

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет машинобудування та транспорту
(повне найменування інституту, назва факультету(відділення))

Кафедра галузевого машинобудування
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Дослідження триботехнічних можливостей комбінованих покриттів з вуглецевісними наповнювачами»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ІГМ-22М
спеціальності 133 – Галузеве машинобудування
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Назарук Я. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д. т. н., доцент кафедри ГМ

Сивак Р. І.
(прізвище та ініціали)

« » _____ 2023 р.

Опонент: к. т. н., ст. викладач кафедри АТМ

Борисюк Д. В.
(прізвище та ініціали)

« » _____ 2023 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ГМ

д. т. н., проф. Поліщук Л. К.
(прізвище та ініціали)

« 12 » з грудня 2023 р.

Вінниця ВНТУ – 2023 р.

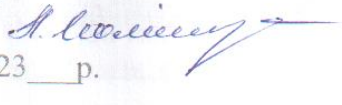
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра галузевого машинобудування
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 13 Механічна інженерія
Спеціальність – 133 – Галузеве машинобудування
Освітньо-професійна програма – Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

Леонід ПОЛИЩУК

« 18 » вересня 2023 р.



ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Ярославу НАЗРУКУ

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Дослідження триботехнічних можливостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами».

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи: д. т. н., доц. Роман СИВАК, затверджені наказом №247 від «18» вересня 2023 р.

2. Строк подання студентом магістерської кваліфікаційної роботи: 11.12. 2023р.

3. Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: 1) тип покриття – 40X13; 2) горюча суміш – ацетилен, кисень; 3) відстань – 150 мм; 4) товщина шару - 1,0-1,2 мм; 5) струм нагрівання – 3,5 кА; 6) тиск – 20 МПа; 7) час нагрівання – 8-10 с; 8) час імпульсів (пауз) – 0,02-0,04 с.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):


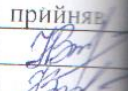
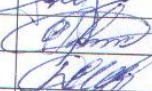




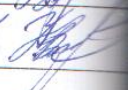
1) вступ; 2) стан та основні шляхи створення зносостійких напилених покриттів; 3) триботехнічні властивості комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами; 4) матеріали, обладнання та методика; 5) спосіб створення зносостійких сталевих покриттів газотермічним напиленням і електроконтактною обробкою з використанням вуглезмісних наповнювачів; 6) охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; 7) економічна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1) Основні види зношування та поверхнєвого руйнування деталей, вибір матеріалів для зносостійких покриттів, вибір методів створення покриттів (пл. ф.А1); 2) дослідження триботехнічних властивостей газотермічних покриттів з вуглецевмісними наповнювачами (пл. ф.А1); 3) випробування на тертя та зношування, методика досліджень в умовах абразивного зношування (пл. ф.А1); 4) загальна методика дослідження, вибір матеріалів для досліджень, застосовуване технологічне обладнання (пл. ф.А1); 5) дослідження мікроструктури та фазового складу, методика дослідження пористості покриттів (пл. ф.А1); 6) методика визначення міцності зчеплення покриттів, обробки даних результатів досліджень (пл. ф.А1); 7) схема нанесення зносостійкого газотермічного покриття та технологічні методи його формування, вибір режимів газополуменевого напилення (пл. ф.А1); 8) електродугове напилення, особливості електроконтактної обробки (пл. ф.А1); 9)


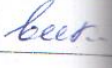


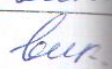
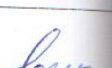
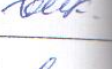
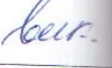




математичне моделювання процесу електроконтактної обробки газотермічних покриттів (ф.А1).

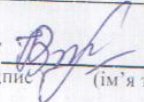
6. Консультанти розділів магістерської кваліфікаційної роботи


| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|----------------------------------|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Основний | д. т. н., доц. Роман СИВАК |  |  |
| Економічний | к. т. н., доц. Ольга РАТУШНЯК |  |  |
| Охорона праці | д. п. н., проф. Софія ДЕМБІЦЬКА |  |  |
| Безпека в надзвичайних ситуаціях | д. т. н., проф. Олег БЕРЕЗЮК |  |  |

7. Дата видачі завдання 15.09.2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| /п | Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів МКР | Примітки |
|----|---|----------------------------|---|
| 1 | Вступ | 29.09.2023 р. |  |
| 2 | Стан та основні шляхи створення зносостійких напилених покриттів | 15.10.2023 р. |  |
| 3 | Дослідження триботехнічних властивостей газотермічних покриттів з вуглецевмісними наповнювачами після їх електроконтактної обробки | 2.11.2023 р. |  |
| 4 | Випробування на тертя та зношування, методика досліджень в умовах абразивного зношування | 9.11.2023 р. |  |
| 5 | Загальна методика дослідження, вибір матеріалів для досліджень, застосовуване технологічне обладнання | 15.11.2023 р. |  |
| 6 | Дослідження мікроструктури та фазового складу сталей мартенситного та феритного класів після електроконтактної обробки | 19.11.2023 р. |  |
| 7 | Методика визначення міцності зчеплення покриттів, методи математичного планування експерименту та обробки статистичних даних результатів досліджень | 22.11.2023 р. |  |
| 8 | Схема нанесення зносостійкого газотермічного покриття та технологічні методи його формування, вибір режимів газополуменевого напилення | 24.11.2023 р. |  |
| 9 | Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | 26.11.2023 р. |  |
| 10 | Економічна частина | 3.12.2023 р. |  |
| 11 | Підготовка ілюстративної частини МКР | 7.12.2023 р. |  |
| 12 | Попередній захист на кафедрі | 12.12.2023 р. |  |

Студент  Ярослав НАЗАРУК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи  Роман СИВАК
(підпис) (ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

УДК.621.791.92

Назарук Я. В. Дослідження триботехнічних можливостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 133 – галузеве машинобудування, освітня програма - галузеве машинобудування. Вінниця: ВНТУ, 2023. 135 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 35 назв; рис.: 29; табл. 29.

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено огляд основних шляхів створення зносостійких напилених покриттів, досліджено триботехнічні властивості комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами, запропоновано спосіб створення зносостійких сталевих покриттів газотермічним напиленням і електроконтактною обробкою з використанням вуглезмісних наповнювачів. Виконано дослідження триботехнічних властивостей газотермічних покриттів з вуглецевмісними наповнювачами, мікроструктури та фазового складу сталей мартенситного та феритного класів після їх електроконтактної обробки. Запропонована схема нанесення зносостійкого газотермічного покриття, технологічні методи його формування та вибір режимів газополуменевого напилення дротяних сталей феритного і мартенситного класів. Здійснено математичне моделювання процесу електроконтактної обробки газотермічних покриттів.

Графічна частина складається з 9 плакатів за результатами дослідження.

Ключові слова: зношування, напиленні покриття, вуглецевмісні наповнювачі, газополуменеве напилення, електродугове напилення, електроконтактна обробка, сталь феритного та мартенситного класу.

ABSTRACT

Nazaruk Ya. V. Research of tribotechnical possibilities of combined coatings with carbon-containing fillers. Master's qualification thesis on specialty 133 - industrial mechanical engineering, educational program - industrial mechanical engineering. Vinnytsia: VNTU, 2023. 135 p.

Ukraine language Bibliography: 35 titles; Fig.: 29; table 29.

The master's qualification work reviewed the main ways of creating wear-resistant sprayed coatings, investigated the tribotechnical properties of combined coatings with carbon-containing fillers, proposed a method of creating wear-resistant steel coatings by gas-thermal spraying and electrical contact treatment using carbon-containing fillers. Tribotechnical properties of gas-thermal coatings with carbon-containing fillers, microstructure and phase composition of martensitic and ferritic steels after their electrical contact treatment were studied. The proposed scheme of applying a wear-resistant gas thermal coating, technological methods of its formation and the choice of modes of gas flame sputtering of wire steels of ferritic and martensitic classes. Mathematical modeling of the process of electrical contact processing of gas-thermal coatings was carried out.

The graphic part consists of 9 posters based on the research results.

Key words: wear, sprayed coatings, carbonaceous fillers, gas flame spraying, electric arc spraying, electrical contact treatment, steel of ferritic and martensitic class.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| ВСТУП..... | 9 |
| 1 СТАН ТА ОСНОВНІ ШЛЯХИ СТВОРЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ..... | 12 |
| 1.1 Основні види зношування та поверхневого руйнування деталей..... | 12 |
| 1.2 Вибір матеріалів для зносостійких покриттів..... | 14 |
| 1.2.1 Сталі мартенситного та феритного класів та їх особливості..... | 15 |
| 1.2.2 Вуглецевмісні наповнювачі..... | 18 |
| 1.3 Вибір методів створення покриттів із сталей феритного та мартенситного класів..... | 20 |
| 1.3.1 Газополуменеве напилення..... | 22 |
| 1.3.2 Електродугове напилення..... | 23 |
| 1.4 Основні методи створення зносостійких напилених покриттів..... | 26 |
| 2 ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМБІНОВАНИХ ПОКРИТТІВ З ВУГЛЕЦЕВМІСНИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ... | 31 |
| 2.1 Дослідження триботехнічних властивостей газотермічних покриттів з вуглецевмісними наповнювачами після їх електроконтактної обробки..... | 31 |
| 2.2 Випробування на тертя та зношування..... | 32 |
| 2.3 Методика досліджень в умовах абразивного зношування..... | 34 |
| 3 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА..... | 36 |
| 3.1 Загальна методика дослідження..... | 36 |
| 3.2 Вибір матеріалів для досліджень..... | 37 |
| 3.3 Застосовуване технологічне обладнання..... | 40 |
| 3.3.1 Устаткування для напилення покриттів..... | 40 |
| 3.3.2 Устаткування для електроконтактної обробки..... | 46 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.4 | Дослідження мікроструктури та фазового складу сталей мартенситного та феритного класів після електроконтактної обробки..... | 48 |
| 3.5 | Методика дослідження пористості покриттів..... | 49 |
| 3.6 | Методика визначення міцності зчеплення покриттів..... | 50 |
| 3.7 | Методи математичного планування експерименту та обробки статистичних даних результатів досліджень..... | 52 |
| 4 | СПОСІБ СТВОРЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ СТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ ГАЗОТЕРМІЧНИМ НАПИЛЕННЯМ І ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОЮ ОБРОБКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ВУГЛЕЦЕВМІСНИХ НАПОВНЮВАЧІВ..... | 57 |
| 4.1 | Схема нанесення зносостійкого газотермічного покриття та технологічні методи його формування..... | 57 |
| 4.2 | Вибір режимів газополуменевого напилення дротяних сталей феритного та мартенситного класів..... | 61 |
| 4.3 | Електродугове напилення сталевих дротяних матеріалів..... | 65 |
| 4.4 | Особливості електроконтактної обробки газотермічних покриттів..... | 70 |
| 4.5 | Математичне моделювання процесу електроконтактної обробки газотермічних покриттів..... | 73 |
| 5 | ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ..... | 87 |
| 5.1 | Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи..... | 87 |
| 5.2 | Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії..... | 90 |
| 5.2.1 | Мікроклімат..... | 90 |
| 5.2.2 | Склад повітря робочої зони..... | 90 |
| 5.2.3 | Виробниче освітлення..... | 91 |
| 5.2.4 | Виробничий шум..... | 92 |
| 5.2.5 | Виробничі випромінювання..... | 93 |
| 5.3 | Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки | |

| | |
|--|------------|
| роботи в умовах дії загрозливих чинників НС..... | 94 |
| 5.3.1 Дія вогню на живі організми під час пожежі..... | 94 |
| 5.3.2 Визначення кількості вогнегасників..... | 96 |
| 5.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення безпеки роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій..... | 97 |
| 6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА..... | 98 |
| 6.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки..... | 98 |
| 6.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи..... | 101 |
| 6.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки..... | 108 |
| 6.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності..... | 109 |
| ВИСНОВКИ..... | 112 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 115 |
| ДОДАТОК А – ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ..... | 120 |
| ДОДАТОК Б – ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА..... | 125 |
| ДОДАТОК В – ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ..... | 137 |

ВСТУП

Актуальність теми. Однією із актуальних задач машинобудування є заміна дорогих високолегованих сталей та сплавів, з яких виготовлені робочі органи та деталі трибосполучень, на більш дешеві з підвищеною зносостійкістю. Ця задача вирішується шляхом нанесення на робочі поверхні деталей зносостійких покриттів з використанням найбільш економічно доцільних матеріалів і технологій їх нанесення та обробки. Перспективними матеріалами для зносостійких покриттів є сталі феритного та мартенситного класів, головною особливістю яких є здатність до структурно-фазових перетворень при термодформаційному впливі. Для створення зносостійких покриттів доцільно використовувати більш дешеві та простіші в реалізації методи газополуменевого та електродугового напилення. Разом з тим, при реалізації цих методів максимальна твердість сталевих покриттів недостатня, що суттєво знижує їх зносостійкість та обмежує сферу застосування.

У цій роботі пропонується підвищити зносостійкість покриттів із сталей феритного та мартенситного класів електроконтактною обробкою з використанням вуглецевмісних наповнювачів. При цьому підвищення твердості та зносостійкості забезпечується за рахунок структурно-фазових перетворень у матеріалі напиленого покриття при його електроконтактній обробці з використанням вуглецевмісних наповнювачів і без них.

У зв'язку з викладеним, актуальним є дослідження впливу електроконтактною обробки на структурно-фазові перетворення покриттів зі сталей мартенситного та феритного класів, у тому числі з використанням вуглецевмісних наповнювачів для підвищення їх зносостійкості. Результати, отримані у роботі, дозволять вирішити науково-технічне завдання створення робочих поверхонь деталей з підвищеною зносостійкістю шляхом нанесення покриттів методами газополуменевого та електродугового напилення дротяних сталей мартенситного (40X13) та феритного (Св-08) класів з подальшою їх електроконтактною обробкою та використанням вуглецевмісних наповнювачів.

Ефект підвищення зносостійкості досягається за рахунок структурно-фазових перетворень у покриттях зі сталей мартенситного та феритного класів, отримані методами газополуменевого та електродугового напилення, шляхом варіювання режимів електроконтактної обробки та використанням вуглецевмісних наповнювачів.

Мета і завдання роботи. Мета полягає у підвищенні зносостійкості газотермічних покриттів із сталей мартенситного та феритного класів для деталей шляхом їх електроконтактної обробки з використанням вуглецевмісних наповнювачів.

Для досягнення зазначеної мети необхідно розробити спосіб та схему створення зносостійких сталевих покриттів, що включають газополуменеве та електродугове напилення та електроконтактну обробку з використанням вуглецевмісних наповнювачів; побудова математичні моделі залежностей зносостійкості та пористості покриттів, отриманих газополуменевим та електродуговим напиленням від технологічних параметрів їх електроконтактної обробки; визначити інтенсивність абразивного зносу покриттів із сталей 40X13 та Св-08 після їх електроконтактної обробки; розробити практичні рекомендації для створення зносостійких покриттів із сталей мартенситного та феритного класів комбінованим методом, який включає газополуменеве та електродугове напилення та електроконтактну обробку з використанням вуглецевмісних наповнювачів і без них.

Об'єкт дослідження. Процеси нанесення зносостійких покриттів, що включають газополуменеве та електродугове напилення сталей мартенситного та феритного класів з подальшою їх електроконтактною обробкою з використанням вуглецевмісних наповнювачів і без них.

Предмет дослідження. Вплив на зносостійкість та фізико-механічні властивості покриттів із сталей мартенситного та феритного класів електроконтактної обробки та вуглецевмісних наповнювачів.

Новизна одержаних результатів. Встановлено, що електроконтактна обробка газотермічних покриттів знижує їх пористість до 2,08...3,03%,

підвищує мікротвердість до 7,4...8,5 ГПа та зносостійкість у 2...4 рази при оптимальних параметрах електроконтактної обробки, які визначені за допомогою математичного моделювання, доведено, що рівень властивостей покриттів зі сталей Св-08 та 40Х13 (мікротвердість, зносостійкість) забезпечується фазовими перетвореннями в них при електроконтактній обробці і контролюється ступенем насичення мартенситною фазою, яка збільшується з підвищенням вмісту вуглецю та оксидів у покритті, а також при використанні наповнювачів; показано, що плавне зменшення мікротвердості по товщині газотермічним напиленням покриттів зі сталей 40Х13 та Св-08 після їх електроконтактної обробки забезпечує адгезійну міцність покриттів та мінімізує ймовірність їх відшарування.

1 СТАН ТА ОСНОВНІ ШЛЯХИ СТВОРЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

1.1 Основні види зношування та поверхневого руйнування деталей

Аналіз літературних джерел [1-3], присвячених проблемі надійності та довговічності деталей машин показав, що провідними питаннями в ній є вивчення механізму зношування. Керування зношуванням є центральною ланкою у вирішенні таких проблем, як економія енергії, скорочення витрат матеріалів, забезпечення надійності та безпеки механічних систем [1]. Основними факторами, що визначають вид зношування деталей і робочих органів, є середовище, в якому відбувається їх зношування, динаміка і кінематика відносного переміщення тіл, що труться, характер контакту і властивості матеріалу деталі, що зношується. Перші три фактори є первинними. Вони характеризують зовнішні умови служби деталей машин, визначають якісну та кількісну сторону явищ зношування. Тому їх поєднання з властивостями тіл, що труться, покладено в основу при визначенні виду зношування. Машини та обладнання працюють в широкому діапазоні зношувальних середовищ: від малозношувальних до агресивних.

Аналіз робіт, присвячених проблемі підвищення зносостійкості деталей машин показав, що провідними питаннями в ній є вивчення механізму та встановлення характеру зношування [2]. Відповідно до досліджень, проведених під час експлуатації деталей машин встановлено, що значна їх кількість (до 80%) виходить з ладу через абразивне і корозійно-механічне зношування. Внаслідок втомного руйнування - 20-30% деталей. Втомне руйнування притаманно валам, гільзам циліндрів, осей та іншим деталям, які тривалий час сприймають змінні контактні навантаження. Неприпустимим видом поверхневого руйнування деталей машин є корозія, яка спостерігається у місцях взаємодії матеріалу деталей із середовищем. Значна кількість деталей (осі, пальці, підшипники тощо) працюють в умовах корозійно-механічного та

механо-хімічного зношування. Одним з найбільш небезпечних та руйнівних видів зношування деталей є захоплювання, що призводить до їх катастрофічного руйнування.

Серед видів зношування деталей та робочих органів машин найпоширенішим є абразивне зношування. Зносостійкість металу при абразивному зношуванні визначається його здатністю чинити опір впровадженню частинок абразиву у поверхню. Значний вплив на інтенсивність зношування має твердість абразиву, розмір та форма абразивних частинок. Загальна втрата матеріалу при зношуванні деталей розподіляється таким чином: на фізичне зношування припадає 15%, на полонки — 15%, інші 70% припадають на пошкодження поверхні, з яких 55% — зношування, 15% — корозія. У загальному зношуванні можна виділити 25% адгезійного зношування, 8% поверхневої втоми, 2% корозійного зношування і, нарешті, 20% посідає абразивне зношування, хоча існує думка, що з абразивним зношуванням може бути пов'язано ~ 50% всіх проблем, пов'язаних зі зношуванням.

При експлуатації шарнірних сполучень машин має місце видавлювання та деструкція мастильної плівки, що зумовлює інтенсифікацію процесів зношування поверхонь деталей, що труться (рис. 1.3). В результаті різко зростають моменти від сил тертя в шарнірах, збільшуються внутрішні зазори в рухомих сполученнях, що спричиняє зростання динамічних навантажень і вібрацій, а отже, і погіршення якості роботи механізмів. Основні несправності шнеків: вм'ятини, пробоїни, тріщини, порушення балансування.

На показано результати аналізу статистичних даних необхідної і фактичної довговічності деталей транспортних засобів, що швидко зношуються. Серед агрегатів транспортних засобів найменш надійний та довговічний агрегат - двигун. При роботі двигунів найважливішими факторами, що впливають на зношування деталей, є число його пусків та зупинок, температурний та навантажувальний режими, вібрація та деформація деталей. У двигунах найбільш швидко зношуються канавки поршнів, циліндри,

поршневі кільця, шийки колінчастого валу. Зношування шийок колінчастого валу визначає термін служби шатунно-кривошипної групи та двигуна в цілому. Зношування відбувається за рахунок молекулярно-механічного та абразивного впливів. На знос шийок впливають сили тертя, конструкція валу та його жорсткість. На інтенсивність зношування циліндрів впливає температурний режим двигуна.

Аналіз літературних джерел, присвячених проблемі надійності та довговічності деталей та їх працездатності показав, що провідними питаннями в ній є вивчення механізму зношування та розробка шляхів керування цим процесом. Керування зношуванням є центральною ланкою у вирішенні таких проблем, як економія енергії, скорочення витрат матеріалів, забезпечення надійності та безпеки механічні системи. Одним із шляхів захисту деталей машин від зношування є формування на їх робочих поверхнях зносостійких покриттів з використанням спеціальних матеріалів, технологій нанесення та обробки. Вибір матеріалів для зносостійких покриттів визначається умовами експлуатації деталей та видами їх зношування [3].

1.2 Вибір матеріалів для зносостійких покриттів

Матеріал покриття є однією з важливих складових у технологічному процесі створення деталей із зносостійкими покриттями. Основним призначенням матеріалу покриття є підвищення фізико-механічних властивостей робочих поверхонь деталей (зносостійкості, корозійної стійкості тощо), що визначають їх експлуатаційні характеристики. У вимогах до вибору матеріалу для зносостійкого покриття обумовлюють вид зношування, який базується на багатогодинних випробуваннях деталей на зношування. Більшість робочих органів машин працюють в умовах абразивного зношування. Умови впливу абразивного середовища та руйнування робочої поверхні деталей машин визначають необхідний склад, фазовий стан та властивості матеріалу покриття. Для протидії дії абразивного середовища матеріал покриття повинен

мати достатню твердість. Такими матеріалами можуть бути феросплави, тверді наплавні сплави, карбіди, бориди, інтерметалічні сполуки, а в ряді випадків ці функції певною мірою може виконувати мартенсит. В даний час в машинобудуванні в якості матеріалів покриттів доцільно використовувати сталі мартенситного та феритного класів [4], що можна обґрунтувати їх особливими властивостями.

1.2.1 Сталі мартенситного та феритного класів та їх особливості

Властивості сталей феритного та мартенситного класу залежать від вмісту в них вуглецю. Феррит - твердий розчин впровадження вуглецю в α -залізі з об'ємно-центрованою кубічною граткою. Властивості фериту близькі до властивостей чистого заліза. У нелегованих сталях феритного класу із вмістом вуглецю до 1,2 % після гартування та низького відпуску зміна вмісту вуглецю дозволяє судити про зносостійкість сталей. Зносостійкість сталей феритного класу нижча, ніж сталей мартенситного класу, особливо при ударно-абразивному зношуванні.

Мартенсит - основна структурна складова сталі. Мартенсит є упорядкованим пересиченим твердим розчином вуглецю в α -залозі з об'ємно-центрованою тетрагональною граткою. При нагріванні сталей із мартенситною структурою відбувається дифузійний перерозподіл атомів вуглецю. У сталі виникають дві фази - ферит, що містить вуглецю до 0,02% і цементит (6,67% вуглецю). Цементит (Fe_3C) – хімічна сполука заліза з вуглецем (карбід заліза) зі складною ромбічною решіткою. Він твердий (понад 1000 НВ) і дуже крихкий. Цементит - високовуглецева метастабільна фаза, що розкладається при тривалому нагріванні з виділенням графіту. Мартенсит має, як правило, форму витягнутих пластин (голок), його відмінність - висока твердість. Твердість сталей мартенситного класу залежить від вмісту вуглецю в мартенситі. Низьковуглецевий мартенсит має знижену зносостійкість, але завдяки високій, порівняно з високовуглецевим мартенситом, в'язкості забезпечуватиме

підвищення опору ударним навантаженням, характерним при ударно-абразивному зношуванні. При підвищенні вмісту вуглецю в мартенситі зносостійкість при терті абразивом буде безперервно підвищуватися. Нерівноважна структура сталей мартенситного класу значною мірою визначає його високу твердість та міцність. Висока твердість та опір деформації сталей з мартенситною структурою пов'язані з деформаційними та температурними впливами на них внаслідок аустенітно-мартенситного перетворення ($A \rightarrow M$). Утворення того чи іншого структурного типу мартенситу обумовлено температурою формування. Мартенситне перетворення відбувається при постійній температурі та певному інтервалі температур. Закінчується перетворення при температурі значно нижче за кімнатну. Значний інтервал між температурою початку та кінця мартенситного перетворення призводить до наявності у сталях двох типів мартенситу. Пластинчастий (двійниковий) мартенсит утворюється у вуглецевих та легованих сталях при температурі початку мартенситного перетворення нижче 200°C . Рейковий (дислокаційний) мартенсит характерний для маловуглецевих, середньовуглецевих і легованих сталей, для яких температура початку мартенситного перетворення вище 300°C . У низьковуглецевих мартенситних сталях утворюється мартенсит лише рейкового типу та відсутній залишковий аустеніт. Температура початку мартенситного перетворення у таких сталей 400°C . Рейковий мартенсит має підвищену релаксаційну здатність. Між собою рейки розділені тонкими прошарками залишкового аустеніту завтовшки 10-20 нм. Зосередження паралельних рейок утворюють пакети. Аустеніт, як правило, розташований за межами мартенситних пакетів. У інтервалі температур мартенситного перетворення в структурі сталі, поруч із мартенситом, є і залишковий аустеніт. При кімнатних температурах під впливом пластичної деформації можливе перетворення залишкового аустеніту на мартенсит. При пластичній деформації сталі при температурах мартенситного перетворення кількість мартенситу збільшується. Мартенситні перетворення у сталях стимулює вуглець.

