглецювання металів через газову фазу з переходом до евтектичного плану. Про це свідчить, насамперед, характер залежності швидкості процесу від факторів, що визначають об'єм і науглецювальну спроможність газової фази – пористості, тиску, фракційного складу, форми вуглецю. Кількість вуглецю є в такому випадку тим фактором, що впливає на пористість. За вуглецевого потенціалу газової фази, близької до рівноваги, відбувається активне науглецювання залізної підкладки з утворенням цементованого шару, а за високих температур і μ_e – ледебуриту, а у разі $T > 1147$ °С відбувається евтектичне плавлення. Твердофазний режим у системі реалізується в умовах безпосереднього контакту частинок компонентів, але далі, як про

це свідчать численні роботи, дифузія вуглецю іде по поверхні металевих частинок, утворюючи поверхневий науглецьований шар. Отже, обидва режими реакцій приводять до однакових результатів. Утворення однакового ледобуриту, навпаки, є конкуруючим процесом, тому що йде з поглинанням тепла, знижує температуру суміші і затримує екзотермічну реакцію карбідоутворення. Її результатом є утворення легovanого ледобуриту. Для перевірки цієї моделі було проведено експериментальні роботи з використанням шаруватих композицій Me-C, що накладалися на поверхню сталеві пластини. Нагрів здійснювався за температури $t = 1250$ °C. Результати, які одержано, показують, що для утворення структури типу карбід – евтектика необхідно організувати процес взаємодії так, щоб на першій стадії переважно здійснювалася екзотермічна реакція карбідоутворення.

6 СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ

6.1 Дослідження поверхні на електронному мікроскопі

Використання світлових мікроскопів не дозволяє отримувати достатнє збільшення, яке необхідне для спостереження за будовою поверхневого шару матеріалу або нанесеного покриття. Як правило, на дуже якісних світлових мікроскопах дуже проблематично зафіксувати зображення зі збільшенням вище 1000. Цього часто буває недостатньо для аналізу тонких покриттів, плівок, будови монокристалів. Крім того, використання електронно-променевих мікроскопів дозволяє у низці випадків разом зі світлиною вибраної ділянки поверхні у вказаній експериментатором точці точно визначити її хімічний склад.

За умов великого збільшення поверхні ми можемо також спостерігати її еволюцію під впливом навантажень чи теплового впливу. Цікаво також вивчати рух дислокацій у матеріалах під впливом поля напружень.

На рисунках 6.1 та 6.2 наведено цифрові зображення покриття, нанесеного методами електронно-променевого випаровування та осадження. Потрібно звернути увагу на те, що на рис. 6.2 збільшення в 2 рази більше, ніж на рис. 6.1. Вивчення зображень дозволяє отримати низку цікавих результатів. По-перше, що впадає в очі, це куляста форма всіх структурних складових поверхні. Очевидно, що така форма є найбільш вигідною для формування окремих кристалів на зародках, які спонтанно виникають на поверхні. По-друге, куляста форма кристалів забезпечує утворення різних пор, оскільки їх зарощування не завжди можливе.

Цей ряд висновків можна продовжити спостереженнями за межами між кристалами, розкидом їхніх розмірів тощо. Не менш цікавою є інформація про хімічний склад окремих зерен та його однорідність. Точки спостережень за хімічним складом показано на рис. 6.1 (S01...S14).

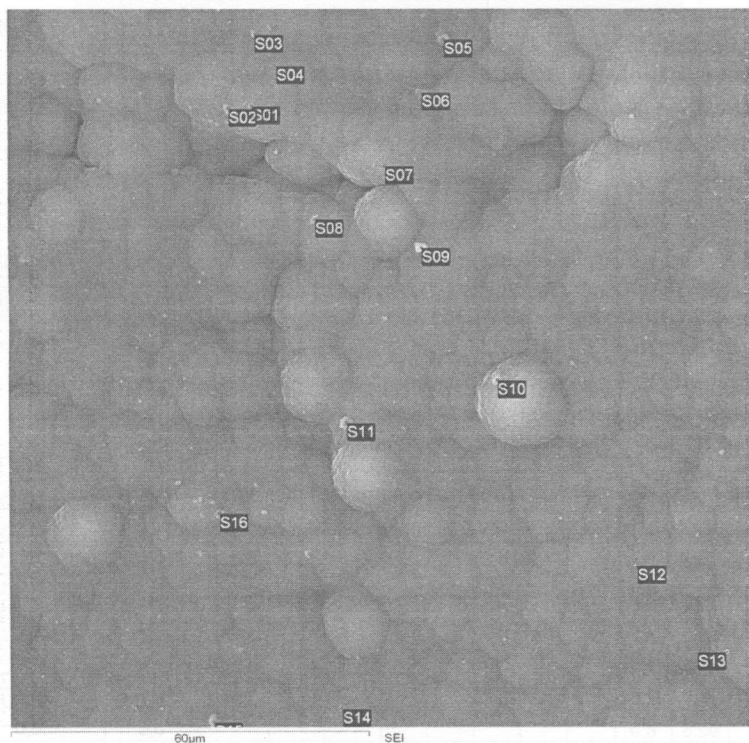


Рисунок 6.1 – Фотографія поверхні нанесеного покриття методом електронно-променевого випаровування та осадження

В таблицях 6.1 та 6.2 подано для цих точок хімічні склади вуглецевого покриття, отриманого випаровуванням вуглецю з-під рідкої вольфрамової ванни. Забруднення покриття вольфрамом та залізом вказує на необхідність керування процесами очищення парового потоку та його осадження на підкладку.