Аустеніт (γ) – твердий розчин впровадження вуглецю в γ - залізо з гранецентрованою кубічною граткою. Гранична розчинність вуглецю в аустеніті – 2,14% за температури 1147°C. Аустеніт має твердість 200-250 НВ. Аустеніт (γ -фаза) – високотемпературна гранецентрована модифікація заліза та його сплавів. У кожному зерні вихідного аустеніту утворюється велика кількість кристалів мартенситу, які мають центровані тетрагональні гратки, близькі до гратки α -заліза. У чистому залізі аустеніт існує в інтервалі температур 910–1401°C, у вуглецевих сталях аустеніт існує при температурах не нижче 723°C. Низька міцність аустеніту за високої температури сприяє утворенню рейкового мартенситу, і зі зниженням температури, коли міцність аустеніту вище, збільшується частка пластинчастого мартенситу. У легованих сталях аустеніт може існувати за набагато нижчих температур. Аустеніт перетворюється на мартенсит без участі дифузійних процесів. Можливе перетворення аустеніту на мартенсит при кімнатних температурах під впливом пластичної деформації. Пластично деформований аустеніт перебуває у метастабільному стані та характеризується структурними перетвореннями, фрагментацією, збільшенням опору деформації, збільшенням щільності дислокацій, дефектів упаковки, спотворенням кристалічних ґраток тощо. У випадках, коли у структурі міститься нестабільний аустеніт, здатний до деформаційних перетворень, досягається максимальна зносостійкість. Мартенсит, що виникає при деформації аустеніту, під дією прикладених ззовні напружень, має підвищену міцність. У мартенсіті деформації утворюють сегрегацію вуглецю такого самого типу, як і при старінні, що призводить до додаткового зміцнення. Процес перетворення аустеніту на мартенсит деформацією, і супутні цьому явища, поглинає велику кількість енергії. Зростання здатності металу до поглинання енергії призводить до підвищення опору пар тертя зношування. Інтенсивність зміцнення пропорційна кількості мартенситу деформації.

З вищевикладеного можна дійти висновку, що в умовах машинобудівної галузі найефективніше в якості матеріалів для зносостійких покриттів

використовувати сталі мартенситного і феритного класів, що пов'язано з їх особливими властивостями. Особливі властивості сталей мартенситного та феритного класів обумовлені структурно-фазовими перетвореннями в них при термо-деформаційному впливі, що забезпечуює збільшення їх твердості та зносостійкості. Таким чином, в основу вибору сталей мартенситного та феритного класів для зносостійких покриттів була покладена наукова гіпотеза, що полягає в досягненні високої твердості та зносостійкості покриттів шляхом формування в цих сталях в результаті термо-деформаційного впливу двофазної структури, що містить метастабільний аустеніт з твердістю 200-300HV, який внаслідок пластичної деформації трансформується в зносостійкий мартенсит з твердістю 700...800 HV за рахунок протікання структурно-фазового $\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$ перетворення. Використання вуглецевих модифікаторів буде посилювати ефект підвищення триботехнічних властивостей [5].

1.2.2 Вуглецевмісні наповнювачі

Для забезпечення працездатності деталей трибосполучень рекомендується нанесення на їх робочі поверхні покриттів із наноструктурними або ультрадисперсними матеріалами. До наноструктурних матеріалів відносяться об'єкти з розміром зерен менше ніж 100 нм. Широко використовуються ультрадисперсні порошки, нановолокна та нанодропи, наноплівки та нанопокриття, нанокристалічні та нанозернисті об'ємні наноматеріали (розмір зерна менше 100 нм). У порівнянні зі звичайними матеріалами у наноматеріалів суттєво змінюються характеристики: питома теплоємність, модуль пружності, магнітні властивості тощо. У міру зменшення розмірів зерен чи частинок ця відмінність збільшується. Зменшення розміру зерна металу з 10 мікрон до 10 нанометрів призводить до підвищення міцності приблизно в 30 разів. Використання колоїдів можна вважати одним із перших застосувань наноматеріалів. Термін «колоїд» використовувався для опису розчинів, що містять частинки діаметром від 1 до 100 нм в суспензії. Поряд з

металевими наноматеріалами отримані і неметалеві, наприклад полінанокристалічні матеріали такі як алмази.

Для ефективного рішення задачі створення покриттів з підвищеними триботехнічними властивостями запропоновано отримувати зі сталей мартенситного і феритного класів з вуглецевими наповнювачами, в якості яких можна використовувати колоїдний графіт з нанорозмірними наповнювачами (ультрадисперсним алмазом). Колоїдний графіт з ультрадисперсним алмазом – приклад пластичного мастила з нанорозмірними наповнювачами. Використання композиційних пластичних мастил у поєднанні з технологіями формування покриттів здійснює підвищення триботехнічних властивостей. При цьому досягається ефект трибомеханічного модифікування, коли в процесі тертя зі змащенням, модифікованого ультрадисперсними алмазами, у поверхневому шарі формується нанорозмірна пориста субструктура, що викликає ефективне поглинання енергії фрикційної взаємодії та посилює ефект підвищення триботехнічних властивостей. Графіт є стабільною високовуглецевою фазою, що складається тільки з вуглецю з шаруватими гексагональними гратками і виконує роль мастила при терті, зменшуючи зношування, сприяє розсіюванню енергії вібрацій. Введення графіту дає синергетичний ефект запобігання зношування у присутності пилу. Графіт здатний знижувати абразивне зношування [6].

Таким чином, створення покриттів зі сталей феритного та мартенситного класів з вуглецьвмісними наповнювачами при термодформаційному впливі буде одним з найбільш ефективних шляхів вирішення задачі підвищення зносостійкості робочих органів деталей машин, а створення покриттів зі сталей феритного та мартенситного класів з пластично (колоїдним графітом) та нанорозмірними наповнювачами (ультрадисперсним алмазом) покращить працездатність деталей трибосполучень техніки.

1.3 Вибір методів створення покриттів із сталей феритного та мартенситного класів

Численні дослідження показали, що одним із шляхів захисту робочих поверхонь деталей від інтенсивного зношування є не тільки вибір спеціальних матеріалів, але і способів формування з цих матеріалів зносостійких шарів на робочих поверхнях деталей. З цією метою на підставі аналізу існуючих методів поверхневого зміцнення та підвищення зносостійкості малоресурсних деталей, які знайшли своє застосування на підприємствах, доцільно використовувати дешеві та легко реалізовані газотермічні способи нанесення покриттів із сталей феритного та мартенситних класів. До них відноситься: електродугове, газополуменеве, плазмове та детонаційне напилення (табл. 1.1). Відрізняються ці способи видом нагріву матеріалу покриття, що напилюється, і способом прискорення частинок. Загальне для всіх цих способів - нагрівання розпилюваного матеріалу до високопластичного стану або плавлення, прискорення частинок або крапель газовим потоком і подальша взаємодія частинок з поверхнею, що відновлюється.

Таблиця 1.1. Характеристика способів газотермічного напилення

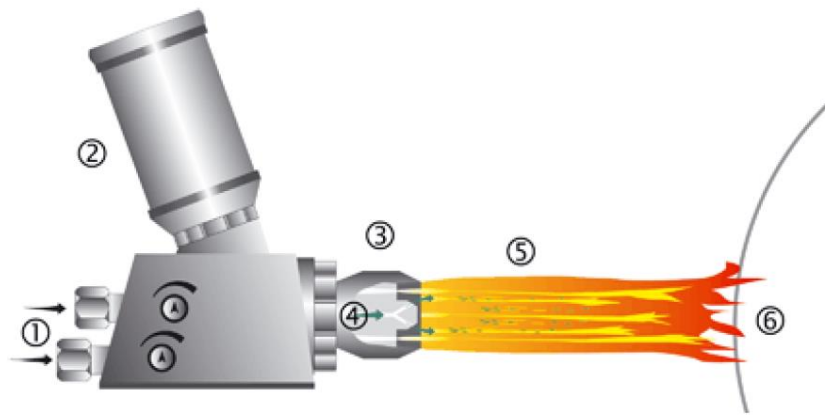
| Параметр | Способи напилення | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------|--------------|
| | Електродугове напилення | газополуменеве напилення | плазменний | детонаційний |
| Продуктивність, кг/год | 3...31 | 1...10 | 0,5...8,0 | 0,1...6,0 |
| Коефіцієнт використання матеріалу | 0,8...0,9 | 0,8...0,95 | 0,4...0,9 | 0,3...0,6 |
| Міцність зчеплення, МПа | До 40 | до 50 | до 60 | До 200 |
| Температура нагріву деталі, °С | 100...150 | 100...150 | 150...200°С | 100...150°С |

З різноманіття способів нанесення покриттів – це наймасовіші технології. Про широту застосування газотермічного напилення свідчить наявність великих спеціальних виробництв виготовлення апаратури та матеріалів для напилення на підприємствах. Установки газотермічного напилення і напилювані матеріали, що виробляються, дають можливість вирішувати низку питань, пов'язаних зі створенням зносостійких покриттів на деталях вузлів тертя, ґрунтообробному інструменті, корпусних деталях і тощо. Методи газотермічного напилення у порівнянні з іншими способами нанесення покриттів мають низку переваг, які сприяють ширшому впровадженню їх у виробництво: можливість нанесення матеріалів різних по складу, отримання покриттів із заданими фізико-механічними властивостями, керованість процесів тощо. Ефективність та універсальність цих способів визначається їх перевагами: високою продуктивністю (від 1 до 100 кг/год); великим діапазоном товщин покриттів, який може варіюватися від сотих часток міліметра до кількох міліметрів; відносною простотою та мобільністю використовуваного обладнання; можливістю нанесення покриттів як на локальні ділянки поверхні деталей, так і на великі площі. Покриттям, нанесеним газотермічним способом, властива наявність пористості. Деталі з пористими покриттями здатні легко прироблятися, зберігати мастило, меншою мірою зношувати сполучену деталь, поглинати абразивні частинки, що потрапляють в зону тертя. Пористі матеріали задовольняють основним властивостям антифрикційності (самозмазування, самопритирання). Підготовка напилюваної поверхні абразиво-струменевою обробкою підвищує втомну міцність на 50%.

На підставі проведеного аналізу методів поверхневого зміцнення деталей машин зроблено висновок, що на підприємствах знайшли застосування в основному газотермічні способи нанесення покриттів [7].

1.3.1 Газополуменеве напилення

Газополуменевий спосіб напилення покриттів - один з найдоступніших і відрізняється від інших відносною простотою і низькою вартістю устаткування, що застосовується, легкістю і простотою його обслуговування, що не вимагає високої кваліфікації оператора; відносно низьким рівнем шуму та випромінювань, що дозволяє працювати оператору без додаткових засобів захисту; невеликими габаритами, гнучкістю та мобільністю, що дозволяє проводити нанесення покриттів у будь-якому просторовому положенні, у польових умовах. Область застосування газополуменевого напилення у машинобудівній галузі - захист від зношування робочих органів машин. Спосіб газополуменевого напилення легко реалізований для формування антифрикційних покриттів на поверхнях, що сполучаються, корпусних опор, знаходить застосування при відновленні зношених робочих поверхонь деталей до креслярських розмірів, нанесення антикорозійних покриттів на конструкції та великогабаритні вироби. При газополуменовому напиленні джерелом теплової енергії є газове полум'я, що утворюється в результаті горіння суміші кисень (стиснене повітря) - горючий газ (ацетилен, пропан-бутан, природний газ тощо). При газополуменовому напиленні матеріал, що розпилюється (дріт, порошковий шнур або порошок) нагрівають зазвичай в киснево-ацетиленовому полум'ї, яке має найвищий питомий тепловий потік. Температура полум'я при використанні в якості пального газу ацетилену досягає 3200°C , а швидкість витікання $150 \dots 160 \text{ м / с}$. Напилюваний матеріал, потрапляючи у факел ацетиленокисневого полум'я пальника (рис. 1.1), розігрівається до температури, близької до температури плавлення і розганяється до швидкості $20\text{-}80 \text{ м/сек}$. Швидкість польоту частинок залежить від співвідношення кисню та пального газу в суміші, відстані від зрізу сопла, витрати матеріалу, що вводиться в полум'я і розпилюється, та інших факторів.



1 – ацетилен; 2 – кисень; 3 - ємність із порошком; 4 – газ; 5 – ацетилен-кисневе полум'я та напилювані частки; 6 – деталь

Рисунок 1.1 - Газополуменеве напилення

Апарати для газополуменевого напилення відрізняються застосовуваним горючим газом, типом приводу подачі дроту, конструкцією розпилювальної головки і складаються з механізму подачі дроту, газозмішувального пристрою, розпилювальної головки з газовим та повітряним соплами. При газополуменевому напиленні найдешевшими і затребуваними є дротяні вуглецеві сталі. Діаметр дроту перебуває в межах від 1,0 до 5,0 мм, швидкість його подачі - в межах 1,0...0,15 м/с. Відновлена поверхня не вимагає термічної обробки і має фізико-механічні властивості матеріалу, що напилюється. Використання дроту дозволяє здійснювати безперервну та рівномірну подачу напилюваного матеріалу у високотемпературну зону апарату для напилення, що підвищує стійкість процесу напилення та якість одержуваного покриття [8].

1.3.2 Електродугове напилення

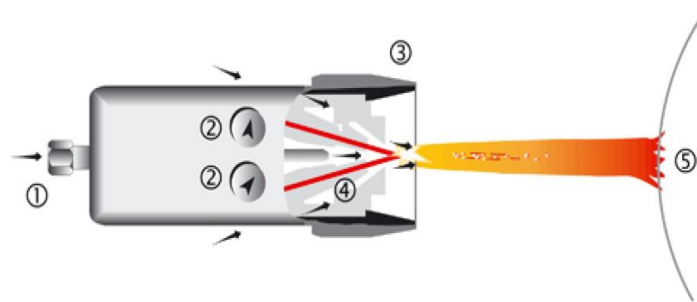
Електродугове напилення має в даний час найпоширеніше застосування та поступово витісняє традиційний газополуменевий спосіб. Це пов'язано, в основному, з більш високою продуктивністю електродугового напилення (в 3...4 рази вище, ніж при газополуменевому напиленні), поширеністю та

доступністю джерела енергії для плавлення металу, отриманням більш якісних покриттів з більшою міцністю зчеплення з основним металом. Електродуговий спосіб має більш високу теплову ефективність, що досягає 57% порівняно з 13 і 17% при газополуменевому і плазмовому напиленні. Розроблене останнім часом обладнання для електродугового напилення дозволяє наносити покриття, що практично не поступаються покриттям, нанесеним плазмовим і детонаційним способами. Електродугове напилення має ряд істотних переваг, що сприяє його широкому застосуванню: одержання покриттів завтовшки від 0,1 до 7 мм; простота та технологічність процесу, технологічна гнучкість застосування до різних типорозмірів деталей; незначне тепловкладення (температура нагріву деталі 100-150° С) і, як наслідок, відсутність значного термічного впливу на деталь; простота та доступність обладнання; низька собівартість відновлення деталей (питома собівартість нанесення покриття в 1,4-1,8 рази нижче за наплавлення); можливість нанесення покриття на поверхні деталей з різного матеріалу (сталь, чавун, алюміній, бронза, дерево, полімер тощо); отримання комбінованих металопокриттів із заданими властивостями з різних матеріалів. Габарити деталей не лімітують застосування електродугового напилення.

Процес електродугового напилення полягає у нагріванні (до плавлення) електричної дугою дротів, що сходяться, і розпилення розплавленого металу стисненим повітрям (рис. 1.2). Слід зазначити, що при електродуговому напиленні метал, що наноситься, потрапляє на підкладку у вигляді дрібних крапель, які охолоджуються до температури основи за мізерно короткий час, забезпечуючи в покритті утворення гартованих структур, при цьому твердість напиленого шару може перевищувати твердість вихідного матеріалу.

Електродугове напилення має широку сферу застосування: для нанесення зносостійких покриттів з підвищеною міцністю зчеплення, що витримують високі контактні навантаження при ударному навантаженні; для антикорозійного захисту металоконструкцій з гарантією 20-25 років при нормальних умовах; для нанесення антифрикційних покриттів; для відновлення

деталей зі сталі, чавуну та кольорових металів, що працюють у умовах нерухомих посадок, тертя ковзання та мастила; для нанесення покриттів з підвищеною зносостійкістю на важконавантажені деталі автотракторної техніки, що працюють в умовах знакозмінних навантажень; можна відновлювати близько 60% найменувань деталей, що зношуються, які забезпечують зносостійкість на рівні нових. Вибір марки сталі дроту визначається параметрами робочого середовища. Зносостійкість забезпечується при використанні дроту з вуглецевої, низько- та високолегованої сталі, корозійна стійкість - за рахунок дроту з мартенситних та аустенітних сталей.



1 - газ, що розпилює; 2 – регульована подача дроту; 3 – сопло; 4 - електропровідний дріт; 5 – деталь

Рисунок 1.2 - Електродугове напилення

Зміцнення і відновлення деталей машин, що швидко зношуються, і елементів конструкцій способами електродугового і газополуменевого напилення покриттів з дротяних матеріалів є одним з напрямів, що найбільш інтенсивно розвиваються, при створенні ресурсозберігаючих технологій та захисті від корозії. Простота та легкість реалізації електродугового і газополуменевого напилення сприяють їх впровадженню. Однак при реалізації методів електродугового і газополуменевого напилення максимальна твердість покриттів досягається із сталей феритного та мартенситного класів і перебуває в межах 35-50 HRC_E, що суттєво знижує їх зносостійкість та різко обмежує сферу застосування. У зв'язку з зазначеним вище діапазон використання електродугового і газополуменевого напилення без активування процесу

напилення, модифікування та обробки покриттів залишається вкрай вузьким [9].

1.4 Основні методи створення зносостійких напилених покриттів

Особливий інтерес серед методів створення зносостійких напилених покриттів представляють методи напилення в поєднанні з різними способами обробки покриттів (рис. 1.3). Підвищення мікротвердості та зносостійкості забезпечує електронно-променева обробка напилених покриттів. Межа витривалості підвищується на 60-80%, а міцність зчеплення – у 2,5...3,5 рази після електронно-променевої обробки. Завдяки лазерній обробці електродугових покриттів підвищується зносостійкість в умовах тертя та абразивного зношування завдяки дрібнокристалічній безпористій структурі покриттів з рівномірним розподілом хімічних елементів. Лазерна обробка напилених покриттів підвищує їх стійкість до корозії. З метою зниження енергетичних витрат використовують спосіб легування поверхні обробкою лазерним променем та плазмою. Лазерне оплавлення напилених покриттів збільшує мікротвердість у 2 рази, зносостійкість у 1,3-1,8 рази. Оплавлення електродугових та газополумєневих покриттів здійснюють струмами високої частоти, високошвидкісним імпульсно-плазмовим струменем. Поліпшити характеристики напилених покриттів дозволяє поверхнево-пластичне деформування. Ультразвукова обробка напиленого покриття забезпечує високу міцність зчеплення покриття та деталі. Ультразвукова обробка забезпечує щільність напиленого покриття, близьку до щільності компактного матеріалу, що особливо важливо для зносостійких покриттів. Засобами для досягнення необхідної структури та зносостійкості напилених покриттів є різні види термічної та хіміко-термічної обробки. Так, наприклад, використання недорогих низьковуглецевих сталей в якості газотермічних покриттів з подальшим модифікуванням, зокрема, боруванням, підвищує зносостійкість покриттів зі сталі Св-08 при сухому терті в 10 разів. Іонне азотування

напилених із сталей 40X13 та X18H10T покриттів забезпечує мікротвердість від 6,5 до 15 ГПа у поверхневому шарі від 5 до 40 мкм. При цьому зносостійкість збільшується у 8 разів.

Розглянуті вище методи створення зносостійких напилених покриттів послужили основою для впровадження технологічних процесів відновлення – зміцнення та підвищення терміну служби деталей машинобудівного виробництва. Однак, застосування розглянутих вище методів створення зносостійких напилених покриттів обмежено через ряд недоліків. Зокрема, лазерна та електронно-променева обробка призводять до неоднорідної гетерогенної макроструктури поверхні та не забезпечують її хімічного модифікування. Методи високоенергетичної іонної імплантації суттєво збільшують собівартість покриттів. Хіміко-термічна обробка характеризується великою тривалістю процесу і не дозволяє проводити обробку великогабаритних виробів. Більшість розглянутих методів створення зносостійких напилених покриттів вимагають відносно високих температур та тривалої обробки. Високі температури, як правило, негативно позначаються на властивостях деталей, що зміцнюються, тому при виборі технології нанесення покриттів необхідно прагнути до збереження вихідних механічних властивостей деталей. У зв'язку з цим одне з розв'язуваних завдань було спрямовано на пошук і створення методів газополуменевого та електродугового напилення покриттів з підвищеною зносостійкістю. Незважаючи на велику кількість розробок у галузі створення напилених покриттів, в даний час вони набули спрямованості на створення зносостійких покриттів шляхом активування процесу напилення та модифікування покриттів (рис. 1.3).

При створенні зносостійких напилених покриттів доцільно застосовувати прийоми активації процесу напилення, які інтенсифікують теплообмін в системі «факел - частка», збільшують динамічні параметри частинок, дозволяють зменшувати розмір частинок при розпиленні дротів. Як правило, на практиці реалізуються такі прийоми активації процесу газополуменевого та електродугового напилення (рис. 1.3): інтенсифікація процесу змішування

робочих газів; надавання додаткової енергії частинкам напилюваного матеріалу шляхом їх нагрівання, прискорення або і того й іншого одночасно; зменшення середнього розміру часток, що розпилюються. Наприклад, при активуванні електродугового напилення в якості розпилювального газу використовуються продукти згоряння пропано-повітряної суміші. Варіюванням витрат пропану та повітря можна створювати нейтральну або відновлювальну атмосферу в зоні плавлення електродного дроту і тим самим знижувати окислення металу та вигорання легуючих елементів. Порівняльний аналіз властивостей покриттів показав, що пористість покриттів при активуванні процесу електродугового напилення значно менша, ніж без активування процесу (2...4% і 9...11% відповідно), величина газопроникності нижче в 30...40 разів, а при товщині шару 0,05...0,1 мм різниця досягає 4...5 порядків. Міцність зчеплення покриттів під час активування підвищується 1,8...2,2 рази.

Можливими шляхами формування зносостійких покриттів газополуменевого та електродугового напилення сталей мартенситного та феритного класів є модифікування поверхневих шарів напилених покриттів (рис. 1.3) шляхом зміни їх структури (лазерною обробкою, надшвидким загартуванням тощо) та хімічного складу (хіміко-термічна обробка, електронно-променева тощо).

Високу зносостійкість, твердість та інші властивості покриттів газополуменевого та електродугового напилення можна забезпечувати такими методами обробки напилених покриттів, як електроімпульсна, електромеханічна, механо-термічна обробка. Механо-термічна обробка може проводитись в одному технологічному ланцюгові з процесом напилення відразу по шару сформованого покриття обкаткою у валках, роликах, нагріванням полум'ям додаткового пальника. Взаємодія матеріалів у твердій фазі активується як температурою, так і тиском. При цьому потрібні низькі тиски, що ініціюють спрямований рух структурних дефектів. Значне підвищення зносостійкості після механо-термічної обробки пояснюється позитивною роллю механічного фактора.



Рисунок 1.3 - Методи підвищення зносостійкості покриттів газополум'яного та електродугового напилення

Серед методів механо-термічної обробки використовується схема електроконтактного нагріву (рис. 1.4) при прокатуванні покриттів напилених мідним струмопровідним роликком (рис. 1.4, а). Електроконтактна обробка здійснюється під тиском під час прямого пропускання електричного струму (рис. 1.4, б).

Електроконтактна обробка характеризується високою продуктивністю, низькою енергоємністю, відсутністю світлового випромінювання та газовиділення, мінімальними тепловкладеннями [10]. Зона термічного впливу струму на деталь становить 0,2-1,0 мм. Імпульсний характер процесу електроконтактної обробки дозволить зберегти вихідні механічні властивості деталей. Електроконтактна обробка дозволить знизити вимоги до механічних

властивостей напилюваного матеріалу та замінити високолеговані дефіцитні матеріали для покриттів дешевшими. Поверхнева пластична деформація у процесі електроконтактної обробки дозволяє виключити або значно зменшити припуски на механічну обробку покриттів.

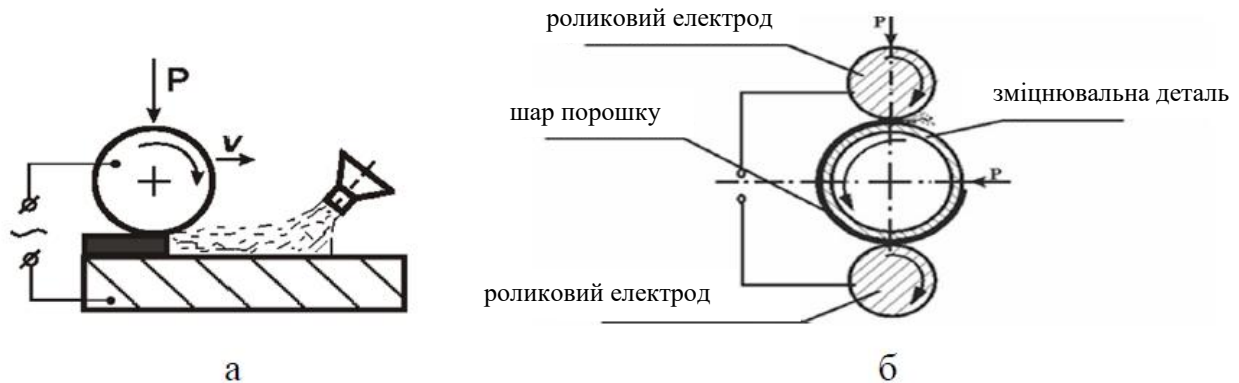


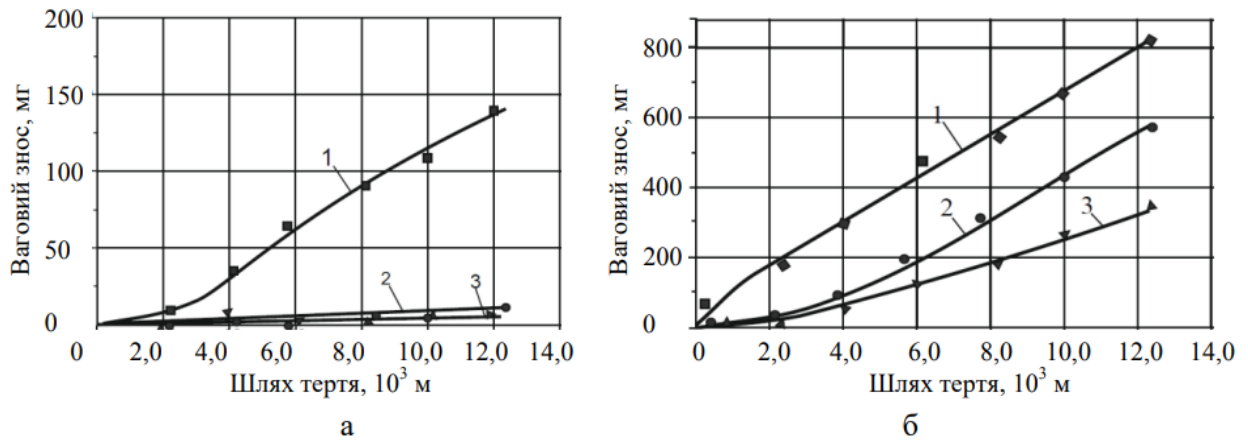
Рисунок 1.4 - Схема електроконтактної обробки напилених покриттів (а) та технологічна схема електроконтактної обробки (б)

Таким чином, комбінація технології газополуменевого та електродугового напилення є ефективним методом створення зносостійких покриттів газополуменевим та електродуговим напиленням із сталей мартенситного та феритного класів з використанням вуглецевмісних наповнювачів. При цьому, зносостійкість покриттів забезпечуватиметься за рахунок структурних змін та фазових перетворень у матеріалі покриттів створених газополуменевим та електродуговим напиленням шляхом термодеформаційного впливу в процесі електроконтактної обробки.

2 ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМБІНОВАНИХ ПОКРИТТІВ З ВУГЛЕЦЕВМІСНИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ

2.1 Дослідження триботехнічних властивостей газотермічних покріттів з вуглецевмісними наповнювачами після їх електроконтактної обробки

Триботехнічні випробування покриттів створених газополуменевим і електродуговим напиленням зі сталі Св-08 та 40Х13 з наповнювачем після їх електроконтактної обробки показали (рис. 2.1), що в початковому стані покриття зі сталі 40Х13 мають низьку зносостійкість (рис. 2.1, а, крива 1). Електроконтактна обробка цього покриття знижує інтенсивність його зношування і призводить до збільшення зносостійкості в 3-4 рази (рис. 2.1, а, крива 2) та в 4-5 раз з наповнювачами (рис. 2.1, а, крива 3), що пов'язано із збільшенням їх мікротвердості [11]. Крім цього перетворення аустеніту в мартенсит ($\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$) при електроконтактній обробці зміцнює покриття і призводить до появи в них стискаючих напружень, що перешкоджає руйнуванню при терті. Покриття зі сталі Св-08 мають більш низьку зносостійкість (рис. 2.1, б, крива 1) в порівнянні зі сталлю 40Х13 (рис. 2.1, а, крива 1). Електроконтактна обробка цього покриття з наповнювачем і без нього призводить до збільшення зносостійкості (зниження вагового зносу) в 2 рази (рис. 2.1, б, крива 2, 3). Покриття зі сталі мартенситного класу 40Х13 показали кращу стійкість до абразивного зношування. Таким чином, електроконтактна обробка покриттів зі сталей Св-08 і 40Х13 забезпечують підвищення їх зносостійкості за рахунок $\alpha\text{-Fe(M)}$, $\gamma\text{-Fe(A)}$, оксидів FeO ; Fe_3O_4 , карбїду заліза Fe_3C та перетворення аустеніту в мартенсит ($\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$).



1 – покриття газополуменевим напиленням; 2 – покриття газополуменевим напиленням і електроконтактна обробка; 3 – покриття газополуменевим напиленням з ультрадисперсною алмазо-графітовою шихтою і електроконтактна обробка

Рисунок 2.1 - Залежність вагового зносу $I_q(a)$ від шляху тертя (тертя без змащення, $p_a=3$ МПа) для зразків з покриттями із дротяних сталей 40X13 (а, б) і Св-08 (б)

2.2 Випробування на тертя та зношування

В якості триботехнічних характеристик, що підлягають оцінці в процесі випробувань, була обрана величина зношування.

Машина складається з випробувальної установки, пульта керування та системи збору інформації, даних для реєстрації в персональному комп'ютері. Принцип дії машини полягає у стиранні пари зразків, які притискаються один до одного із заданою силою. Під час випробувань реєструється частота обертання, момент тертя, сила стиснення, величина зноування та кількість циклів напрацювання. Можливий запис температури та випробувань у різних середовищах. Система збору даних дає можливість вести одночасну реєстрацію десяти параметрів у числових значеннях та графічне відображення із збереженням отриманих результатів.

Опір зношуванню визначався за величиною лінійного зношування, що реєструється [12]. Величина зношування зразків може також визначатися за втратою ваги при випробуваннях. Запропонований програмно-технічний комплекс для вимірювання обраних триботехнічних характеристик дозволяє керувати вимірювальним стендом, вводити експериментальні значення, виділяти критичні точки, проводити розрахунки в реальному масштабі часу, графічно чи чисельно представляти отримані дані, архівувати масиви інформації у зручному для аналізу форматі.

Для проведення триботехнічних випробувань було обрано дві схеми фрикційної взаємодії:

- «пальчиковий індентор – площина» при зворотно-поступальному переміщенні контактуючих тіл;

- «пальчиковий індентор – диск» при односпрямованому обертанні диска.

Схема «пальчиковий індентор – площина» дозволяє реєструвати коефіцієнт тертя в умовах тертя ковзання, а також використовувати зразки з поверхнею, зручною для досліджень структурно-фазових перетворень у поверхнях тертя. Схема «пальчиковий індентор – диск» дозволяє проводити випробування на тертя ковзання у широкому діапазоні навантажень, швидкостей та температур випробувань. Номінальний контактний тиск випробувань становив 3 МПа. Питоме навантаження випробувань складало 0,64 - 1,5 МПа. Випробування проводять до досягнення 10000 циклів (шлях тертя 150-500 м) з визначенням вагового зносу зразка. Вимірювання величини зношування зразків здійснювалося ваговим методом з використанням аналітичних вагів. Зважування кожного зразка проводилося не менше 2-3 разів. Похибка вимірювання маси зразка становила 0,05 мг. Шлях тертя становив 5000...8000 м. Інтенсивність зношування розраховувалася за результатами оцінки втрат маси зразка в процесі випробувань, що визначається за допомогою аналітичних вагів.

2.3 Методика досліджень в умовах абразивного зношування

Випробування в умовах абразивного зношування здійснювали на випробувальній установці (рис. 2.2).

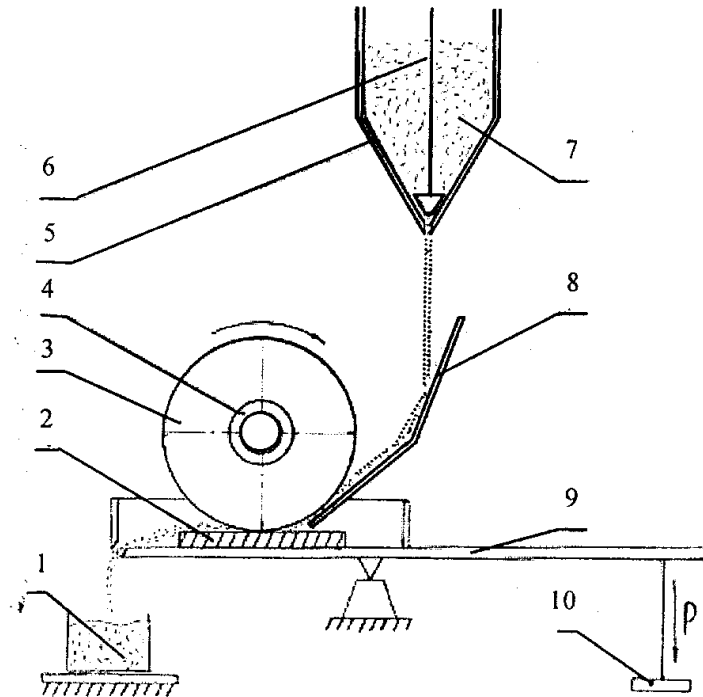


Рисунок 2.2 - Випробування зразків в умовах абразивного зношування

Зразки зношувалися за допомогою вільного абразиву, який подавався через гумовий ролик на поверхню тертя [13]. Принцип роботи установки полягає в наступному: експериментальний зразок 2, розміри якого складають 3030 мм і товщиною 4,0 мм, притискався гумовим роликом 3 діаметром 50 мм, при обертанні якого в зону контакту подавався абразив 7 з бункеру 5 через жолоб 8. зусилля притискування регулювалося за допомогою важеля 6 і пружини 10 через важіль 9. Швидкість подачі абразивних частинок регулювалася дозатором частинок 4. Відходи абразиву збиралися в бункеру 1. Як абразив використовувався кварцовий пісок (SiO_2) зернистістю від 50 до 500 м. Твердість абразиву становила 1100–1200 МПа. Перед випробуванням абразив просували (вологість не перевищувала 0,16%). Зношування заміряли ваговим методом на аналітичних вагах з точністю до 0,0001 г. До і після

випробування зразки промивали в етиловому спирті, просушували та зважували. Експеримент проводили при швидкості ковзання 0,158 м/с та навантаженні 14,7; 44,1 Н.

3 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА

3.1 Загальна методика дослідження

Методика досліджень представлена сукупністю методів практичного виконання поставленого наукового завдання. З метою скорочення обсягу необхідних експериментальних робіт та отримання максимальної інформації з проведених експериментів було використано методи математичного планування експерименту та математичної обробки статистичних даних. У розділі обґрунтовано вибір напряму дослідження, представлено загальну схему досліджень (рис. 3.1), обґрунтовано вибір сталей феритного та мартенситного класу для отримання покриттів з підвищеною зносостійкістю та обладнання для нанесення покриттів [14]. Методологія досліджень передбачає дослідження характеристик міцності, рентгеноструктурних та металографічних досліджень.

Для комплексної оцінки властивостей одержуваних покриттів завдання оптимізації режимів їх створення розглядається як багатофакторне (з урахуванням конструкційних, технологічних та експлуатаційних факторів) та багатокритеріальне (з використанням кількох критеріїв – зносостійкість, пористість, міцність зчеплення). Такий підхід дає можливість представити процес створення покриттів із підвищеною зносостійкістю у вигляді функціональної залежності, що визначає оптимальні режими, що забезпечують максимальні значення зносостійкості та мінімальні значення пористості. Для ефективного аналізу явищ та керування процесом створення зносостійких сталевих покриттів взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, та його результатів представлений у вигляді математичної моделі.

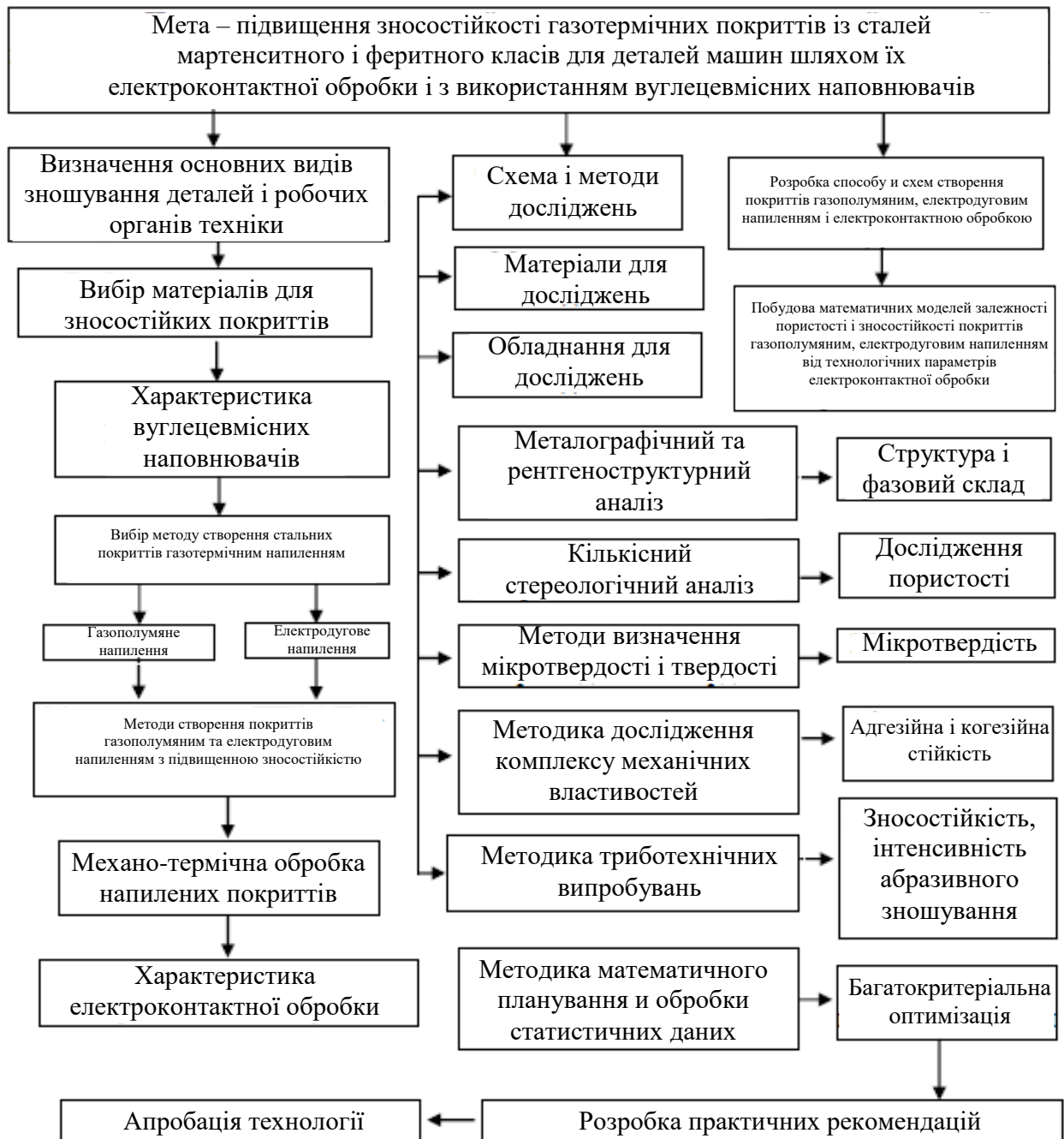


Рисунок 3.1 - Загальна схема досліджень

3.2 Вибір матеріалів для досліджень

В якості об'єктів дослідження було обрано газотермічні покриття з дротяних сталей 40X13 (сталь мартенситного класу) та Св-08 (сталь феритного класу). Діаметр дроту 2,0 мм. Хімічний склад дротів наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 3.1 - Хімічний склад сталей мартенситного (40X13) та феритного (Св-08) класів

| Марка матеріалу | Концентрація елементів, мас. % | | | | | | | Твердість після напилення, HV |
|-----------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|--------|-------------------------------|
| | C | Cr | Ni | Ti | Mn | Si | Fe | |
| 40X13 | 0,42 | 13,4 | 0,54 | 0,13 | 0,44 | 0,27 | основа | 360...420 |
| Св08 | 0,06 | 0,1 | – | – | 0,40 | 0,25 | основа | 250...300 |

Вибір сталей мартенситного (40X13) та феритного (Св-08) класів для створення покриттів з підвищеною зносостійкістю обумовлений їх здатністю до структурно-фазових аустенітно-мартенситних перетворень ($\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$) при термодформаційному впливі, що впливає на твердість, опір деформації та зносостійкість. В результаті $\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$ перетворення в структурі сталі, поряд з мартенситом, присутній і залишковий аустеніт. Деформований аустеніт перебуває в метастабільному стані і характеризується зміною багатьох його параметрів: збільшенням опору деформації, структурними перетвореннями, спотворенням кристалічних ґрат тощо. Тому максимальна зносостійкість досягається у випадках, коли в структурі сплавів міститься метастабільний аустеніт. Значна зносостійкість сплавів, у структурі яких міститься метастабільний аустеніт, пояснюється також його високою здатністю до наклепу, легованістю, особливостями будови кристалічної решітки, в якій ускладнено злиття лінійних дислокацій у порожнинні з утворенням зародкових тріщин, які становлять початкову стадію руйнування.

Процес перетворення аустеніту на мартенсит деформації, і супутні цьому явища, поглинають велику кількість енергії. Зростання здатності металу до поглинання енергії призводить до підвищення опору зношуванню. Мартенсит, що виникає при деформації аустеніту, під дією прикладених ззовні напружень, має підвищену міцність. Інтенсивність зміцнення пропорційна кількості мартенситу деформації, що залежить від ступеня пластичної деформації в

контакті та температури, за якої відбувається деформування. У мартенситі деформації утворюються сегрегації вуглецю такого самого типу, як і при старінні, що призводить до додаткового зміцнення.

Хром у сталі 40X13 сприяє підвищенню її прогартованості при швидкому охолодженні, тому в цьому випадку структура хромистих сталей складається в основному з мартенситу та продуктів його відпуску. При значному вмісті хрому у вихідному дроті у покритті утворюються карбіди $Cr_{23}C_6$, а також невелика кількість аустеніту. Хром значною мірою підвищує корозійну стійкість покриттів, а також адгезію покриття до мастила. На міцність зчеплення покриттів хром у чистому вигляді не впливає. При напиленні хром мало вигоряє.

В якості вуглецевмісних наповнювачів використовувався колоїдний графіт і ультрадисперсна алмазо-графітна суміш. Використання вуглецевмісних наповнювачів посилюватиме ефект підвищення триботехнічних властивостей. Ультрадисперсна алмазовмісна шихта складається з алмазної та графітоподібної фаз із середнім розміром вуглецевих кластерів 10-30 нм. Співвідношення інтенсивностей дифракційних ліній алмазу та графіту дозволяють оцінити співвідношення об'ємних часток алмазної та графітоподібної фаз як 30:70 (рис. 3.2).

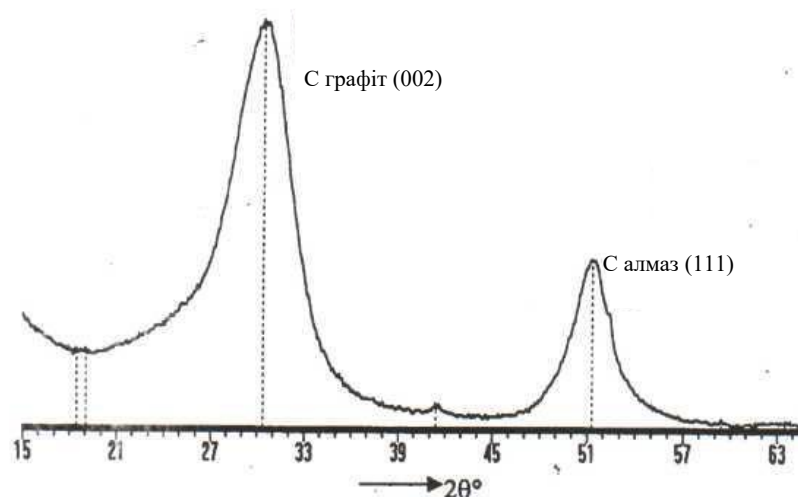


Рисунок 3.2 - Фрагмент рентгенівської дифрактограми алмазографітової шихти

Ультрадисперсна алмазовмісна шихта (наноалмази) є продуктом детонаційного синтезу. Наноалмази - складні об'єкти з тришаровою структурою, що включає: алмазне ядро розміром 4-6 нм, в якому від 70 до 90% атомів вуглецю; перехідну вуглецеву оболонку (проміжний шар) навколо ядра з рентгеноаморфних структур вуглецю товщиною 0,4-1,0 нм, яку може входити від 10 до 30% атомів вуглецю; поверхневий шар, в якому, крім атомів вуглецю, знаходяться й інші гетероатоми (N, O, H), що утворюють ряд функціональних груп (атоми азоту рівномірно розподілені по всіх шарах). Детонаційний наноалмаз хімічно досить інертний матеріал, який важко піддається окисленню [15]. Алмазовмісна шихта це не суміш частинок алмазу і графіту з додаванням домішок з оксидів та інших сполук, а порошкоподібна система, в якій алмазні структури входять до складу вуглецевої матриці, що містить різні типи вуглецевих зв'язків. Слід зазначити, що частинки ультрадисперсної алмазовмісної шихти, як і всі нанорозмірні частинки, мають велику питому поверхню (400-500 м²/г) і мають значну поверхневу енергією, внаслідок чого у звичайних умовах вони схильні до утворення конгломератів розміром до 4-5 мкм.

3.3 Застосовуване технологічне обладнання

3.3.1 Устаткування для напилення покриттів

Покриття наносили з використанням установки для високошвидкісного розпилення дроту. Напилення здійснювалося з використанням технологій високошвидкісного термоструминного напилення за такими режимами:

- розпилення швидкісним повітряним струменем металу, розплавленого у факелі пропано-кисневого полум'я;
- розпилення реактивним струменем продуктів згоряння пропано-повітряної суміші (1/25) металу, розплавленого в електричній дузі.

У газополуменивих пальниках для розпилення дроту останній подається по осі пристрою, а горюча суміш і зона горіння формуються навколо кінця дроту, що виходить. Дріт, що безперервно подається, плавиться з поверхні і цим же горючим газом здувається в напрямку осадження та формування покриття.

Апарати для газополуменевого дротяного напилення складаються з наступних основних вузлів: механізм подачі дроту, газозмішувальний пристрій та розпилювальна головка, забезпечена газовим та повітряним соплами. Відрізняються застосовуваним газом, типом приводу подачі дроту, конструкцією розпилювальної головки. У комплект апарату для газополуменевого напилення дротяних матеріалів входять: терморозпилювальний пістолет, малогабаритний блок керування подачею робочих газів, блок керування електроприводом подачі дроту, розпилювальні головки для роботи на горючих газах (ацетилені або пропан-бутані). Унікальність апарату полягає у конструкції розпилювального сопла, регулювання подачі дроту та газу, що подається, це дозволяє наносити покриття з продуктивністю від 0 до 28 кг/годину при великому коефіцієнті використання матеріалу (до 90%). Технічна характеристика апарату наведена нижче (табл. 3.2).

Апарат комплектується пультом керування робочими газами з блоком ротаметрів (урівноважувальні прилади, що складаються з двох рота метричних трубок, кожна з яких встановлена між редукційним клапаном витрати і тиску пального газу та кисню, і з'єднана з відповідним манометром). Блок ротаметрів разом із двома вогнеперешкодниками, служить для захисту від зворотного вогневого удару. Загалом пульт керування дозволяє оперативно проводити підключення та відключення апарату, точно встановлювати режими напилення (витрата та тиск газів), що суттєво підвищує якість покриттів.

Апарат оснащений розпилювачем оригінальної конструкції, який дозволяє плавно регулювати склад горючої суміші та форму факела, забезпечує формування покриттів з розміром частинок до 400 мкм та температурою

плавлення від 90 до 400⁰С. В основу моделі дротяного терморозпилювача покладено принцип мікрофакельного спалювання паливної газоподібної суміші в малогабаритній камері згоряння, що використовується в установках гіперзвукового електродугового напилення. Застосування даної камери згоряння дозволяє здійснювати високошвидкісне розпилення дроту, розганяючи частинки, що розпиляються, до надзвукових швидкостей.