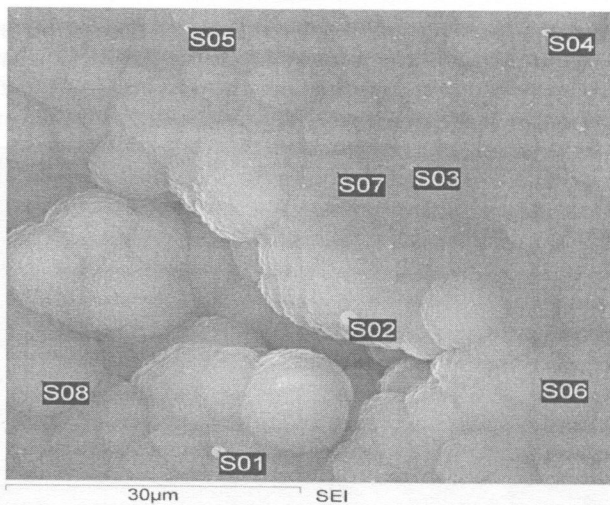


Рисунок 6.2 – Фотографія поверхні нанесеного покриття методом електронно-променевого випаровування та осадження (електронно-променевий мікроскоп)

Таблиця 6.1 – Склад вуглецевого покриття в атомних відсотках

Sample: C+W No4												
All results in atomic%												
Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ni	Zr	W	Total
S01	90,3	9,3									0,4	100,0
S02	90,0	9,5									0,5	100,0
S03	92,5	6,9									0,6	100,0
S04	90,3	8,9									0,8	100,0
S05	62,7	33,8	0,1	0,2	2,5	0,1	0,1	0,1			0,4	100,0
S06	91,1	8,2									0,6	99,9
S07	80,0	18,6						1,1			0,4	100,1
S08	89,5	9,9									0,6	100,0
S09	80,7	14,4						4,4			0,4	99,9
S10	91,8	7,7									0,5	100,0
S11	91,8	7,8									0,4	100,0
S12	79,4	19,1							0,5	0,6	0,4	100,0
S13	72,1	25,9						1,6			0,4	100,0
S14	90,5	8,6									0,9	100,0
S15	89,4	10,0									0,6	100,0
S16	91,6	7,8									0,6	100,0

Таблиця 6.2 – Склад вуглецевого покриття у вагових відсотках

Sample: C+W No4												
All results in weight%												
Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ni	Zr	W	Total
S01	82,5	11,3									6,2	100,0
S02	81,5	11,5									7,0	100,0
S03	83,4	8,3									8,3	100,0
S04	79,1	10,3									10,6	100,0
S05	51,8	37,2	0,2	0,4	4,8	0,2	0,3	0,2			4,9	100,0
S06	81,6	9,8									8,6	100,0
S07	69,5	21,6						4,3			4,7	100,1
S08	80,5	11,9									7,6	100,0
S09	63,7	15,1						16,3			4,9	100,0
S10	84,2	9,4									6,4	100,0
S11	84,5	9,5									6,0	100,0
S12	67,6	21,6							2,0	4,0	4,8	100,0
S13	60,2	28,9						6,3			4,6	100,0
S14	78,3	9,9									11,8	100,0
S15	79,9	11,9									8,2	100,0
S16	82,7	9,4									7,9	100,0