Таблиця 3.2 - Технічна характеристика дротяного терморозпилювача

| Показник | Значення |
|--|---------------|
| Продуктивність, кг/год | 2,8 |
| Коефіцієнт використання матеріалу, що наноситься | 0,90 |
| Діаметр дротів, що розпилюються, мм | 1,6-4,0 |
| Швидкість подачі дротів, м/хв | 0,4-20 |
| Максимальне зусилля протягування дроту, Н | 125 |
| Привід подачі дроту | Електродвигун |
| Максимальна робоча напруга електродвигуна, В | 27 |
| Робочий тиск газів, МПа: | |
| кисень | 0,2-0,4 |
| ацетилен | 0,1 |
| пропан-бутан | 0,1-0,2 |
| повітря | до 50 |
| Витрата газів, м ³ /год: | |
| кисень | 4,0 |
| ацетилен | 1,0 |
| пропан-бутан | 0,5-1,0 |
| повітря | до 50 |
| Вага терморозпилювача, кг | 2,5 |
| Розмір пістолета-терморозпилювача, мм | 278x106x240 |
| Розміри блока ручного керування, мм | 410x150x90 |
| Вага блока ручного керування, кг | 2,85 |

Істотний вплив на якість покриттів має конструкція розпилювальної головки апарату для напилення. Вона забезпечує ефективний теплообмін між полум'ям і матеріалом, що напилюється, це може бути досягнуто підвищенням ефективної розпилювальної потужності головки. Ефективна потужність розпилювальної головки, а також стабільність горіння залежить від якості змішування робочих газів. Практично у всіх відомих газозмішувальних

пристроях пальників газополуменевого наплення горючий газ та кисень змішуються у гладких прямих каналах, де неможливий розвинений турбулентний перебіг газової суміші. Це знижує якість покриттів, особливо при роботі на пропан-бутані, що має більш високу, порівняно з ацетиленом, щільність та в'язкість. Режим течії пального газу та кисню в каналах газозмішувального пристрою, а значить, і якість суміші характеризується числом Рейнольдса, причому розвинена турбулентна течія у прямих циліндричних каналах відбувається при числі Рейнольдса $Re = 10^4$. Розрахунками встановлено, що у газозмішувальних пристроях існуючих пальників для газополуменевого наплення число Рейнольдса Re не перевищує $2,15 \cdot 10^3$. При течії суміші у вигнутих каналах виникають циркуляційні струми, або так звана вторинна циркуляція, що зумовлює рух суміші по гвинтовій лінії. Розвинена турбулентна течія при вторинній циркуляції настає вже за числах $Re = (6,5 \dots 8,0) 10^3$. Використовуючи це явище для встановлення пристрою, було розроблено газозмішувальний пристрій, в якому горючий газ та кисень рухаються по гвинтових траєкторіях, що перетинаються. Завдяки цьому забезпечується створення розвиненої турбулентної течії при $Re = (7,1 \dots 7,8) 10^3$. Для ще більшої інтенсивності перемішування робочих газів було запропоновано розділити порожнину газозмішувальної камери пористими перегородками. Для пористої перегородки критерій Рейнольдса визначається так:

$$Re = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2 (P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}) d_{\text{пор}} \rho_{\text{г}}}{32 \mu_{\text{в}} k_{\text{п}}} \quad (3.1)$$

де $d_{\text{ч}}$ – середній діаметр частинки пористої перегородки;

$d_{\text{пор}}$ – середній діаметр пор;

$\rho_{\text{г}}$, $\mu_{\text{в}}$ - щільність та динамічна в'язкість газу, відповідно;

$P_{\text{вх}}$, $P_{\text{вих}}$ - відповідно тиск на вході та виході пористої перегородки;

$k_{\text{п}}$ - коефіцієнт звивистості.

Вибір матеріалу пористих перегородок визначається здатністю опору проникненню полум'я при зворотних ударах у пальнику. Таким матеріалом може бути мідь або бронза, що мають високі значення теплопровідності та теплоємності, що впливають на абсолютну величину критичного значення $Re_{кр}$, яка характеризує опір проникнення полум'я. При пористості близько 40%, розмір часток спеченої перегородки 500 ... 600 мкм, при середньому розмірі пор близько 180 мкм і коефіцієнтові звивистості рівному 3, число Re становить 10^4 .

Аналіз технічних характеристик та технологічних параметрів обладнання для електродугового напилення показав, що найкращі показники має обладнання для активованого електродугового напилення, яке поєднало в собі переваги електродугового та високошвидкісного газотермічного напилення (табл. 3.3). З апаратів електродугового напилення (табл. 3.3) найбільш переважними з точки зору експлуатації, якості одержуваних покриттів та вартості є ручні та стаціонарні апарати для активованого електродугового напилення. В основі роботи установок процес плавлення дротів електричною дугою та розпилення розплавленого металу високошвидкісним струменем продуктів згоряння пропано-повітряної суміші. Стабільність ведення процесу, великий час невинної роботи гарантовано конструкцією апаратів.

У комплект установок для електродугового напилення входить: апарат для напилення, який комплектується сполучними кабелями та пультом керування, електричним блоком керування та блоком комутації; коробкою розподілу; повітряно-силовими рукавами; високовольтним дротом. Як джерело живлення добре зарекомендувало себе типове зварювальне джерело з жорсткою характеристикою.

До конструкційних переваг установок можна віднести: швидкознімні розпилювальні головки, що дозволяють вести процес у двох режимах активоване електродугове і електродугове напилення; легка і швидка заміна дротів і перехід з одного діаметра дроту на інший; висока електро- та термозахищеність; швидкий доступ до всіх вузлів апарата; прості та швидко замінювані струмознімальні елементи; заміна роликів, що подають, без

розбирання апарата; блочно-вузлове складання - швидке техобслуговування та ремонт. В апаратах активованого електродугового напилення використовуються відновлювальні транспортуючі гази з оригінальною подачею через профільовані сопла, камера згоряння в системі подачі газів, струмопідводи та розпилювальні сопла характеризуються особливим взаємним розташуванням.

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики обладнання для електродугової металізації та активованого електродугового напилення

| Показник | Електродуговий апарат | |
|---|-----------------------|--------|
| | Стаціонарний | Ручний |
| Продуктивність розпилення сталі, кг/год | 20,0 | 10,0 |
| Швидкість подачі дроту, м/хв. | 3,81-4,2 | 2...12 |
| Коефіцієнт використання матеріалу | 0,70 | 0,75 |
| Робочий струм, А | 500 | 400 |
| Витрата повітря при 0,6МПа, м ³ /год | 150 | 90 |
| Витрата пропан-бутану, кг/год | - | - |

Головна відмінна риса установок - наявність малогабаритної високоефективної камери згоряння пропано-повітряної суміші, яка використовується як транспортуючий газ. Надзвуковий струмінь пропано-повітряної суміші має на виході швидкість 1500 м/с при температурі 2200 К. Швидкісний напір потоку, що характеризує силу, що діє на частинку в потоці, становить традиційного електродугового напилення 75 кПа, а для встановлення активованого електродугового напилення - 234 кПа. Це дозволяє частинкам розплавленого металу розганяються в потоці до 500 м/с і формувати покриття,

що має міцність зчеплення вдвічі вище, ніж при традиційному електродуговому напиленні і достатнє для роботи в екстремальних умовах, у тому числі і за наявності ударно-абразивного зношування. Перевага пропонованої апаратури - робота камери згоряння на пропано-повітряній суміші, що значно знижує окислення металу, що напилюється, і вигоряння легуючих елементів [16].

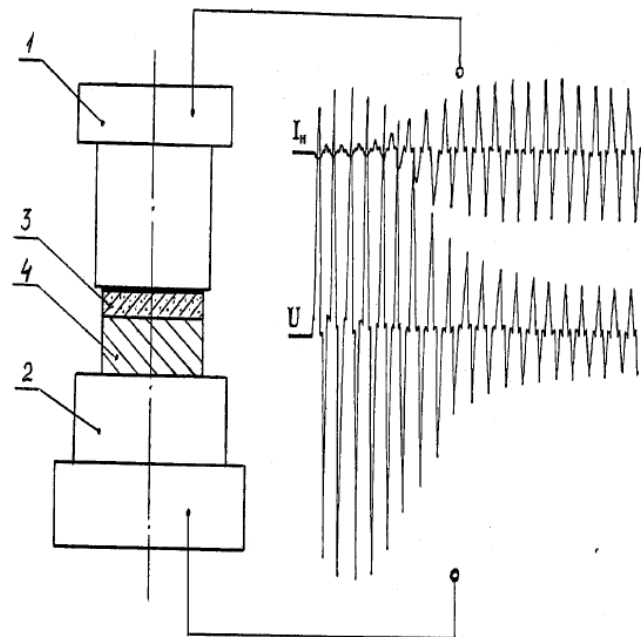
Таким чином, до основних переваг апаратів активованого електродугового напилення можна віднести: зниження окислення напилюваного матеріалу та вигоряння легуючих елементів; збільшення швидкості частинок напилюваного матеріалу та коефіцієнт використання матеріалу до 0,85. Оригінальна конструкція камери згоряння, використання ефективного каталізатора горіння, відсутність водяного охолодження камери та наявність пристрою автоматичного запалювання суміші суттєво підвищує надійність обладнання та полегшує роботу обслуговуючого персоналу.

3.3.2 Устаткування для електроконтактної обробки

Термосиловий вплив на напилений шар здійснювався на установці (рис. 3.3), яка включає модернізовану машину для точкового зварювання, пульт керування, операційний стіл, пристосування для встановлення та закріплення експериментальних зразків.

Для експериментальних досліджень використовувалися зразки діаметром 20...25 мм і товщиною 10...40 мм. Зразки з напиленим покриттям і вуглецевими наповнювачами поміщалися між двома електродами – пуансонами (рис. 3.3), комутованими з вимірювальним комплексом приладів. Електроди для експериментальних досліджень виготовлялися із міді МЗ. Для збільшення довговічності електрод охолоджувався водою через внутрішню порожнину [17]. Значення струму у вторинному контурі знімалися та фіксувалися амперметром. Запис параметрів струму та напруги здійснювався шлейфовим осцилографом. Дані осцилограми оброблялися на комп'ютері з графічною

побудовою зміни електричного опору напиленого шару в процесі електроконтактної обробки (рис. 3.3)



1, 2 – електроди; 3 – напилене покриття з наповнювачем ультрадисперсною алмазо-графітовою шихтою; 4 – основа

Рисунок 3.3 - Схема установки електроконтактної обробки

Технічна характеристика установки для електроконтактної обробки:

- 1) Максимальний струм, кА - 19 ± 1.9
- 2) Максимальна споживана потужність, кВА - 124 ± 12
- 3) Максимальне завантаження, кгс - 630
- 4) Час обробки, с - 1 ... 198
- 5) Продуктивність, деталей/година - > 20
- 6) Розміри, мм - 760x1970x590
- 7) Маса, кг - 360

3.4 Дослідження мікроструктури та фазового складу сталей мартенситного та феритного класів після електроконтактної обробки

Дослідження мікроструктури проводилося на нетравлених і травлених шліфах за допомогою оптичного мікроскопу при збільшенні $\times 100$, $\times 200$, $\times 500$. Травлення шліфів виконували в 4%-ному спиртовому розчині азотної кислоти. На шліфах виконували виміри твердості за Роквеллом та Віккерсом і фіксували макроструктуру та здійснювали металографічні дослідження мікроструктури. Для дослідження фазових та структурних перетворень у напилених шарах при електроконтактній обробці використовувався рентгеноструктурний аналіз [18]. Рентгенівська зйомка здійснювалася на дифрактометрі в монохроматизованому випромінюванні. Запис дифракційних ліній здійснювався як сканування. Крок сканування - $0,1^\circ$, час набору імпульсів у точці 10 с. Зразки для структурно-фазових досліджень (10 x 6 x 5 мм) вирізалися із пластин (100 x 50 x 6 мм), виготовлених зі сталі 45 з напиленими шарами з дротяних сталей 40X13 та Св-08. З метою підвищення міцності зчеплення покриття з основою наносився проміжний шар напиленням дроту зі сплаву X20H80. Перед рентгенівською зйомкою та вимірюванням твердості проводилося шліфування зразків покриттів на наждачному папері з розміром зерна 18–24 мкм. Вміст залишкового аустеніту визначалося за такою формулою:

$$Q_\gamma = \frac{100}{1 + 0,74 \frac{S_a}{S_\gamma}} \quad (3.2)$$

де S_a та S_γ – площі поверхні під дифракційними лініями $(110)_{\alpha\text{-Fe}}$ та $(111)_{\gamma\text{-Fe}}$, обмеженими лініями фону.

3.5 Методика дослідження пористості покриттів

Визначення пористості є основним засобом оцінки якості покриттів [19]. Пористість визначали кількісним стереологічним аналізом на атестованому автоматичному аналізаторі зображення, за спеціальною програмою. Основними етапами аналізу зображення є: калібрування зображення, фіксація зображення, сегментування, пористість. Калібрування зображення проводиться для масштабування. В програмі калібрування здійснюється за розміром μ -штриху на електронному зображенні. Відзначаючи початкову та кінцеву довжину, отримуємо масштабний коефіцієнт для зображення. Фіксація - перетворення зображення на електричний сигнал, який придатний для цифрової обробки та запам'ятовування. Сегментування «відокремлює» досліджувані об'єкти (пори) від фону. В результаті формується двійкове зображення, кожен елемент якого може перебувати лише в одному стані - досліджуване або фонове. Для додаткового налаштування зображення в ручному режимі використовується операція редагування.

Методика визначення розміру пор складається з наступних етапів: 1) обрахунок пор із зображення, отриманого на світловому мікроскопі; 2) подання результатів кількісного аналізу за спеціальною програмою.

Програма дає можливість статистичного аналізу результатів за будь-яким із заданих вимірювань та побудови гістограм за будь-яким із виміряних параметрів з бажаним кроком.

Формули математичної статистики, що застосовуються при отриманні статистичних даних в аналізаторі зображення за програмою Results представлені нижче:

1. Математичне очікування (середнє арифметичне) - $x = \frac{\sum x}{n}$

2. Середнє геометричне - $G = (\prod x)^{\frac{1}{n}}$

3. Середнє гармонійне - $H = \frac{n}{\sum \frac{1}{x}}$

4. Дисперсія (варіація) вибірки - $S^2 = \frac{\sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}$

5. Середнє квадратичне відхилення вибірки - $S = \sqrt{S^2}$

6. Дисперсія сукупності - $\sigma^2 = \frac{\sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}$

7. Середнє квадратичне відхилення сукупності - $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$

8. Стандартне відхилення від середнього - $\sigma_x = \frac{S}{\sqrt{n}}$

9. Відносна помилка - $\frac{\sigma_x}{x}$

10. Асиметрія - $\frac{\sum x^3 - 3x \sum x^2 + 2x^3 n}{n}$

11. Екссес - $\frac{\sum x^4 - 4x \sum x^3 + 6x^2 \sum x^2 - 3x^4 n}{n}$

3.6 Методика визначення міцності зчеплення покриттів

Вимірювання мікротвердості проводилося на мікротвердомірі з навантаженням 100 г протягом 10 с від краю поверхні покриття до основи із захопленням перехідної зони.

Відповідно до, міцність зчеплення покриття з основою (адгезійна міцність) – напруження, яке відповідає найбільшому навантаженню, що передує відділенню покриття від основи. Міцність покриття (когезійна міцність) – напруження, яка відповідає найбільшому навантаженню, що передує руйнуванню зв'язків між частинками покриття та (або) самого матеріалу частинок. В питаннях дослідження когезійної та адгезійної міцності газотермічних покриттів, основну увагу приділено останній. Це, очевидно,

пов'язано з тим, що при експлуатації газотермічних покриттів мають місце відшарування покриттів від матеріалу основи, і тому сформувалася думка, що адгезійна міцність для газотермічних покриттів є лімітуючим параметром. Адгезійна міцність сприймається як основа теорії зношування, як визначальна зносостійкість. Методи прямої кількісної оцінки забезпечують оцінку адгезії у фізичних одиницях, розуміючи під міцністю зчеплення роботу чи зусилля, мінімально необхідні повного видалення покриття з контактної поверхні.

Одним із основних способів визначення міцності з'єднання покриття з основним металом вважається штифтовий метод, що дозволяє проводити випробування безпосередньо після нанесення покриття на зразки. Зразком служить шайба, в отвір якої встановлюється штифт таким чином, що його торцева поверхня перебувала врівень з площиною основи шайби. На загальну поверхню торця штифта та шайби після відповідної підготовки наноситься покриття. Випробування проводять шляхом витягування штифта із шайби із записом зміни зусилля. Після відриву штифта від покриття визначають відношення максимального навантаження до площі штифта торця. Це є кількісною характеристикою з'єднання покриття з основою. Випробування покриттів здійснювалися на вдосконалених зразках, у яких штифт та отвір у шайбі мали форму конуса. Така форма штифта поряд з винятком впливу сил тертя зменшує зазор у з'єднанні та підвищує точність виміру. Метод виміру міцності зчеплення конічним штифтом більш точний. Методика конічного штифта забезпечує визначення адгезійної міцності при зсуві і відриві.

Однак штифтовим методам притаманні певні принципові недоліки: невідповідність напруженого стану покриття при експлуатаційному випробуванні, малоінформативність. Тому міцність зчеплення напилених покриттів також визначали за методикою випробувань матеріалів з покриттям, що отримала назву "методики складеного перерізу". Методика передбачає проведення навантаження із записом величини зусилля, а також даних тензометрування частин зразка з покриттям та без нього до моменту візуальної реєстрації руйнування покриття. Під час дослідження використовувався

стандартний плоский зразок для випробувань на розтяг з покриттям. По-перше, плоский зразок, на відміну від круглого, зручніший для наклейки тензодатчиків. По-друге, плоский зразок технологічніший для нанесення покриттів. На плоскому зразку легше контролювати товщину покриття, що важливо з огляду на сильну залежність міцності зчеплення системи «покриття-основа» від товщини покриття. До зразка кріпили датчик акустичної емісії. Явище акустичної емісії було використано під час реєстрації граничного стану зразка з покриттям, тобто визначення критичної деформації. Зразок з тензодатчиками, наклеєними на основу та покриття, встановлюють у захвати розривної машини.

Величина розтягувальних зусиль фіксувалася динамометром, що має три шкали, відповідно діапазнам з максимальними навантаженнями: 200 кг, 500 кг, 1000 кг. Передача зусилля під час навантаження зразка здійснюється за допомогою реверсивного редуктора з варіатором від електродвигуна. Тензодатчики деформацій підключалися до тензометричної системи за допомогою дротів, що екрануються. Система складається з блоку вимірювань, блоку дистанційного релейного перемикачання, друкуючого пристрою та працює в режимі ручного керування. Для реєстрації настання граничного стану системи «основа-покриття» у роботі використовувався пристрій акустичної емісії [20]. Амплітудні та частотні характеристики реєстрованого сигналу записувалися п'ятиканальним самописцем. Для зручності роботи з установкою усі основні функції керування виведені на пульт дистанційного керування.

3.7 Методи математичного планування експерименту та обробки статистичних даних результатів досліджень

Для комплексної оцінки властивостей сталевих зносостійких покриттів, що створюються, задача оптимізації схем і режимів розглядається як багатофакторна (з урахуванням конструкційних, технологічних та експлуатаційних факторів) і багатокритеріальна (з використанням декількох

критеріїв – комплексу фізико-механічних властивостей). З метою скорочення експериментальних робіт, отримання максимальної інформації з проведених експериментів, а також з урахуванням можливості керування параметрами процесу створення покриттів, були використані методи багатофакторного планування експерименту та математичної обробки статистичних даних. Такий підхід дає можливість подати технологічний процес у вигляді функціональної залежності вхідних та вихідних параметрів. Ця залежність визначає оптимальні режими, що забезпечують максимальні (або мінімальні) значення вихідних параметрів. Для ефективного аналізу явищ та керування процесом створення покриттів, взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, та його результатів представлено у кількісній формі – у вигляді математичної моделі.

З урахуванням недостатніх відомостей про механізми процесу та параметри, що визначають умови його протікання, при побудові математичної моделі процесу створення покриттів обмежилися схематичним, спрощеним поданням об'єкта досліджень, коли математичною моделлю об'єкта досліджень є сукупність співвідношень виду:

$$Y_{\text{мод}}=f(X_i, Y_j, Z_r) \quad (3.3)$$

де $Y_{\text{мод}}$ – вихідний параметр (критерій оптимізації);

X_i - сукупність значень вхідних параметрів, які контролюються та керуються;

Y_j - вхідні параметри, які контролюються, але не керуються;

Z_r - вхідні параметри, які керуються і контролюються.

У практиці використовують $X_i = \text{var}$ при фіксованих параметрах $Y_j = \text{const}$ та $Z_r = \text{const}$. Параметр оптимізації Y представлений як функції:

$$Y_{\text{мод}}=f_{\text{опт}}(X_i=\text{var}, Y_j=\text{const}, Z_r=\text{const}) \quad (3.4)$$

при $X_{iH} \leq X_i \leq X_{iB}$.

Статистичною математичною моделлю об'єкта є функція відгуку, яка пов'язує параметр оптимізації Y , що характеризується результатами експерименту, зі змінними параметрами X_i , якими варіюють при проведенні експерименту:

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (3.5)$$

Незалежні змінні X_i називають факторами, координатний простір з координатами X_1, X_2, \dots, X_k - факторним простором, а геометричне зображення функції відгуку у факторному просторі – поверхнею відгуку. При обмежених знаннях про механізми процесу створення покриттів аналітичний вигляд функції відгуку невідомий. Тому уявлення функції відгуку обмежують поліномом:

$$Y^* = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i<jj<l}^k b_{ijl} X_i X_j X_l \quad (3.6)$$

де Y^* - розрахункове значення параметра оптимізації,

b_0, b_i, b_{ii}, b_{jj} - вибіркові коефіцієнти, які можна отримати методами регресійного аналізу, використовуючи результати експерименту

Математичне моделювання включає такі етапи: вибір керованих параметрів та рівнянь варіювання їх значень; вибір критеріїв оптимізації; побудова робочої матриці проведення досліджень; побудова математичних моделей за результатами проведених досліджень; проведення статистичного дослідження цих моделей та обчислювального експерименту; порядок проведення оптимізації.

Побудова плану експерименту проведена відповідно до рекомендацій робіт. Використано план експерименту, згенерований на основі чисел, з використанням необхідного математичного апарату. Ці плани мають низку переваг:

- при «випадінні» одного з експериментів властивості плану погіршуються в межах, що дозволяють його використовувати;
- ці плани одночасно є і планами пошуку оптимальних умов і дозволяють глибше аналізувати досліджувану область;
- плани на основі чисел можуть бути використані як послідовні, тобто. витрати можуть збільшуватися поступово та попередні результати поєднуються з подальшими.

Конструювання плану експерименту проведено за допомогою пакета прикладних програм (планування, регресія та аналіз моделей). Наступним етапом було проведення експериментів відповідно до генерованої робочої матриці плану. Після проведення експериментів проведено аналіз його результатів. Розраховані середні значення відгуку та дисперсія за кожним експериментом. У пакета прикладних програм реалізована спеціально розроблена адаптивна процедура визначення структури, яка є частиною технології і має високу ефективність. Адекватність, відтворюваність та інформативність моделі оцінювали G-критерієм Кохрена, F-критерієм Фішера, критерієм Стьюдента, коефіцієнтом кореляції R.

Для пошуку оптимальної точки на основі експериментальних даних будують багатофакторні математичні моделі критеріїв оптимізації та проводять багатопараметричну оптимізацію за цими моделями. Якщо поставлено кілька критеріїв оптимізації, то їх загальні значення вибирають використовуючи принцип компромісу по Паретто. Ідея компромісу по Паретто полягає у пошуку таких умов функціонування системи, за яких узагальнений критерій її оптимальності досяг екстремального значення. Для визначення найкращої точки використовували функцію пакету прикладних програм «багатопараметрична оптимізація» [21].

Оцінку точності експериментальних результатів, що містять систематичні та випадкові помилки, проводили за допомогою методів теорії ймовірностей та математичної статистики наступним чином:

вибіркове середнє

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.7)$$

де x_i – результат i -го виміру;

n – число вимірів;

вибіркова дисперсія

$$S = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.8)$$

сумарна помилка

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{np}^2 + \sigma_{вдл}^2 + \sigma_{обч}^2} \quad (3.9)$$

де σ_{np} – похибка приладу;

$\sigma_{вдл}$ - похибка відліку;

$\sigma_{обч}$ - похибка обчислень.

Систематична помилка не оцінювалася. При $s > 3\sigma_{\Sigma}$ суттєві лише випадкові помилки. Тоді можна обчислити напівширину інтервалу, задавшись коефіцієнтом довіри α

$$\Delta x = t_{\alpha, n-1} \cdot s \quad (3.10)$$

де $t_{\alpha, n-1}$ - коефіцієнт Стьюдента.

Відносна похибка вимірювання

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} 100\% \quad (3.11)$$

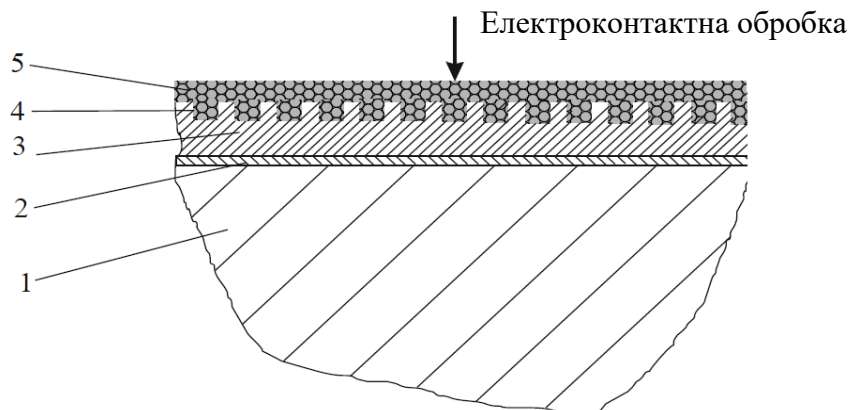
Довірчий інтервал

$$\mu = \bar{x} \pm \Delta x \quad (3.12)$$

4 СПОСІБ СТВОРЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ СТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ ГАЗОТЕРМІЧНИМ НАПИЛЕННЯМ І ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОЮ ОБРОБКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ВУГЛЕЦЕВМІСНИХ НАПОВНЮВАЧІВ

4.1 Схема нанесення зносостійкого газотермічного покриття та технологічні методи його формування

Схема створення зносостійкого покриття розпиленням сталевих дротів з подальшою електроконтактною обробкою та використанням вуглецевмісних наповнювачів і без них (рис. 4.1).



1-основа (сталь Ст. 3); 2 - підшар (сталь Х20Н80); 3 - пористе покриття газополуменевим напиленням і електродуговою металізацією з дротяних сталей 40Х13, Св-08; 4 – пори у поверхневому шарі покриття 3; 5 – вуглецевмісні наповнювачі (колоїдний графіт, ультрадисперсна алмазно-графітова шихта)

Рисунок 4.1 - Схема зносостійкого покриття

Покриття за схемою, наведеною на малюнку 4.1, отримували наступним чином. На торцевих поверхнях циліндричних зразків ($\varnothing 10$ мм і висотою 8 мм) із сталі Ст.3 напиляли покриття з дротяних сталей 40Х13 і Св-08 [77] за наступними режимами: 1) газополуменеве напилення - розпилення металу, розплавленого у факелі пропано-кисневого полум'я, повітряним струменем; 2)

електродугове наплення - розпилення металу, розплавленого в електричній дузі струменем продуктів згорання пропано-повітряної суміші (1/25).

Електроконтактна обробка напилених покриттів здійснювалася на установці, де регульованими параметрами технологічного процесу електроконтактної обробки був струм, його тривалість та зусилля стиснення електродів. Ці параметри змінюються за заданою програмою, що залежить від геометричних параметрів шару, властивостей матеріалів і ряду інших факторів. Відпрацювання технологічних параметрів електроконтактної обробки проводилося на базі установки з модернізованим блоком керування за схемою представленою на рис. 4.2.

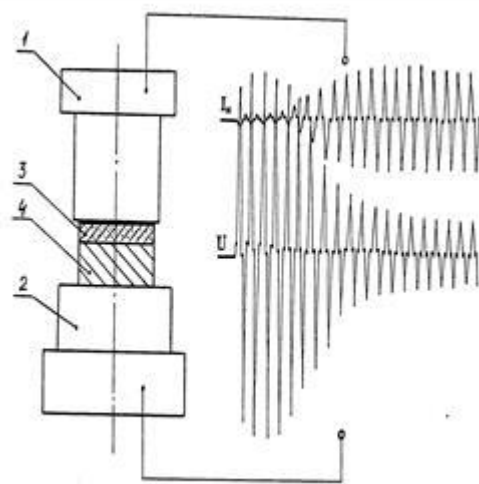


Рисунок 4.2 - Електроконтактна обробка напилених зразків

Технологічні схеми формування покриття, представленого рис 4.1 полягають у наступному (табл. 4.1, 4.2):

1) газополуменеве і електродугове наплення дротяних сталей Св-08 та 40Х13 з подальшою електроконтактною обробкою (табл. 4.1);

2) газополуменеве і електродугове наплення дротяних сталей Св-08 та 40Х13 з використанням вуглецевмісних наповнювачів та електроконтактної обробки.

Одну партію напилених зразків відповідно до схеми 1 та таблиці 4.1. обробляли електроконтактним методом, другу партію - електролітичним поліруванням – схема 2 (табл. 3.2).

Таблиця 4.1 - Технологічна схема 1. Методи та режими формування зносостійких покриттів газотермічним напиленням і електроконтактною обробкою

| Метод | Режими | | | |
|--|-------------------------|------------------|------------------------------------|--------------------------|
| | Тип покриття | Горюча суміш | Відстань, мм | Товщина шару, мм |
| Газотермічне напилення (нанесення покриття) | 40X13 | Ацетилен+ кисень | 150,0 | 1,0-1,2 |
| | Струм нагрівання, I, кА | Тиск, МПа | Час нагрівання, T _н , с | Час імпульсів-пауз, t, с |
| Електроконтактна обробка (як з вуглецевими модифікаторами так і без них) | 3,5 | 20,0 | 8-10 | 0,02÷0,04 |

Метою електрохімічної обробки було розкриття пор для більш глибокого насичення вуглецевих наповнювачів. Після напилення та електрополірування зразки обробляли ультразвуком у суспензії з колоїдним графітом і ультрадисперсною алмазно-графітовою шихтою (розмір частинок 0,03...0,1 мкм).

Для відновлення високої активності частинок ультрадисперсної алмазно-графітової шихти та її структуроутворюючої здатності конгломерати перед введенням у шихту необхідно було дезінтегрувати. Руйнування конгломератів досягалося обробкою ультрадисперсної алмазно-графітової шихти у спирті з накладенням ультразвукових коливань. У перші 5-10 хвилин ультразвукового впливу спрацьовуються всі оголені стики між зернами, що призводить до максимального диспергування. Ультрадисперсну алмазовмісну шихту, попередньо відпалену при температурі 100-200⁰С протягом 1-2 годин, завантажували у ванну (склянку, камеру), дном якої служив торець випромінювача ультразвуку. Обробка здійснювалася у колоїдному графіті протягом 10 хв. Встановлювали частоту 44 кгц, потужність 0,3 А.

Таблиця 4.2 - Технологічна схема 2. Методи та режими формування зносостійких покриттів газотермічним напиленням з використанням вуглецевмісних наповнювачів та електроконтактної обробки

| Метод | Режими | | | |
|--|---|-----------------------------|--------------------------------------|---|
| | Тип покриття | Горюча суміш | Відстань, мм | Товщина шару, мм |
| Газотермічне напилення (нанесення покриття) | 40X13 | Ацетилен+ кисень | 150,0 | 1,0-1,2 |
| | Склад електроліту | Температура електроліту, °С | Густина струму, J, А/см ² | Час, хв |
| Електрохімічне полірування (відкриття пор) | H ₃ PO ₄ (760 г) + CrO ₃ (100 г) | 40-50 | 0,5 | 10,0 |
| | Тип модифікатора | Частота коливаний, Гц | Час, хв | Середовище обробки |
| Ультразвукова обробка | Порошок ультрадисперсної алмазно-графітової шихти, 0,5%об | 44,0 | 7,0-8,0 | Спирт етиловий C ₂ H ₅ OH |
| | Струм нагрівання, I, кА | Тиск, МПа | Час нагрівання, T _н , °С | Час імпульсів-пауз, t, с |
| Електроконтактна обробка (як з вуглецевими модифікаторами так і без них) | 3,5 | 20,0 | 8-10 | 0,02÷0,04 |

Вміст ультрадисперсної алмазно-графітової шихти в отриманій суміші становило трохи більше 0,5%. Ультразвукова обробка дозволяє отримувати більш рівномірне та однорідне укладання частинок в результаті впливу ультразвукових коливаний з частотою 22-44 кГц. В результаті ультразвукової обробки відбувається руйнування дефектних частинок, що дозволяє отримати більш однорідні за розмірами та властивостями суміші компонентів. Отримані суміші не мають суттєвих забруднень порівняно з обробкою їх у кульовому млині або іншому змішувачі. Оброблений у такий спосіб порошок ультрадисперсної алмазно-графітової шихти наносили на покриття, де утворювалася тонка плівка толуолу та колоїдного графіту з диспергованими частинками ультрадисперсного алмазу.

Під впливом ультразвуку наповнювачі насичували напилене покриття на глибину 0,5...0,8 мм. Потім зразки сушили та обробляли електроконтактним

методом шляхом їх розташування між двома електродами установки (рис. 4.2). Тиск на електроді становить 10-60 МПа, величина струму – 2-16 кА, час імпульсу-паузи – 0,02-0,04 с. Час нагріву перебуває в межах 8-15 с. Електроконтактна обробка сприяє процесу дифузії вуглецевмісних наповнювачів у структуру покриття.

Таким чином, у роботі запропоновано спосіб газополуменевого і електродугового напилення з подальшою електроконтактною обробкою та використанням вуглецевмісних наповнювачів (колоїдний графіт, ультрадисперсна алмазно-графітова шихти) як один з найбільш ефективних шляхів вирішення задачі підвищення зносостійкості деталей машин, що експлуатуються при підвищених питомих навантаженнях. Графіт здатний знижувати абразивне зношування. Введення графіту дає синергетичний ефект запобігання зношування у присутності пилу. Для інтенсифікації процесу підробітку та підвищення триботехнічних властивостей покриттів було запропоновано використовувати колоїдний графіт з нанорозмірними наповнювачами (ультрадисперсним алмазом). Високошвидкісне електроконтактне нагрівання у поєднанні з тиском сприяє процесу дифузії вуглецевих наноконпонентів у структуру покриття з утворенням атомомолекулярних зв'язків з основними складовими (компонентами) покриття. Електроконтактна обробка дозволяє отримувати в тонкому поверхневому шарі нанорозмірну комірчасту субструктуру на основі колоїдного графіту з включеннями вуглецевмісних наповнювачів, які можуть не тільки підвищувати зносостійкість, але й відігравати роль твердого мастила [22]. Електроконтактна обробка дозволяє звести до мінімуму їх механічну обробку.

4.2 Вибір режимів газополуменевого напилення дротяних сталей феритного та мартенситного класів

При газополуменовому напиленні матеріал, що напилюється, подається у високотемпературну зону полум'я у вигляді дротів зі сталей Св-08 (феритного

класу) і 40X13 (мартенситного класу), нагрівається у факелі до плавлення, розпорошується потоком стисненого повітря, і у вигляді частинок розміром 10 ... 50 мкм переноситься на поверхню деталі, формуючи покриття. Джерелом теплової енергії при газополуменовому напиленні є газове полум'я, що утворюється в результаті горіння суміші кисень - горючий газ (ацетилен, пропан-бутан, природний газ тощо). Апарат для газополуменового напилення з пультом керування забезпечує безперервну роботу протягом 8 год. Витрата ацетилену трохи більше 1,3 м³/год, пропан-бутану трохи більше 3 м³/год, стиснутого повітря трохи більше 40 м³/год, кисню трохи більше 6 м³/год.

Напилення здійснювалося безпосередньо після підігріву поверхні, що зміцнюється. Матеріал підкладки – сталь Ст.3. Проміжний шар був сформований розпиленням дроту зі сплаву X20H80 товщиною 0,05...0,15 мм. Напилення покриття здійснювалося відразу після підготовки поверхні, включаючи попереднє нагрівання та напилення підшару. Температура розпилювального факела не перевищувала 3000 К. Швидкість польоту частинок, що напилювалися, становила: 100...130 м/с. Розміри частинок, з яких формувалися покриття, знаходилися в межах 10...40 мкм. Товщина покриття становила 0,25...0,8 мм.

До основних параметрів процесу газополуменового напилення відноситься дистанція напилення. Вона визначає інтенсивність нагрівання поверхні основи високотемпературним газовим струменем та співвідношення температури та швидкості частинок матеріалу перед контактом з поверхнею, що напилюється. На рис. 4.3 показана залежність швидкості та температури газополуменового струменя та частинок матеріалу дроту із сталі 40X13 від дистанції напилення. Із збільшенням дистанції напилення міцність зчеплення покриття з основою спочатку росте, а потім зменшується. Мінімальні значення пористості відповідають дистанціям напилення, на яких досягається максимальна міцність зчеплення покриття із основою.

Витрата матеріалу дротів, що розпилюються, - один з основних параметрів технологічного процесу газополуменового напилення. Він визначає

продуктивність процесу та властивості покриття. У реальних умовах роботи апарату для газополуменевого напилення при нанесенні покриттів із дротів сталей Св-08 та 40Х13 типів встановлено лінійне зниження міцності зчеплення покриття, а також підвищення пористості із збільшенням витрат матеріалів напилюваних дротів.

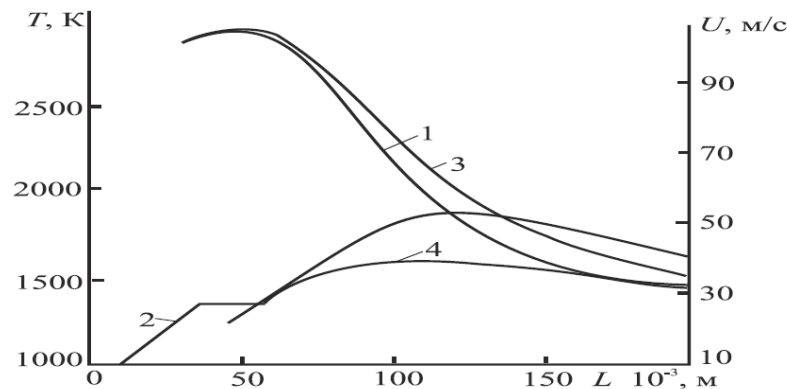


Рисунок 4.3 - Залежності температури (1, 2) та швидкості (3, 4) газополуменевого струменя (1, 3) та частинок (2, 4) розпилюваного матеріалу дроту 40Х13. Режим напилення: тиск – 0,1 МПа; витрата ацетилену - 1,0 м³/годину; витрата кисню - 0,9 МПа; тиск стисненого повітря – 0,16 МПа; витрати ацетилену - 2,00 м³/год кисню - 0,5 м³/годину

Керуючи швидкістю частинок шляхом зміни робочих режимів терморозпилювача або дистанції напилення, можна наносити покриття з різною пористістю та міцністю зчеплення. Найбільший вплив на швидкість польоту частинок дротів, що розпилюються, і їх розмір надає витрата повітря. Встановлено, що витрата повітря, що розпилює, впливає на швидкість польоту та формування частинок дрібних фракцій тільки до значень 0,232...0,35 м³/хв (рис. 4.4). Подальше підвищення витрати повітря призводить до помітного зростання швидкості частинок (рис. 4.4).

З графіків на рис. 4.4 видно, що найбільш оптимальні значення витрати повітря перебувають у межах 0,32...0,40 м³/хв, при цьому розпилення сталевих дротів забезпечує наступний гранулометричний склад: від 5 до 10 мкм – 40%,

від 10 до 15 мкм – 33%, від 15 до 40 мкм – 20%, від 40 до 50 мкм - 5%, від 50 до 100 мкм - 2%.

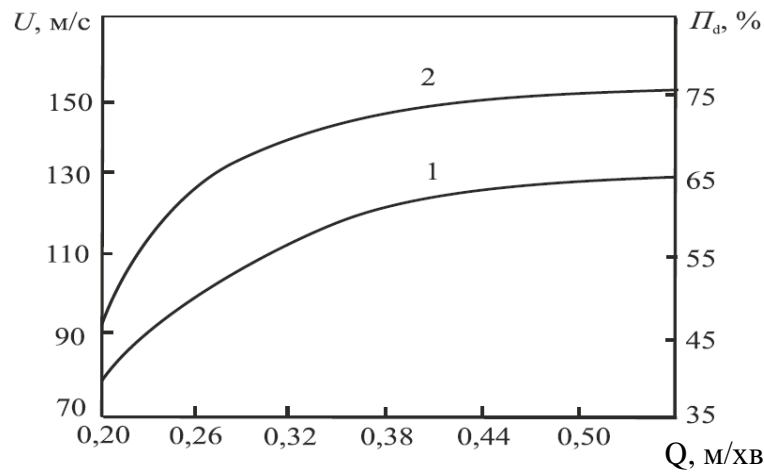


Рисунок 4.4 - Вплив витрати повітря на швидкість польоту і кількість частинок розміром менше 15 мкм розпилюваних сталевих дротів 50X13 (1) та Св-08 (2) діаметром 2 мм (використовувалися середні значення)

Щільність покриття та міцність його зчеплення з основою значною мірою визначається розміром частинок напилюваного матеріалу. Для отримання дрібнодисперсного розпилювання, крім точного дотримання режимів напилення, потрібна суворя відповідність глибини камери під повітряною головкою (обтискним соплом) матеріалу, що розпилюється, і застосовуваного пального газу, тобто певна довжина зони впливу газових потоків на дріт. Це пояснюється тим, що при напиленні дротяних матеріалів, що мають різну температуру плавлення та діаметр, а також при застосуванні різних горючих газів плавлення дроту відбувається на різній відстані від торця соплового наконечника [23].

На підставі проведених досліджень процесу газополуменевого напилення дротяних сталей Св-08 та 40X13 визначено його раціональні режими та режими газополуменевого напилення цих же матеріалів під електроконтактну обробку:

- витрати кисню, пального та транспортуючого газу: витрата кисню $G_T = 0,5...2,5$ м³/год, пального газу 0,3...0,6 м³/год, повітря 3,0...5,0 м³/год (повітря використовували як транспортуючий газ);

- тиск кисню, пального та транспортуючого газу: тиск кисню $P_{O_2} = 0,15-0,5$ МПа, пального газу - $P_{Г} = 0,03-0,05$ МПа, повітря - $P_{пов.тр} = 0,1 \dots 0,2$ МПа;
- співвідношення кисню до пального газу: для ацетилено-кисневої суміші $\beta = V_{O_2}/V_{C_2H_2} = 1,1 \dots 1,4$; пропан-кисневої суміші $\beta = V_{O_2}/V_{C_3H_8} = 3,5 \dots 4,0$;
- діаметр дроту становив від 1,0 до 5,0 мм, швидкість подачі дроту знаходилася в межах 1,0 ... 0,15 м / с;
- дистанція напилення для дротів зі сталей Св-08 і 40Х13 і устаткування, що використовується, перебувала в межах 100-200 мм, встановлювалася дослідним шляхом;
- швидкість відносного переміщення струменя та виробу становила 10...15 м/хв;
- подача апарату для газополуменевого напилення була в межах 6...16 мм/об., вісь сопла апарата спрямована під кутом 60-90° до поверхні, що напилюється;
- швидкість частинок становила 20 ... 100 м / с.

4.3 Електродугове напилення сталевих дротяних матеріалів

Сутність процесу електродугового напилення полягає в плавленні дроту електричною дугою та розпиленні розплавленого металу стисненим повітрям. Принципова схема процесу електродугового напилення проста і може бути представлена в такий спосіб. Через два канали в розпилювальній головці подають два дроти, між кінцями яких збуджується електрична дуга. З центрального каналу головки апарату для електродугового напилення витікає струмінь стисненого газу (повітря), який розпорошує розплавлений метал дротів і транспортує його у вигляді потоку частинок до поверхні, що покривається.

Для електродугового напилення використовують джерела постійного електричного струму, що забезпечують робочий струм від 350 до 800 А при напрузі від 17 до 45 В. Основними технологічними параметрами

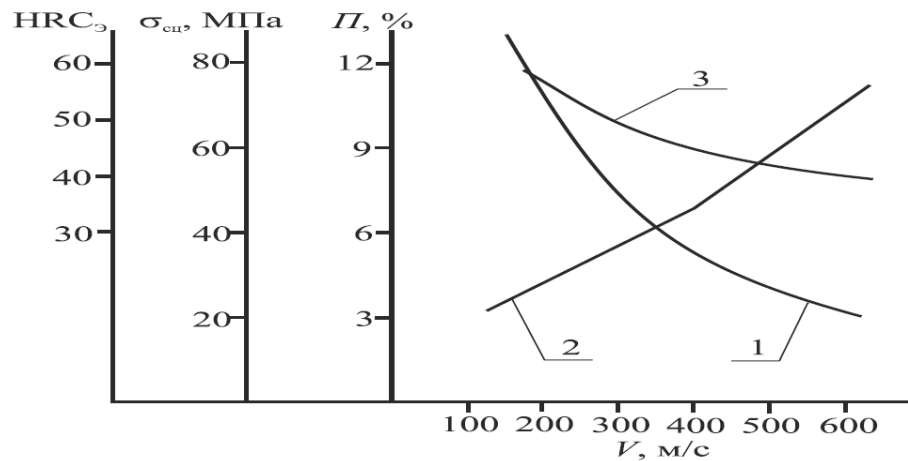
електродугового напилення є: склад, діаметр і швидкість подачі дротів, що розпилюються; потужність дуги, витрата газу, дистанція напилення, швидкість переміщення плями напилення.

Електродугове напилення характеризується великою кількістю факторів, які впливають на структуроутворення та властивості покриттів. Доцільно виділити первинні (технологічні фактори), що стосуються технології та умов напилення та вторинні, які є похідними від технологічних факторів. До первинних факторів доцільно віднести:

- фактори, що стосуються режимів напилення: величина зварювального струму, вид, тиск і витрата газу, що розпилює, діаметр і форма сопла;
- фактори, що стосуються умов напилення: схема системи потоку газу; дистанція напилення; швидкість переміщення апарату для напилення;
- фактори, що стосуються напилюваного матеріалу: діаметр, хімічний склад, будова та швидкість подачі дроту;
- фактори, що стосуються умов підготовки напилюваної поверхні: матеріал, спосіб підготовки, шорсткість поверхні.

Вищезазначені первинні фактори визначають вторинні фактори, які впливають на кінетику та структуроутворення покриттів. До них можна віднести: діаметр, швидкість і температура частинок, ступінь їх окислення; ступінь активації, шорсткість та температура підкладки.

Основними фізико-механічними властивостями покриттів, отриманих електродуговим напиленням, що впливають на їх зносостійкість, є твердість, міцність зчеплення та пористість. Дослідження впливу параметрів електродугового напилення на властивості покриттів показали (рис. 4.5), що адгезія покриття зі збільшенням швидкості витікання повітря, і, отже, швидкості витікання струменя, підвищується, а пористість знижується. При витіканні повітря з дозвуковою швидкістю розмір розплавлених частинок у середньому становить 200 мкм.



1 - пористість ($П, \%$); 2- міцність зчеплення ($\sigma_{зч}, \text{ МПа}$); 3- твердість (HRC_e)

Рисунок 4.5 - Вплив швидкості витікання повітря із сопла ($V, \text{ м/с}$) на властивості покриттів при електродуговому напиленні

Зі збільшенням швидкості витікання повітря розмір розплавлених частинок на 90% перебуває у діапазоні 30—80 мкм. Однак таке зменшення розміру розплавлених частинок матеріалу, що напилюється, веде до вигорання з них легуючих елементів, в першу чергу вуглецю, що обумовлює знижену твердість покриттів. Використання в якості розпилювального газу продуктів згорання пропано-повітряної суміші та варіювання витрат пропану та повітря дозволяє створювати нейтральну або відновлювальну атмосферу в зоні плавлення електродного дроту і тим самим знижувати окислення металу та вигорання легуючих елементів.

Результати досліджень показали, що діаметр дроту при електродуговому напиленні впливає на умови формування металоповітряного струменя. При зниженні діаметра дроту менше 1,2 мм спостерігається погіршення стабільності процесу через зміну положення точки схрещування дротів. Було встановлено, що оптимальним є діапазон діаметрів 1,2...2,0 мм.

Якість покриттів та властивості значною мірою залежать від тиску розпилювального газу та дистанції напилення. Підвищення тиску сприяє збільшенню адгезії покриття та зниженню пористості. Дистанція напилення є

одним із важливих технологічних факторів при електродуговому напиленні. З одного боку підвищення дистанції сприяє підвищенню швидкості частинок, з іншого призводить до підвищеного окислення частинки та зниження її температури. Оптимальний діапазон дистанції напилення згідно з результатами досліджень [24] перебуває в діапазоні 80...150 мм (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 - Властивості покриттів в залежності від дистанції напилення

| Властивості покриття | Відстань від сопла до деталі, мм | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|
| | 30 | 50 | 75 | 100 | 120 | 200 | 300 |
| Міцність зчеплення, МПа | 15 | 18 | 19 | 21 | 22 | 22 | 19 |
| Вміст оксидів в покритті, % | 10 | 12 | 13 | 15 | 16 | 25 | 30 |

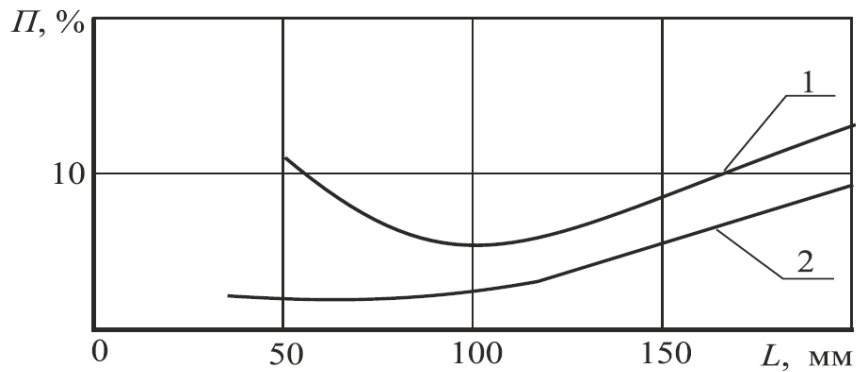
У таблиці 4.4 наведено характеристику сталевих покриттів, отриманих електродуговим напиленням.

Таблиця 4.4 - Характеристики сталевих покриттів, отриманих електродуговим напиленням

| Найменування характеристики, розмірність | Значення |
|--|-----------------------------|
| Мікротвердість, МПа | HV800 |
| Контактні навантаження, МПа | до 100 при наявності ударів |
| Ступінь окислення покриття, % | до 3 |
| Міцність зчеплення, МПа | 60-70 |
| Товщина покриття, мм | 0,5-4,0 |
| Термічне знеміцнення | не відбувається |

На рис. 4.6 показано залежність пористості покриттів електродуговим напиленням від дистанції напилення при різних швидкостях переміщення апарату для напилення. Мінімальна пористість покриттів досягається на

коротких дистанціях напилення (50...60 мм). Для дослідження пористості покриттів, отриманих електродуговим напиленням, готувалися шліфи.