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савуляк В. І. Побудова та аналіз моделей металевих сплавів / В. І. Савуляк, А. О. Жуков, Г. О. Чорна. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 200 с.
2. Савуляк В. І. Синтез зносостійких композиційних матеріалів та поверхневих шарів з екзотермічних компонентів / В. І. Савуляк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 160 с.
3. Жуков А. А. Расчет химической спинодали в системе аустенит-цементит и некоторые практические приложения / А. О. Жуков, В. И. Савуляк, Р. Л. Снежной, Т. Ф. Архіпова // Доклады РАН. Серия «Металлы». – № 5. – 1998.
4. Жуков А. А. О влиянии элементов на равновесные температуры эвтектических превращений / А. А. Жуков, В. И. Савуляк, Т. Ф. Архіпова // Металловедение и термическая обработка металлов. – № 2. – 2000.
5. Савуляк В. І. Деякі питання термодинаміки систем Fe-C-і, де і – третій сильно ліквуючий компонент / В. І. Савуляк // Вісник технічного університету «Поділля». – № 1. – 2001.
6. Жуков А. А. Об образовании карбина (цианополиина) и алмаза в Fe-C сплавах / А. О. Жуков, В. И. Савуляк // Металловедение и термическая обработка металлов. – № 3. – 2001.
7. Савуляк В. І. Термодинаміка синтезу композиційних матеріалів на основі тугоплавких металів / В. І. Савуляк, Г. О. Чорна // Вісник Сумського державного університету. – № 9. – 2002. – С. 83-87.
8. Савуляк В. І. Термодинаміка утворення сполук під час легування розплаву системи Fe-Cr-Ni-Si-C-O манганом / В. І. Савуляк, О. В. Поступайло, О. В. Шаповалова // «Наукові нотатки» : міжвузівський збірник. – Луцьк. – 2015. – Вип. 50. – С. 194-198.
9. Савуляк В. І. Економічні технології високоміцних графітізованих сплавів заліза / В. І. Савуляк, О. Б. Янченко. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 160 с.
10. Савуляк В. І. Наплавлення високовуглецевих зносостійких покриттів / В. І. Савуляк, В. Й. Шенфельд. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 124 с.
11. Савуляк В. І. Ремонт та локальне зміцнення рам транспортних машин : монографія / В. І. Савуляк, Д. В. Бакалець. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 122 с.

12. Кузнецов Ю. М. Прогнозування розвитку технічних систем / Ю. М. Кузнецов, Р. А. Склярів. – Київ-Тернопіль : ТОВ «ЗМОК», 2004. – 323 с.
13. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки : підручник / Струтинський В. Б. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 612 с.
14. Радченко С. Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / Радченко С. Г. – К. : ЗАО Укрспецмонтажпроект, 1998. – 258 с.
15. Кузнецов Ю. М. Теорія технічних систем : навчальний посібник / Ю. М. Кузнецов, І. В. Луців, С. А. Дубиняк. – Тернопіль : ТДТУ, 1997. – 624 с.
16. Голубенко А. Л. Теория технических систем : учебное пособие / А. Л. Голубенко, А. С. Петров, А. Л. Кашура. – К. : Аристей, 2005. – 240 с.
17. Бялік О. М. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія : підручник / О. М. Бялік, С. Є. Кондратюк, М. В. Кіндрачук, В. С. Черненко. – К. : ВПІ ВПК «Політехніка», 2006. – 328 с.
18. ДСТУ ISO 6508-1:2013 Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T). Держстандарт України, 2014.
19. Гуляев А. Имитационное моделирование в среде Windows / Гуляев А. – С-Пб. : КОРОНАпринт, 1999. – 288 с.
20. Ермаков С. М. Математическая теория оптимального эксперимента / С. М. Ермаков, А. А. Жиглявский. – М. : Наука, 1987. – 320 с.
21. Геллер Ю. А. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1989. – 456 с.
22. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 11 с.
23. ГОСТ 23273-78. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка. – М. : Издательство стандартов, 1978. – 11 с.
24. ГОСТ 10708-82. Копры маятниковые. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1982. – 6 с.

25. ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 24 с.
26. ДСТУ 2444-94. Розрахунки та випробування на міцність. Опір втомі. Терміни та визначення. – К. : Держстандарт України, 1994. – 70 с.
27. ДСТУ 2631-94 (ГОСТ 380-94). Сталь вуглецева звичайної якості. Марки. – К. : Держстандарт України, 1994. – 9 с.
28. ДСТУ 2651 – 2005. Режим доступу <http://dstu-biblio.3dn.ru/load/1-1-0-16>
29. Гурвич А. К. Ультразвуковой контроль сварочных швов / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов. – Киев : Техника, 1972. – 460 с.
30. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / Ермолов И. Н. – М. : Машиностроение, 1981. – 240 с.
31. Ващенко О. П. Методичні основи та результати експериментальних досліджень опору конструкційних матеріалів високошвидкісної деформації за різних напружених станів : навчальний посібник / Ващенко О. П. – Київ : УТУ, 1999. – 52 с.
32. Новицкий П. Г. Оценка погрешностей результатов измерений / Новицкий П. Г. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
33. Рого К. Т. Метрологічна обробка результатів технічних вимірювань : довідковий посібник / Рого К. Т. – К. : Техніка, 1997. – 28 с.
34. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология : учебник для вузов / Шишкин И. Ф. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 492 с.
35. Костенко О. М. Методологія оптимального планування експериментів при дослідженні технологічних процесів, пристроїв і систем / О. М. Костенко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 1 (29). – 2011. – ПолтНТУ. – С. 57 – 60.

Навчальне видання

Валерій Іванович Савуляк

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ,
СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ**

Навчальний посібник

Рукопис оформлено *В. Савуляком*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет виготовлено *О. Кушнір*

Підписано до друку 26.11.2021 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 4,38
Наклад 50 (1-й запуск 1–21) пр. Зам. № 2021-126.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.

ВНТУ, ГНК, к 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.

press.vntu.edu.ua,
E-mail: kive.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.