1 - $P_r = 0,6$ МПа; $V_m = 0,2$ м/с; 2 - $P_r = 0,6$ МПа; $V_m = 0,6$ м/с

Рисунок 4.6 - Залежність пористості покриттів від дистанції напилення при різних швидкостях переміщення електродугового апарату

Збільшення швидкості переміщення апарату для напилення веде до помітного зниженню пористості покриттів, одержуваних на коротких дистанціях ($L_H < 80...90$ мм). Слабкий вплив швидкості переміщення апарату для напилення на величину пористості на дистанціях напилення $L_H > 80...90$ мм є наслідком зниження аеродинамічного впливу струменя та охолодження частинок до температур, за яких не відбувається їх налипання на мікроступи поверхні підкладки.

Характер впливу робочого струму дуги на пористість покриття показано на рис. 4.7. При великих значеннях струму дуги збільшення швидкості переміщення апарату для напилення V_{pm} суттєво знижує пористість, а при малому струмі V_{pm} - практично не впливає на цю величину, тому що при малих струмах дуги продуктивність розпилення невелика та середньомасова температура часток невисока.

Узагальнюючи результати щодо впливу факторів процесу електродугового напилення на властивості покриттів, а також, враховуючи проведені дослідження, встановили раціональні режими напилення дротяних сталей Св-08 і 40Х13, а також режими електродугового напилення цих же

матеріалів під подальшу електроконтактну обробку: напруга на дузі - 32 В; дистанція напилення від 50 до 200 мм; струм дуги від 100 до 400 А; витрата стисненого повітря - 80 м³/год, тиск - 0,65 МПа; витрата пропан-бутану - 0,011 кг/год, тиск - 0,4 МПа.

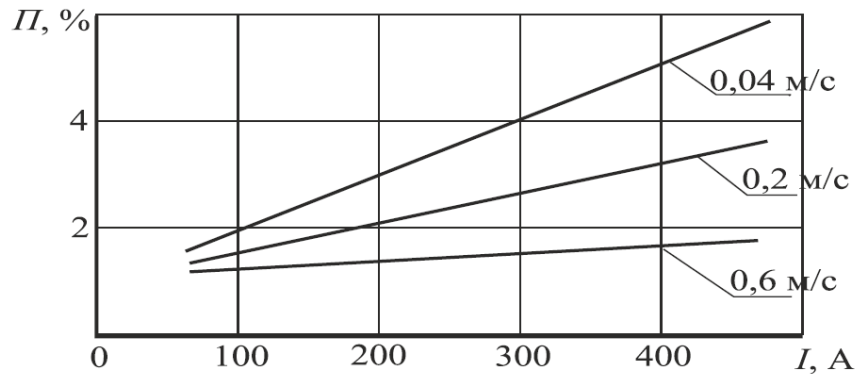


Рисунок 4.7 - Вплив робочого струму дуги на пористість покриттів отриманих електродуговим напиленням, при збільшенні швидкості $V_{пм}$ переміщення апарату для напилення

4.4 Особливості електроконтактної обробки газотермічних покриттів

В результаті виконаних досліджень розроблений спосіб електроконтактної обробки покриттів отриманих газополуменевим та електродуговим напиленням зі сталей Св-09 і 40Х13 з оптимальним впливом на метал основи та отримано зносостійке покриття [25]. При проходженні електричного струму через систему «основа-покриття» основне тепловиділення відбувається в точках найбільшого електроопору, а саме: в місцях взаємного контакту напилених частинок і на ділянках, де покриття прилягає до підкладки. При електроконтактній обробці структура напиленого покриття формується в результаті наклепу, повернення та рекристалізації, що розвиваються залежно від температурно-силових параметрів. При цьому максимальна зносостійкість може бути досягнута за умов, що забезпечують найбільшу дисперсність та мікроспотворення кристалічної структури.

Схематично процес формування структури системи «основа-покриття» при електроконтактній обробці представлений на рис. 4.8. Електроконтактній обробки піддається зразки з маловуглецевої сталі Ст. 3 з феритно-перлітною структурою та з покриттям із сталей феритного (Св-08) та мартенситного (40X13) класів. У процесі електроконтактної обробки внаслідок термічного впливу на покриття отримані газополуменевим та електродуговим напиленням зазнають фазових перетворень (рис. 4.8). При електроконтактній обробці (рис. 4.8) перліт в зоні термічного впливу перетворюється на аустеніт, який при прискореному нагріванні в результаті інтенсивного тепловідведення при охолодженні в інтервалі температур $M_H - M_K$ стає мартенситним перетворенням.

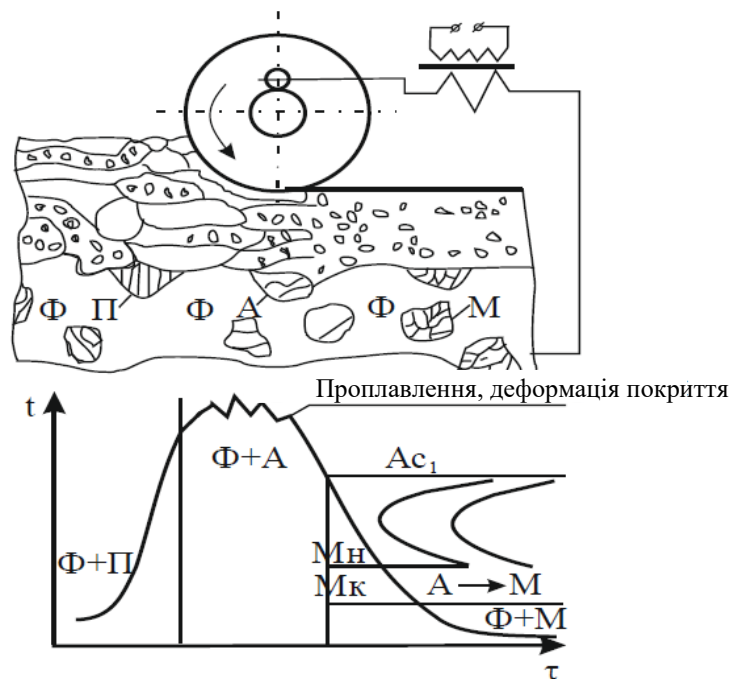


Рисунок 4.8 - Схема структурних змін у системі основа (маловуглецева сталь) – покриття отримане газотермічним напиленням зі сталі 40X13 при електроконтактній обробці

Режими електроконтактної обробки (тривалість контакту з електродом та тиск на нього) слід регулювати так, щоб покриття не розплавлялося. Зміна часу, який буде необхідний для електроконтактної обробки покриття, залежно від середнього контактного тиску, відображено на рис. 4.9. Швидкість електроконтактної обробки покриття не слід приймати як головний критерій

режиму. При виборі режиму необхідно враховувати будову та властивості як зносостійкого покриття, так та системи «основа-покриття» загалом.

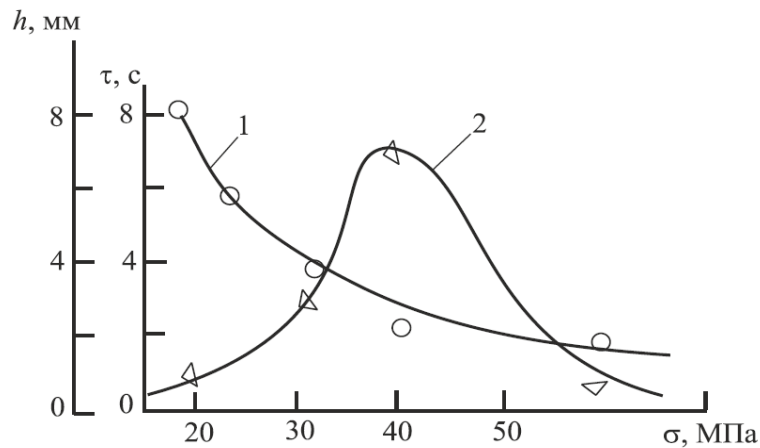


Рисунок 4.9 - Вплив тиску при електроконтактній обробці на тривалість процесу (1) та глибину зони термічного впливу (2)

Істотний вплив на властивості деталей, що зміцнюються, надає зона термічного впливу, її глибина та будова. Глибина зони в залежності від контактного тиску при електроконтактній обробці змінюється немонотонно (рис. 4.9). Малий термічний вплив при силовій дії 10-20 МПа обумовлено перерозподілом тепловиділення у бік пор та інших несучих покриття. У ході подальшого прискореного охолодження утворений аустеніт зазнає мартенситного перетворення. Оптимальним є режим, у якому покриття формується на стадії електроконтактної обробки, а підкладка отримує ферито-мартенситну структуру. У цьому випадку немає крихкої перехідної зони, характерної для інших способів обробки покриттів газотермічним напиленням: оплавлення (пічного, газового пальника, плазмового струменя та іншими неконцентрованими джерелами тепла). Утворення ділянок двійникового мартенситу в маловуглецевій сталі після охолодження перехідної зони обумовлено тим, що прийнятий режим електроконтактної обробки забезпечує аустенітне перетворення лише у перлітних ділянках основи. Двійниковий мартенсит має високу твердість ($20 \text{ H} = 8 \text{ ГПа}$). В утвореному аустеніті міститься близько 0,8% вуглецю, тобто стільки ж, скільки було в перліті.

При подальшому прискореному охолодженні аустеніт зазнає мартенситне перетворення. Крім цього термосиловий вплив у процесі електроконтактної обробки напилених покриттів в області підвищених температур може зменшувати пористість покриття від 18-20% до 2-3% та збільшувати його адгезійну міцність до 180-220 МПа. Зовнішня поверхня покриття формується механічним впливом з боку електрода, що дозволяє звести до мінімуму подальшу механічну обробку. Таким чином, щоб створити напилене покриття з високою зносостійкістю при здійсненні електроконтактної обробки необхідно визначити їх оптимальні значення.

4.5 Математичне моделювання процесу електроконтактної обробки газотермічних покриттів

Ефективне використання способу електроконтактної обробки для створення зносостійких сталевих покриттів газополуменевим та електродуговим напиленням засноване на можливості керування його параметрами. Для створення покриттів газотермічним напиленням з вуглецевими наповнювачами необхідно регулювати не тільки їх зносостійкість, але і пористість. Зносостійкість та пористість покриттів, одержуваних газотермічним напиленням сталей мартенситного 40X13 та феритного Св-08 класів та їх електроконтактна обробка є функціями параметрів процесу електроконтактної обробки (тиску, сили струму, часу імпульсів та пауз).

З метою комплексної оцінки впливу основних параметрів електроконтактної обробки (табл. 4.5) на зносостійкість та пористість використовувалися методи математичного планування [26]. Чинники та його рівні наведено у таблиці 4.6.

Розмірами оптимізації були: пористість та зносостійкість. Було реалізовано повний факторний експеримент виду 2^3 з варіюванням на 3-х рівнях технологічних факторів: струм на електродах; тиск на електродах; час імпульсів (пауз). Кількість дослідів $N_j = 16$ (табл. 4.7).

Таблиця 4.5 - Рекомендовані значення технологічних параметрів процесу електроконтактної обробки

| Найменування параметру | Позначення | Одиниця виміру | Величина |
|------------------------|----------------|----------------|-----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Сила току | I | кА | 2-8 |
| Тиск | P | МПа | 10-60 |
| Час імпульсів (пауз) | $t_{им} (t_p)$ | с | 0,01-0,06 |

Таблиця 4.6 - Значення факторів, що варіюються, та їх рівні

| Рівні | Фактори | | | Кодоване значення факторів |
|---------------------|---------|--------|-------|----------------------------|
| | P, МПа | t, сек | I, кА | |
| | X_1 | X_2 | X_3 | |
| Нижній | 10 | 0,01 | 2 | -1 |
| Верхній | 60 | 0,06 | 8 | +1 |
| Нульовий | 30 | 0,04 | 4 | 0 |
| Інтервал варіювання | 10 | 0,01 | 1 | - |

Таблиця 4.7 - Робоча матриця

| Фактори | Тиск | Час імпульса (паузи) | Сила тока | Пористість | Зносостійкість |
|---------|--------|----------------------|-----------|------------|------------------------------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | | |
| № експ. | P, МПа | t, сек | I, кА | П, % | J_n , мкм/км (10^{-7}) |
| 1 | 30 | 0,06 | 2 | 6 | 0,016 |
| 2 | 20 | 0,01 | 4 | 2 | 0,007 |
| 3 | 40 | 0,02 | 6 | 1 | 0,005 |
| 4 | 10 | 0,04 | 3 | 5 | 0,008 |
| 5 | 20 | 0,05 | 5 | 4 | 0,01 |
| 6 | 40 | 0,03 | 7 | 5 | 0,008 |
| 7 | 30 | 0,02 | 2 | 4 | 0,006 |
| 8 | 50 | 0,04 | 8 | 5 | 0,009 |
| 9 | 10 | 0,06 | 6 | 2 | 0,006 |
| 10 | 60 | 0,05 | 8 | 5 | 0,008 |
| 11 | 50 | 0,01 | 4 | 6 | 0,015 |
| 12 | 20 | 0,03 | 5 | 1 | 0,005 |
| 13 | 60 | 0,06 | 7 | 2 | 0,009 |
| 14 | 30 | 0,02 | 3 | 1 | 0,006 |
| 15 | 40 | 0,04 | 4 | 2 | 0,005 |
| 16 | 10 | 0,03 | 5 | 3 | 0,007 |

Кількість вимірів у кожному досвіді щодо пористості Π - $n=6$, а за вимірі зносостійкості J_h - $n = 3$. Під кількістю вимірів розумілося кількість зразків, у яких визначалося значення параметра оптимізації у кожному досвіді j . Значення пористості визначалося як середнє арифметичне вимірювання на кожному зразку.

За результатами експерименту проведено статистичний аналіз та побудовано регресійну модель залежності критерію оптимізації, що характеризує пористість та зносостійкість покриттів від технологічних факторів (табл. 4.8, 4.9).

Розрахунок моделей здійснювався за допомогою пакету прикладних програм. Як вихідні дані використовувалися матриця планування (табл. 4.7) і результати експериментальних досліджень, проведених двічі при одних і тих же умовах (табл. 4.7-4.8).

Таблиця 4.8 - Значення пористості покриттів

| № режиму обробки | Пористість, % | |
|---------------------|---------------|-----------|
| | $Y_{1,1}$ | $Y_{1,2}$ |
| 1 | 6 | 3 |
| 2 | 2 | 1 |
| 3 | 1 | 1 |
| 4 | 5 | 2 |
| 5 | 4 | 3 |
| 6 | 5 | 1 |
| 7 | 4 | 2 |
| 8 | 5 | 1 |
| 9 | 2 | 2 |
| 10 | 5 | 3 |
| 11 | 6 | 2 |
| 12 | 1 | 1 |
| 13 | 2 | 2 |
| 14 | 1 | 1 |
| 15 | 2 | 3 |
| 16 | 3 | 1 |

Таблиця 4.9 - Значення зностійкості покриттів

| № режиму обробки | J_h , мкм/км (10^{-9}) | |
|------------------|------------------------------|-----------|
| | $Y_{2,1}$ | $Y_{2,2}$ |
| 1 | 0,016 | 0,002 |
| 2 | 0,007 | 0,005 |
| 3 | 0,005 | 0,003 |
| 4 | 0,008 | 0,008 |
| 5 | 0,01 | 0,007 |
| 6 | 0,008 | 0,005 |
| 7 | 0,006 | 0,002 |
| 8 | 0,009 | 0,004 |
| 9 | 0,006 | 0,003 |
| 10 | 0,008 | 0,004 |
| 11 | 0,015 | 0,002 |
| 12 | 0,005 | 0,005 |
| 13 | 0,009 | 0,007 |
| 14 | 0,006 | 0,003 |
| 15 | 0,005 | 0,006 |
| 16 | 0,007 | 0,004 |

$$Y_1 = 3,25576 + 2,37774x_3^2 - 2,07533x_2^3 + 0,545923x_1^3x_2 - 0,842191x_1^3 + 0,284621x_2^3x_3^2 - 1,51418x_1^2x_2^2 - 1,45394x_3^3 - 0,73219x_1^3x_2^2 - 1,95605x_2x_3^3 - 1,65074x_2^2 + 1,15314x_2^2x_3^3, \quad (3.1)$$

де Y_1 – математична модель в кодованих значеннях для пористості покриття.

Формули переходу від кодованих значень факторів до натуральних:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,0363636 (X_1 - 32,5); \\ x_1^2 &= 1,88514(X_1^2 - 0,114165X_1 - 0,355372); \\ x_1^3 &= 4,88078(X_1^3 - 0,225599X_1^2 - 0,645588X_1 + 0,0396005); \\ x_2 &= 39,0244(X_2 - 0,035625); \\ x_2^2 &= 1,61971(X_2^2 - 0,0355966X_2 - 0,418203); \\ x_2^3 &= 3,71976(X_2^3 + 0,0382814X_2^2 - 0,76032X_2 - 0,030896); \\ x_3 &= 0,326531 (X_3 - 4,9375); \\ x_3^2 &= 1,68391(X_3^2 - 0,055512X_3 - 0,379425); \\ x_3^3 &= 4,43393(X_3^3 - 0,035212X_3^2 - 0,736017X_3 - 0,00770233). \end{aligned}$$

$$Y_2 = 0,00811228 + 0,00394767x_2x_3^2 + 0,00349501x_2^3x_3^2 + 0,00250342x_1^3x_2^2x_3^2 - 0,00381417x_1^3x_2^2x_3^3 - 0,00172934x_2^3 + 0,000583571x_2 + 0,00135172x_2^3x_3^3 - 0,00107438x_1^3 + 0,00212148x_3^2 + 0,00132599x_2^2 - 0,00223146x_1 + 0,00162397x_3, \quad (4.2)$$

де Y_2 – математична модель кодованих значеннях для зносостійкості покриття.

Формули переходу від кодованих значень факторів до натуральних:

$$\begin{aligned}x_1 &= 0,0363636 (X_1 - 32,5); \\x_1^2 &= 1,88514(X_1^2 - 0,114165X_1 - 0,355372); \\x_1^3 &= 4,88078(X_1^3 - 0,225599X_1^2 - 0,645588X_1 + 0,0396005); \\x_2 &= 39,0244(X_2 - 0,035625); \\x_2^2 &= 1,61971(X_2^2 - 0,0355966X_2 - 0,418203); \\x_2^3 &= 3,71976(X_2^3 + 0,0382814X_2^2 - 0,76032X_2 - 0,030896); \\x_3 &= 0,326531 (X_3 - 4,9375); \\x_3^2 &= 1,68391(X_3^2 - 0,055512X_3 - 0,379425); \\x_3^3 &= 4.43393(X_3^3 - 0,035212X_3^2 - 0,736017X_3 - 0.00770233).\end{aligned}$$

Отримана залежність перевірена на адекватність, відтворюваність та інформативність результатів за критеріями математичної статистики. Результати статистичного аналізу представлені у таблиці 4.10, 4.11.

Результати повторних досліджень, проведених за однакових умов, перевірялися на статистичну відтворюваність за G - критерієм Кохрена. Для всіх регресійних залежностей $G_{розр} < G_{табл}$ при $\alpha = 0,05$. Тому ступінь розсіювання результатів по рядках матриці планування однакова, а результати відтворені. Перевірка гіпотези на адекватність отриманої моделі результатів експерименту проводилася з використанням F – критерію Фішера. Для отримання моделей за прийнятого рівня значимості $\alpha = 0,05$ $F_{розр} < F_{табл}$, тому модель адекватно відбиває результат експерименту. Оцінка якості отриманої математичної моделі проводилася шляхом визначення коефіцієнта множинної кореляції. Коефіцієнт множинної кореляції R показує величину статистичного зв'язку за рівнянням множинної регресії Y_i та початковими експериментальними результатами. В отриманій математичній моделі коефіцієнти множинної кореляції статистично значущі, тобто $F_{розр} > F_{табл}$. Таким чином, модель інформативна і несе корисну інформацію про процес системи, що моделюється. Для певних факторів проведено графічне дослідження їх впливу на критерій оптимізації, що характеризує пористість і зносостійкість покриття. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків частинних

рівнянь регресії (рис. 4.10-4.14). Візуальний аналіз графіків дозволяє провести аналіз впливу факторів на значення функції відгуку і визначити значення факторів, яке протягом усього часу впливу здійснює більший або менший ефект.

Таблиця 4.10 - Статистична характеристика моделі (пористість)

| Параметри статистичного аналізу | Значення параметрів для моделей |
|---|---------------------------------|
| | Y_1 |
| Аналіз адекватності моделі | |
| Залишкова дисперсія | 0,212397 |
| Дисперсія відтворюванності | 0,16875 |
| Розрахункове значення F-критерію | 15,6154 |
| Рівень значимості F-критерію для адекватності ступенів вільності | 0,05 $V_1=11$ $V_2=4$ |
| Табличне значення F-критерію для адекватності | 5,93581 |
| Стандартна помилка оцінки | 0,518917 |
| Стандартна помилка оцінки скорегована з врахуванням ступенів вільності | 0,89879 |
| Модель адекватна | |
| Аналіз інформативності моделі | |
| Доля розсіювання, що пояснюється моделлю | 0,97835 |
| Введено регресорів | 12 |
| Коефіцієнт множинної кореляції | 0,989116 |
| Коефіцієнт множинної кореляції, скорегований з врахуванням ступенів вільності | 0,96698 |
| F відношення для R | 16,4323 |
| Рівень значущості F-критерію для інформативності ступенів вільності | 0,05 $V_1=11$ $V_2=4$ |
| Табличне значення F-критерію для інформативності | 5,93581 |
| Критерії Бокса і Веца для інформативності | 1 |
| Модель інформативна | |

Таблиця 4.11 - Статистична характеристика моделі (зносостійкість)

| Параметри статистичного аналізу | Значення параметрів для моделей |
|---|---|
| | Y ₁ |
| Аналіз адекватності моделі | |
| Залишкова дисперсія | $3,33725 \cdot 10^{-7}$ |
| Дисперсія відтворюваності | $2,64063 \cdot 10^{-8}$ |
| Розрахункове значення F-критерію | 31,9125 |
| Рівень значимості F-критерію для адекватності ступенів вільності | 0,05 V ₁ =12 V ₂ =3 |
| Табличне значення F-критерію для адекватності | 8,74464 |
| Стандартна помилка оцінки | 0,000578436 |
| Стандартна помилка оцінки скорегована з врахуванням ступенів вільності | 0,00112014 |
| Модель адекватна | |
| Аналіз інформативності моделі | |
| Доля розсіювання, що пояснюється моделлю | 0,993717 |
| Введено регресорів | 13 |
| Коефіцієнт множинної кореляції | 0,996853 |
| Коефіцієнт множинної кореляції, скорегований з врахуванням ступенів вільності | 0,988148 |
| F відношення для R | 39,5377 |
| Рівень значущості F-критерію для інформативності ступенів вільності | 0,05 V ₁ =12 V ₂ =3 |
| Табличне значення F-критерію для інформативності | 8,74464 |
| Критерії Бокса і Веца для інформативності | 1 |
| Модель інформативна | |

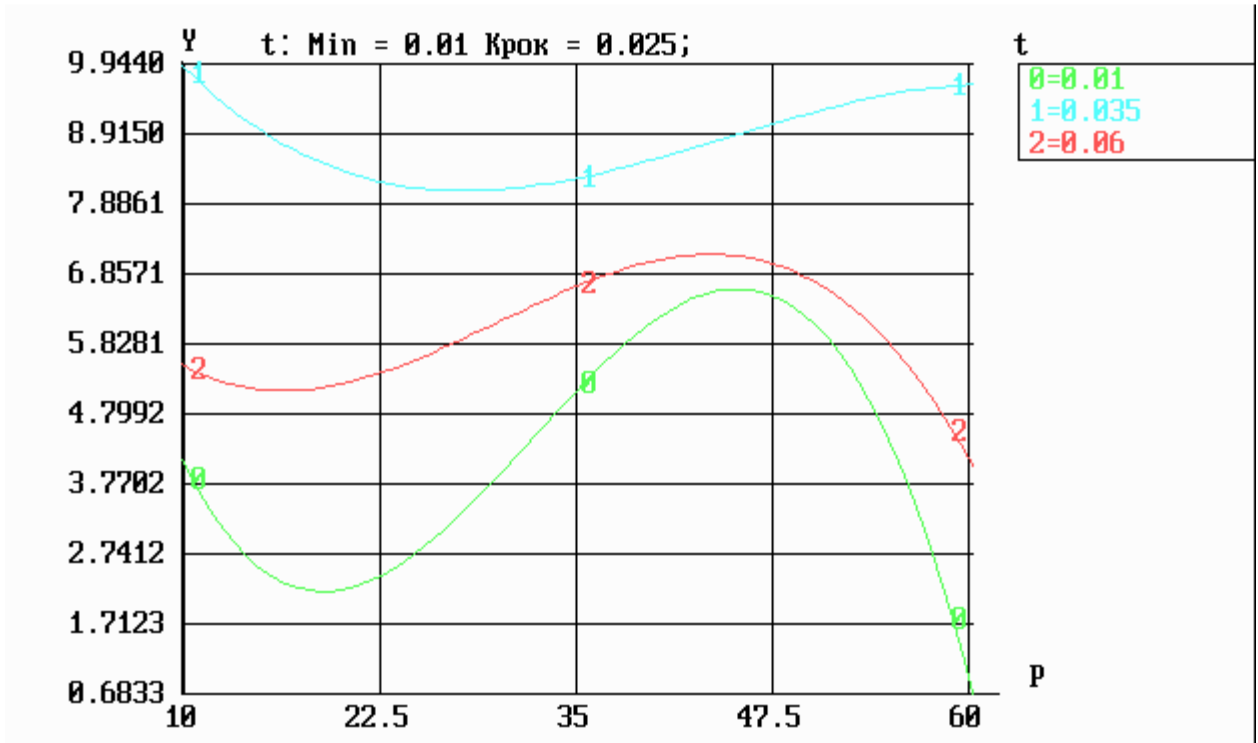


Рисунок 4.10 - Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_2)$ при $X_2 = 0,01$ с, $X_2 = 0,035$ с, $X_2 = 0,06$ с та $X_3 = 2$ кА (пористість)

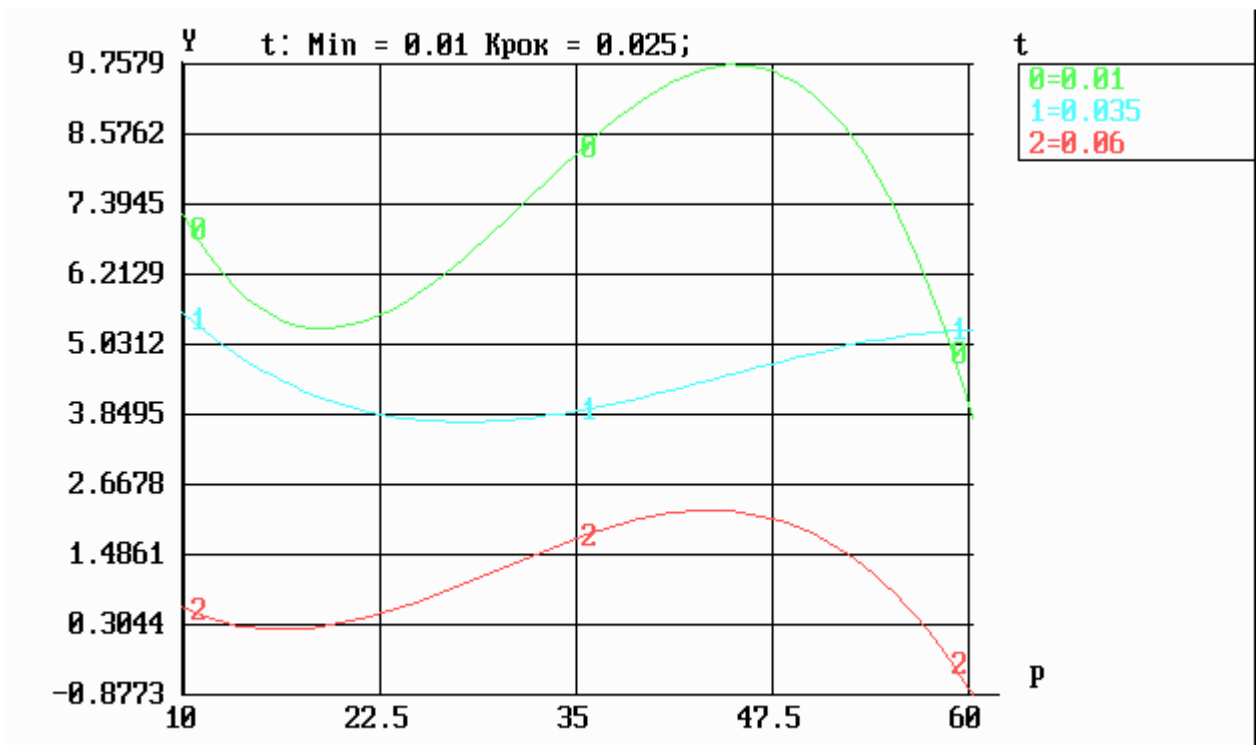


Рисунок 4.11 - Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_2)$ при $X_2 = 0,01$ с, $X_2 = 0,035$ с, $X_2 = 0,06$ с та $X_3 = 8$ кА (пористість)

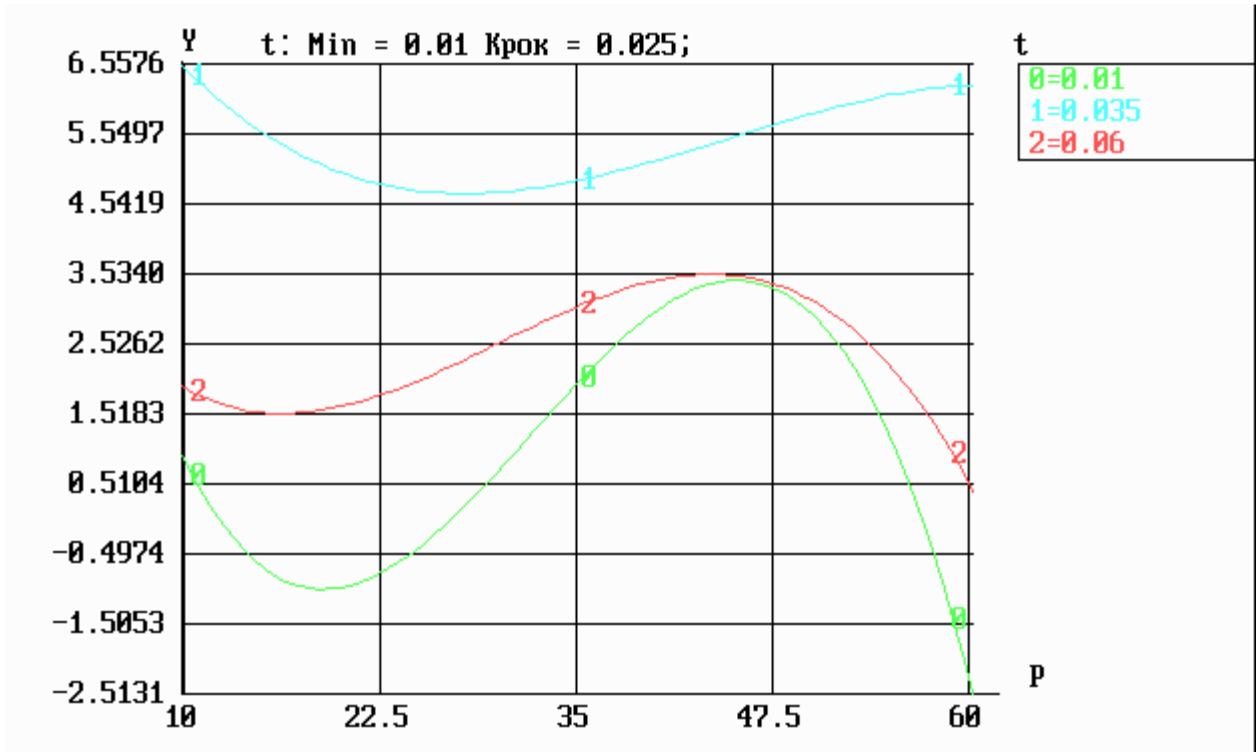


Рисунок 4.12 - Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_2)$ при $X_2 = 0,01$ с, $X_2 = 0,035$ с, $X_2 = 0,06$ с та $X_3 = 6$ кА (пористість)

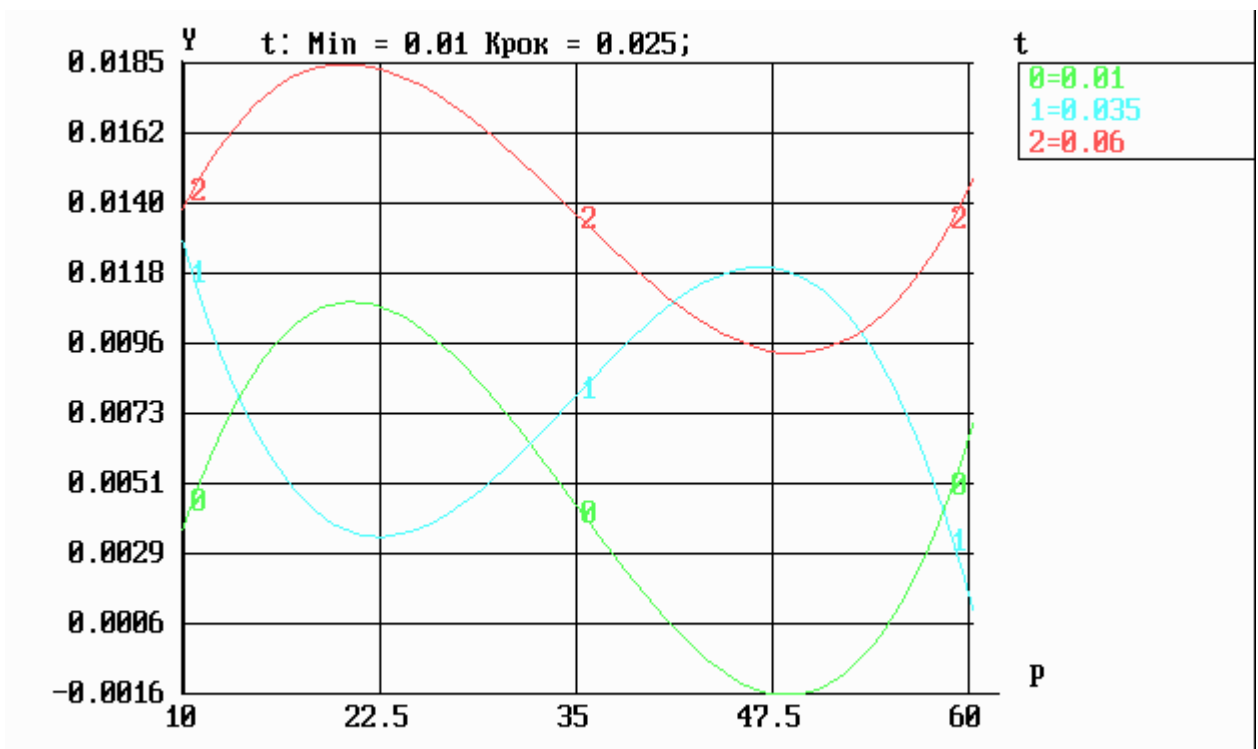


Рисунок 4.13 - Графіки приватних рівнянь регресії $Y_2 = f(X_1, X_2)$ при $X_2 = 0,01$ с., $X_2 = 0,035$ с, $X_2 = 0,06$ с (зносостійкість)

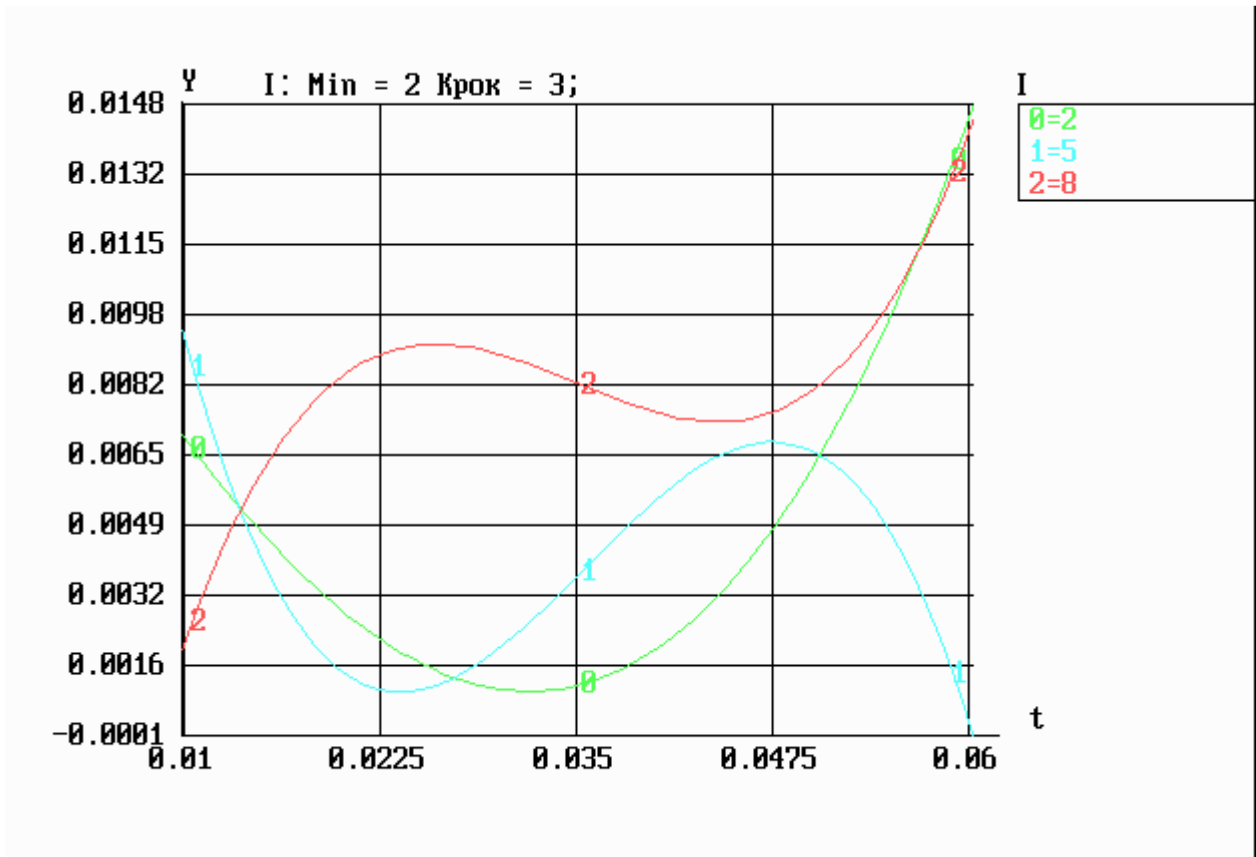


Рисунок 4.14 - Графіки приватних рівнянь регресії $Y_2 = f(X_1, X_3)$ при $X_3 = 2$ кА, $X_3 = 5$ кА, $X_3 = 8$ кА (зносостійкість)

На підставі отриманих результатів можна отримати наочне уявлення про геометричний образ функції відгуку побудовою відповідної геометричної поверхні, що представлені на рис. 4.15-4.20. Результати статистичного аналізу дозволяють зробити висновок, що регресійна залежність адекватна та інформативна, результати відтворені, коефіцієнти b_0 та b_i статистично значущі. Усе це свідчить, що регресійна залежність адекватно описує процес і його можна використовуватиме аналізу та оптимізації технологічного процесу електроконтактної обробки.

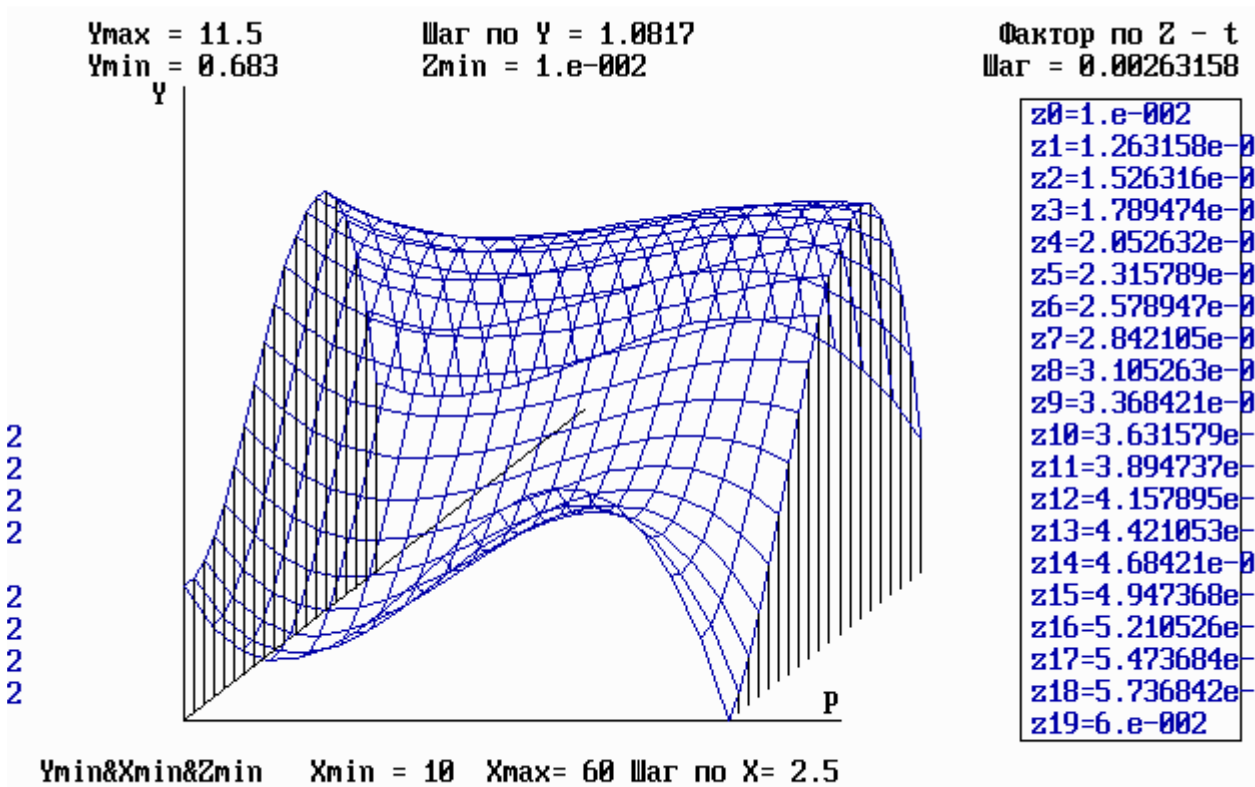


Рисунок 4.15 - Графіки проходження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_2)$ у тривимірному просторі при $X_3 = 2$ кА (пористість)

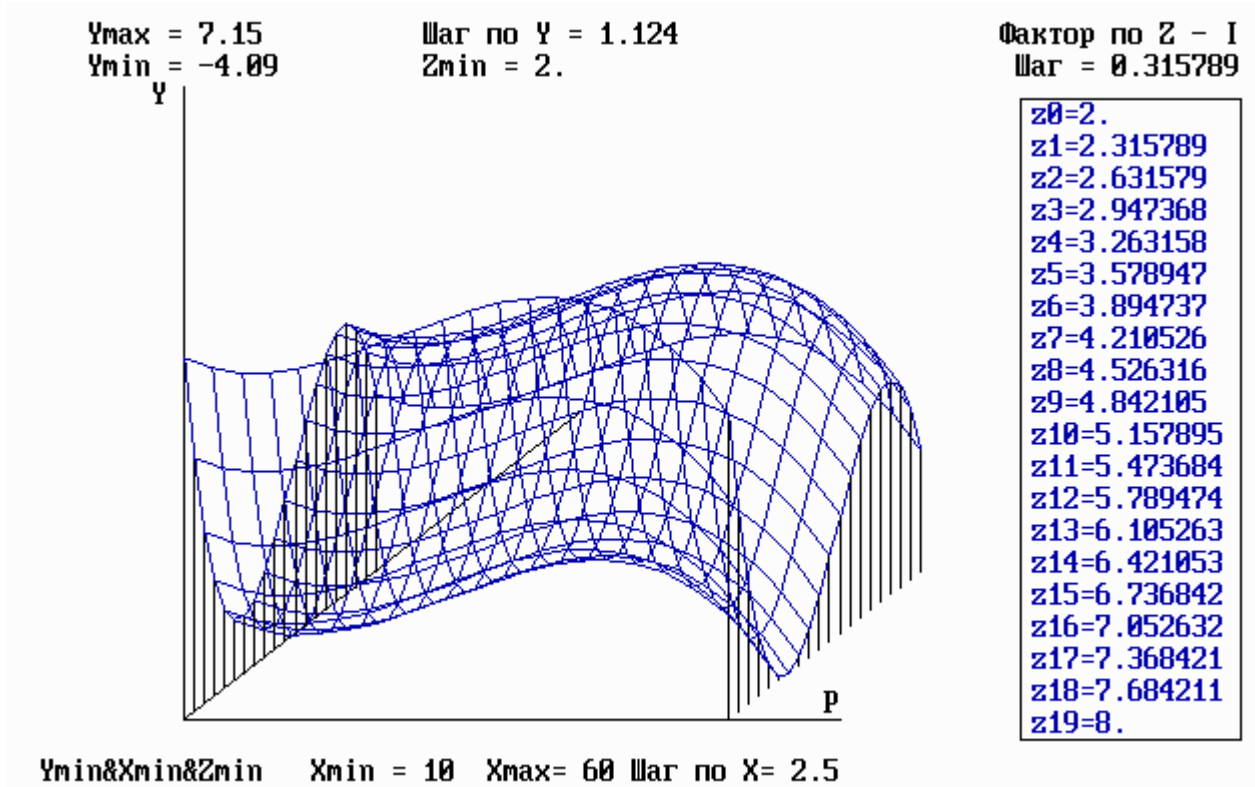


Рисунок 4.16 - Графіки проходження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_2)$ у тривимірному просторі при $X_2 = 0,06$ с (пористість)

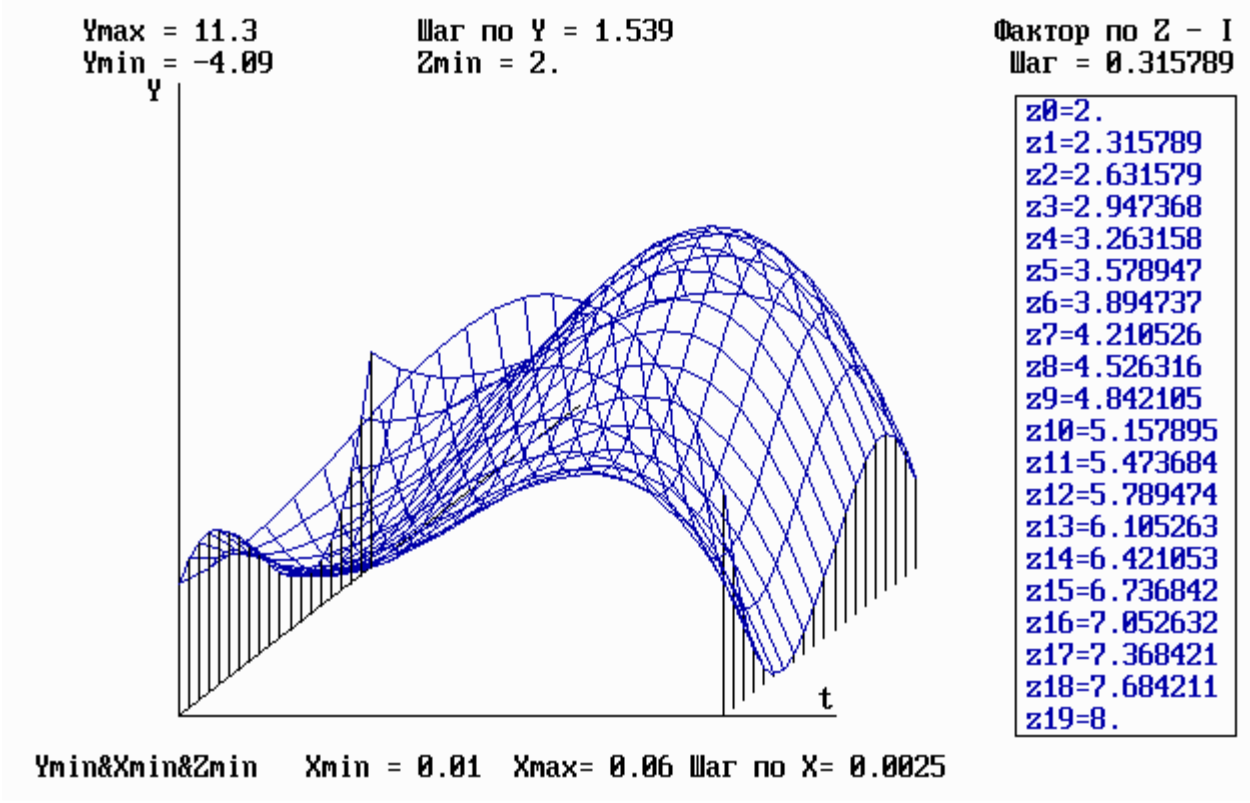


Рисунок 4.17 - Графіки проходження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_2)$ у тривимірному просторі при $X_1 = 60$ МПа (пористість)

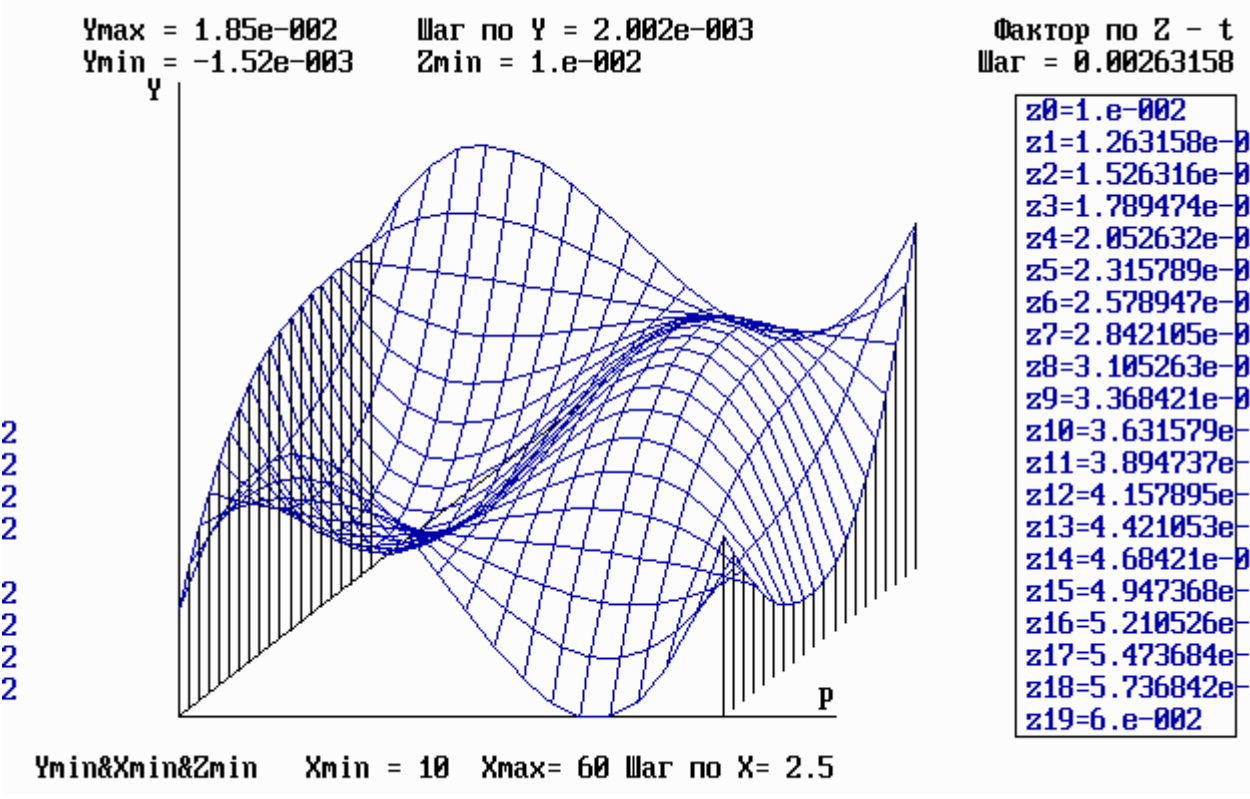


Рисунок 4.18 - Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_1, X_2)$ у тривимірному просторі за $P_{min} = 10$ МПа, $P_{max} = 60$ Мпа (зносостійкість)

Таким чином, залежність пористості та зносостійкості сталевих покриттів отриманих газополуменевим та електродуговим напиленням від параметрів електроконтактної обробки (тиску, сили струму, часу імпульсів струму та пауз) можна уявити рівняннями регресії (3.1) – (3.2). Аналізуючи рівняння (3.1) і (3.2) слід зазначити, що найбільший вплив на пористість та зносостійкість покриттів надає взаємодія всіх трьох досліджуваних факторів електроконтактної обробки: тиску, сили струму, часу імпульсів струму та пауз. Майже однаково на зносостійкість впливають тиск і струм, на пористість – величина струму та ефект взаємодії струму та тиску.

На підставі проведених досліджень визначено оптимальні режими електроконтактної обробки напилених покриттів із сталей Св-08 та 40Х13, які значно відрізняються. Покриття зі сталей Св-08 допускають електроконтактну обробку на наступних режимах: струм нагріву - $I = 3,0$ кА, тиск - $P = 15$ МПа, час імпульсів (пауз) - $t = 0,02$ с., а зі сталі 40Х13: $I = 6,0$ кА, $P = 30$ МПа, $t = 0,04$ с. Оптимальний режим електроконтактної обробки повинен забезпечувати аустенітно-мартенситне перетворення у матеріалі покриття та виключати його розплавлення.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

На працівника під час дослідження триботехнічних властивостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- пряма і відбита блискість;
- підвищення яскравість;
- недостатня освітленість робочої зони;

2. Психофізіологічні:

- статичне перевантаження;
- розумове перевантаження;
- емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Велике значення має характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця дослідника за ПК були дотримані наступні основні умови:

- оптимальне розміщення обладнання, що входить до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні

рухи і переміщення;

- необхідно природне і штучне освітлення для виконання поставлених завдань;

- рівень акустичного шуму не повинен перевищувати допустимого значення.

Площа приміщення на одне робоче місце користувача повинна становити 6 м^2 , а об'єм не менше ніж 20 м^3 .

Головними елементами робочого місця дослідника за ПК є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Раціональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібно для виконання робіт частіше, розташовано в зоні легкої досяжності робочого простору.

Максимальна зона досяжності рук – це частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, що описуються максимально витягнутими руками при русі їх у плечовому суглобі.

Оптимальна зона – частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, описуваними передпліччя при русі в ліктьових суглобах з опорою в точці ліктя і з відносно нерухомим плечем.

При роботі в положенні сидячи рекомендуються такі параметри робочого простору:

- ширина не менше 700 мм;
- глибина не менше 400 мм;
- висота робочої поверхні столу над статтю 700-750 мм.

Оптимальними розмірами столу є:

- висота 710 мм;
- довжина столу 1300 мм;
- ширина столу 650 мм.

Під робочою поверхнею повинно бути передбачено простір для ніг:

- висота не менше 600 мм;
- ширина не менше 500 мм;

- глибина не менше 400 мм.

Робочі місця з ПК повинні бути розташовані від стіни з вікнами на відстані не менш ніж 1,5 м, від інших стін - на відстані не менше ніж 1 м. При розміщенні робочого місця поряд з вікном кут між екраном монітора і площиною вікна повинен складати не менше 90° (для виключення відблисків), частину вікна, що прилягає, бажано зашторити. Недопустиме розташування ПК, при якому працюючий повернений обличчям або спиною до вікон кімнати або до задньої частини ПК, в яку монтуються вентилятори. При розміщенні робочих столів з ПК слід дотримуватись таких відстаней: між бічними поверхнями ПК – 1,2 м, від тильної поверхні одного ПК до екрана іншого ПК – 2,5 м.

Приміщення, де здійснювалося дослідження триботехнічних властивостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами за небезпекою ураження електричним струмом можна віднести до 1 класу, тобто це приміщення без підвищеної небезпеки [29].

Електротехнічне устаткування: апаратури, кабелі й керівництва, розподільні пристрої всіх видів і напруг по своїх номінальних параметрах задовольняє умовам роботи як при нормальних режимах, так і при коротких замиканнях, перенапругах, перевантаженнях.

Для забезпечення безпеки встановлюються наступні технічні рішення:

- Забезпечено недоступність струмопровідних частин (застосована схована проводка, кабель прокладений у спеціальних ринвах).
- Забезпечено ізолювання струмопровідних частин з використанням ізоляції, опір якої не нижче 1кОм/В , передбачені постійний контроль і профілактика ізоляції.
- Розподільні шафи, пускові пристрої й клемні коробки закритого типу (розміщаються в спеціальних кожухах) - для забезпечення недоступності неізольованих струмопровідних частин.
- Напруга освітлювальної мережі приймається 220 В із заземленою нейтраллю.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Дослідження триботехнічних властивостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [31]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.5.2.1.

Таблиця 5.2.1 – Параметри мікроклімату

| Період року | Допустимі | | |
|-------------|-----------|------|---------|
| | t, °C | W, % | V, м/с |
| Теплий | 22-28 | 55 | 0,1-0,2 |
| Холодний | 21-25 | 75 | 0,1 |

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено:

1. У холодний період року для обігріву будівлі використовується централізована парова система опалення.
2. Забезпечення допустимих метеорологічних умов праці в приміщенні здійснюється за допомогою системи кондиціонування.
3. Систематичне (раз за зміну) вологе прибирання.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

У сучасній техніці застосовується безліч речовин, які можуть потрапляти в повітря і становити небезпеку здоров'ю людей. Залежно від ступеня токсичності, фізико-хімічних властивостей, шляхів проникнення в організм, санітарні норми встановлюють гранично допустимі концентрації

(ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони виробничих приміщень, перевищення яких неприпустиме.

В приміщенні, де здійснюється дослідження триботехнічних властивостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.2.

Таблиця 5.2.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

| Назва речовини | ГДК, мг/м ³ | | Клас небезпечності |
|-----------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| | Максимально разова | Середньо добова | |
| Пил нетоксичний | 0,5 | 0,15 | 4 |
| Озон | 0,16 | 0,03 | 1 |

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи (раціональна організація проведення робіт залежно від пори року і доби, чергування праці і відпочинку), так і технічні засоби (вентиляція, кондиціонування повітря, опалювальна система).

5.2.3 Виробниче освітлення

Стан освітлення виробничих приміщень відіграє важливу роль і для попередження виробничого травматизму. Багато негасних випадків на виробництві стається через погане освітлення. Втрати від цього становлять досить значні суми, а, головне, людина може загинути або стати інвалідом. Раціональне освітлення повинно відповідати таким умовам: бути достатнім (відповідним нормі); рівномірним; не утворювати тіней на робочій поверхні; не засліплювати працюючого; напрямок світлового потоку повинен відповідати зручному виконанню роботи. Це сприяє підтримці високого рівня працездатності, зберігає здоров'я людини та зменшує травматизм.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [32]) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 5.2.3:

Таблиця 5.2.3 - Норми освітленості в приміщенні

| Характеристика зорової роботи | Найменший розмір об'єкта розрізнення | Розряд зорової роботи | Підрозряд зорової роботи | Контраст об'єкта розрізнення з фоном | Характеристика фона | Освітленість, Лк | | КПО, e_n , % | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|----------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| | | | | | | Штучне освітлення | | Природне освітлення | | Сумісне освітлення | |
| | | | | | | Комбіноване | Загальне | Верхнє або верхнє і бокове | Бокове | Верхнє або верхнє і бокове | Бокове |
| Дуже високої точності | V0,15 - до 0,3 | I | г | великий | світлий | 1000 | 300 | 7 | 2,5 | 4,2 | 1,5 |

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

5.2.4 Виробничий шум

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки – дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності.

Шум має акумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [33]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 5.2.4.

Таблиця 5.2.4 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

| Характер робіт | Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц) | | | | | | | | | Допустимий рівень звуку, дБА |
|----------------------|--|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------------------------------|
| | 32 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| Виробничі приміщення | 86 | 71 | 61 | 54 | 49 | 45 | 42 | 40 | 38 | 50 |

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

5.2.5 Виробничі випромінювання

Працюючи за комп'ютером, користувач підпадає під вплив високочастотного електромагнітного поля (ЕМП). Як показують результати вимірювання електромагнітного випромінювання, інтенсивність опромінення ЕМП від комп'ютера підсилюється, коли одночасно оператор ще й розмовляє по мобільному телефону.

Люди, які працюють в ЕМП, що перевищує допустимі норми, швидко втомлюються, скаржаться на головні болі, загальну слабкість, болі в ділянці серця. Вони стають дратівливими, у них збільшується пітливість та порушується нічний сон. Відтак, захист від ЕМВ не лише покращить самопочуття працівників, але і допоможе створити більш сприятливі умови для праці.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 5.2.6.

Таблиця 5.2.6 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

| Найменування параметра | Допустимі значення |
|---|----------------------|
| Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора | 10В / м |
| Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора | 0,3 А / м |
| Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати: для дорослих користувачів для дітей дошкільних установ і що вчаться середніх спеціальних і вищих навчальних закладів | 20кВ / м 15кВ / м |

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання, встановлювати захисні екрани, а також дотримуватися регламентованих режимів праці та відпочинку.

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи в умовах дії загрозливих чинників НС

5.3.1 Дія вогню на живі організми під час пожежі

Коли людина перебуває в зоні впливу пожежі, то вона може потрапити під дію таких небезпечних та шкідливих чинників: токсичні продукти горіння; вогонь; підвищена температура середовища; дим; недостатність кисню; руйнування будівельних конструкцій; вибухи; витікання небезпечних речовин, що відбуваються внаслідок пожежі; паніка.

Токсичні продукти горіння становлять найбільшу загрозу для життя людини, особливо при пожежах у будівлях. Адже в сучасних виробничих, побутових та адміністративних приміщеннях знаходиться значна кількість синтетичних матеріалів, що є основними джерелами токсичних продуктів

горіння. Так, при горінні пінополіуретану та капрону утворюється ціанистий водень (синильна кислота), вініпласту – хлористий водень та оксид вуглецю, лінолеуму – сірководень та сірчистий газ і т. д. Найчастіше при пожежах відзначається високий вміст у повітрі оксиду вуглецю. Так, у підвалах, шахтах, тунелях, складах його вміст може становити від 0,15 до 1,5%, а в приміщеннях – 0,1-0,6%.

Вогонь – надзвичайно небезпечний чинник пожежі, однак випадки його безпосередньої дії на людей зустрічаються досить рідко. Під час пожежі температура полум'я може досягати 1200-1400 °С і у людей, що знаходяться у зоні пожежі випромінювання полум'я можуть викликати опіки та больові відчуття.

Небезпека підвищеної температури середовища полягає у тому, що вдихання розігрітого повітря разом із продуктами горіння може призвести до ураження органів дихання та смерті. В умовах пожежі підвищення температури середовища до 60 °С вже є життєво небезпечною для людини.

Дим являє собою велику кількість видимих найдрібніших твердих та (або) рідинних часточок незгорівших речовин, що знаходяться в газах у завислому стані. Він викликає інтенсивне подразнення органів дихання та слизових оболонок (сильний кашель, сльозотечу тощо). Крім того, у задимлених приміщеннях внаслідок погіршення видимості сповільнюється евакуація людей, а часом провести її зовсім неможливо. Так, при значній задимленості приміщення видимість предметів, що освітлюються лампочкою потужністю 20 Вт, складає не більше 2,5 м.

Недостатність кисню спричинена тим, що в процесі горіння відбувається хімічна реакція окислення горючих речовин та матеріалів. Небезпечною для життя людини уже вважається ситуація, коли вміст кисню в повітрі знижується до 14% (норма 21 %). При цьому втрачається координація рухів, з'являється кволість, запаморочення, гальмування свідомості. При концентрації кисню 9-11% смерть настає через кілька хвилин.

Вибухи, витікання небезпечних речовин можуть бути спричинені їх нагріванням під час пожежі, розгерметизацією посудин та трубопроводів з небезпечними рідинами та газами тощо. Вибухи збільшують площу горіння і можуть призводити до утворення нових осередків пожеж. Люди, що перебувають поблизу, можуть потрапити під дію вибухової хвилі, діставати ураження уламками тощо.

Руйнування будівельних конструкцій відбувається внаслідок втрати ними несучої здатності під впливом високих температур та вибухів. При цьому люди можуть одержати значні механічні травми, опинитися під уламками завалених конструкцій. До того ж, евакуація може бути просто неможливою, внаслідок завалів евакуаційних виходів та руйнування шляхів евакуації [34].

5.3.2 Визначення кількості вогнегасників

Вихідні дані: розміри приміщення (м): $12 \times 8 \times 3,4$.

Згідно ОНТП 24-86, приміщення, де використовуються персональні комп'ютери, слід оснащувати переносними вуглекислотними або порошковими вогнегасниками ємністю 3 л з розрахунку: один вогнегасник на кожні 20 м^2 підлоги приміщення.

Отже, орієнтовна кількість вогнегасників визначається за формулою:

$$n = \frac{S_{II}}{S_{III}} \text{ [шт]}, \quad (5.1)$$

де S_{II} – площа підлоги приміщення, м^2 ;

S_{III} – площа підлоги, що припадає на один вогнегасник ($S_{III} = 20 \text{ м}^2$).

За відомими розмірами приміщення знайдемо площа підлоги приміщення:

$$S_{II} = ab \text{ [м}^2\text{]}, \quad (5.2)$$

де a – довжина приміщення, м;

b – ширина приміщення, м.

Таким чином, площа підлоги приміщення складає

$$S_{II} = 12 \cdot 8 = 96 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Отже, визначаємо орієнтовну кількість вогнегасників:

$$n = 96 / 20 = 4,8 \text{ (шт)}.$$

Отримане значення заокруглюємо до найближчого більшого значення $n = 5$ шт.

5.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення безпеки роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій

Для попередження пожежі проводяться організаційні, технічні, експлуатаційні та режимні заходи.

До організаційних заходів відносяться: навчання працюючих правилам пожежної безпеки, проведення інструктажів, бесід, лекцій тощо.

До технічних – дотримування протипожежних правил та норм при встановленні опалення, вентиляційного обладнання.

До експлуатаційних – заходи, що передбачають правильну експлуатацію машин, обладнання, транспорту, правильне утримання території та будинків.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

6.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення комерційного та технологічного аудиту є оцінка доцільності з підвищення зносостійкості газотермічних покриттів із сталей мартенситного та феритногексаксимального класів для деталей техніки шляхом їх електроконтактної обробки та з використанням вуглецевмісних наповнювачів.

Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів Вінницького національного технічного університету кафедри галузевого машинобудування: к. т. н., доц. Янченко О. Б., д. т. н., проф. Савуляк В. І., к. т. н., доц. Слабкий А. В.

Для проведення технологічного аудиту було використано таблицю 6.1 [35] в якій за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв здійснено оцінку комерційного потенціалу.

В таблиці 6.1 наведено результати оцінювання експертами комерційного потенціалу розробки.

Середньоарифметична оцінка, отримана на основі експертних висновків, становить 38 балів, і згідно з таблицею 6.1, це вказує на вище середнього рівень комерційного потенціалу результатів проведених досліджень.

Результатом магістерської роботи є розробити технології відновлення деталей машин та обладнання. Нова розробка може бути корисною для промислових підприємств, що спеціалізуються на ремонті техніки та відновленні деталей машин та обладнання.

Таблиця 6.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

| Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою) | | | | | |
|--|--|---|---|---|--|
| Кри-терій | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Технічна здійсненність концепції: | | | | | |
| 1 | Достовірність концепції не підтверджена | Концепція підтверджена експертними висновками | Концепція підтверджена розрахунками | Концепція перевірена на практиці | Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах |
| Ринкові переваги (недоліки): | | | | | |
| 2 | Багато аналогів на малому ринку | Мало аналогів на малому ринку | Кілька аналогів на великому ринку | Один аналог на великому ринку | Продукт не має аналогів на великому ринку |
| 3 | Ціна продукту значно вища за ціни аналогів | Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів | Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів | Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів | Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів |
| 4 | Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів | Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів | Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів | Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів | Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів |
| 5 | Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів | Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів | Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів | Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів | Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів |
| Ринкові перспективи | | | | | |
| 6 | Ринок малий і не має позитивної динаміки | Ринок малий, але має позитивну динаміку | Середній ринок з позитивною динамікою | Великий стабільний ринок | Великий ринок з позитивною динамікою |
| 7 | Активна конкуренція великих компаній на ринку | Активна конкуренція | Помірна конкуренція | Незначна конкуренція | Конкурентів немає |
| Практична здійсненність | | | | | |
| 8 | Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї | Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців | Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату | Необхідне незначне навчання фахівців | Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї |
| 9 | Потрібні | Потрібні | Потрібні | Потрібні | Не потребує |

| | | | | | |
|----|---|--|---|---|---|
| | значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні | незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні | значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є | незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є | додаткового фінансування |
| 10 | Необхідна розробка нових матеріалів | Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі | Потрібні дорогі матеріали | Потрібні досяжні та дешеві матеріали | Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві |
| 11 | Термін реалізації ідеї більший за 10 років | Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років | Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років | Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років | Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років |
| 12 | Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту | Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу | Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу | Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту | Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту |

Таблиця 6.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

| Середньоарифметична сума балів СБ, розрахована на основі висновків експертів | Рівень комерційного потенціалу розробки |
|--|---|
| 0-10 | Низький |
| 11-20 | Нижче середнього |
| 21-30 | Середній |
| 31-40 | Вище середнього |
| 41-48 | Високий |

Таблиця 6.3 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

| Критерії | Прізвище, ініціали, посада експерта | | |
|--|---|---------------------|---------------------|
| | Савуляк В. І. | Слабкий А. В | Янченко О. Б. |
| | Бали, виставлені експертами: | | |
| 1 | 3 | 3 | 3 |
| 2 | 3 | 4 | 4 |
| 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 4 | 3 | 4 |
| 5 | 2 | 3 | 2 |
| 6 | 3 | 3 | 3 |
| 7 | 2 | 2 | 2 |
| 8 | 4 | 4 | 4 |
| 9 | 3 | 3 | 3 |
| 10 | 4 | 4 | 3 |
| 11 | 4 | 4 | 4 |
| 12 | 3 | 3 | 2 |
| Сума балів | СБ ₁ =38 | СБ ₂ =39 | СБ ₃ =37 |
| Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$ | $\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{38 + 39 + 37}{3} = 38$ | | |

6.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи групуються за такими статтями: витрати на оплату праці, витрати на соціальні заходи, матеріали, паливо та енергія для науково-виробничих цілей, витрати на службові відрядження, програмне забезпечення для наукових робіт, інші витрати, накладні витрати.

1. Основна заробітна плата кожного із дослідників Z_0 , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери визначається за формулою:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} * t \text{ (грн)} \quad (6.1)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.;

T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p \approx 21...23$ дні;

t – число робочих днів роботи дослідника.

Для розробки робочого органу ланцюгового траншеєкопача необхідно залучити інженера з посадовим окладом 9500 грн. Кількість робочих днів у місяці складає 21, а кількість робочих днів інженера складає 45. Зведемо сумарні розрахунки до таблиця 6.4.

Таблиця 6.4 – Заробітна плата дослідника в науковій установі бюджетної сфери

| Найменування посади | Місячний посадовий оклад, грн. | Оплата за робочий день, грн. | Число днів роботи | Витрати на заробітну плату, грн. |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| Керівник | 12000 | 545,5 | 5 | 2727 |
| Інженер | 9500 | 431,8 | 45 | 19432 |
| Всього | | | | 22159 |

2. Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (6.2)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (6.3)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду;

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих

об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середня кількість робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

Таблиця 6.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

| Найменування робіт | Тривалість роботи, год | Розряд роботи | Погодинна тарифна ставка, грн | Величина оплати на робітника, грн |
|--------------------|------------------------|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Підготовчі | 2 | 2 | 41,9 | 83,8 |
| 2. Монтажні | 3 | 3 | 51,4 | 154,2 |
| 3. Складальні | 2 | 4 | 57,1 | 114,2 |
| 4. Налаштовувальні | 6 | 4 | 57,1 | 342,6 |
| 5. Випробувальні | 3 | 4 | 57,1 | 171,3 |
| Всього | | | | 866,1 |

3. Розрахунок додаткової заробітної плати робітників

Додаткова заробітна плата Z_d всіх розробників та робітників, які приймали участь в розробці нового технічного рішення розраховується як 10 - 12 % від основної заробітної плати робітників.

На даному підприємстві додаткова заробітна плата начисляється в розмірі 11% від основної заробітної плати.

$$Z_d = (Z_o + Z_p) * \frac{N_{дод}}{100\%} \quad (6.4)$$

$$Z_d = 0,11 * (22159 + 866,1) = 2532,57 \text{ (грн)}$$

4. Нарахування на заробітну плату $N_{зп}$ дослідників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою (6.10):

$$N_{зп} = (Z_o + Z_p + Z_d) * \frac{\beta}{100} \text{ (грн)} \quad (6.5)$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.;

Z_d – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

Z_p – основну заробітну плату робітників, грн.;

β – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, % .

Дана діяльність відноситься до бюджетної сфери, тому ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування буде складати 22%, тоді:

$$H_{зп} = (22159 + 866,1 + 2532,57) * \frac{22}{100} = 5622,74 \text{ (грн)}$$

5. Сировина та матеріали.

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби й предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за прямим призначенням згідно з нормами їх витрачання, а також витрачені придбані напівфабрикати, що підлягають монтажу або виготовленню й додатковій обробці в цій організації, чи дослідні зразки, що виготовляються виробниками за документацією наукової організації.

Витрати на матеріали (М) у вартісному вираженні розраховуються окремо для кожного виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot \text{Ц}_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n V_j \cdot \text{Ц}_{вj}, \quad (6.6)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

Ц_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

V_j – маса відходів j -го найменування, кг;

$\text{Ц}_{вj}$ – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

Проведені розрахунки зведені в таблицю 6.6.

6. Витратикомплектуючі К, щобуливикористаніпід час виконанняданого етапу роботи, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою:

$$K = \sum_{i=1}^n H_i \cdot \text{Ц}_i \cdot K_i, \quad (6.7)$$

де H_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_i – покупна ціна комплектуючих i -го найменування, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат (1,1...1,15).

Таблиця 6.6 – Витрати на матеріали

| Найменування матеріалу, марка, тип, сорт | Ціна за 1 кг, грн | Норма витрат, кг | Вартість витраченого матеріалу, грн |
|---|-------------------|------------------|-------------------------------------|
| Дріт 40X13 | 92 | 0,05 | 4,6 |
| Ацетилен | 90 | 0,09 | 8,1 |
| Кисень | 13 | 0,023 | 0,299 |
| H ₃ PO ₄ | 95 | 0,76 | 72,2 |
| CrO ₃ | 600 | 0,1 | 60 |
| Спирт етиловий | 220 | 0,05 | 11 |
| Всього | | | 156,2 |
| З врахуванням коефіцієнта транспортування | | | 171,82 |

Таблиця 6.7 – Комплектуючі, щовикористані на розробку

| Найменування | Ціна за одиницю, грн. | Витрачено | Вартість витраченого матеріалу, грн. |
|---|-----------------------|-----------|--------------------------------------|
| Електро-двигун ДПР72-Ф1-01 | 350 | 1 | 350 |
| Головка розпилувальна | 5 000 | 1 | 5000 |
| Ротаметр | 1 400 | 1 | 1400 |
| Повітряно-силові рукава | 100 | 2 | 200 |
| Високовольтний дріт | 70 | 1 | 70 |
| З врахуванням коефіцієнта транспортування | | | 7722 |

7. Амортизація обладнання, комп'ютерів та приміщень, які використовувались під час виконання даного етапу роботи

Дані відрахування розраховують по кожному виду обладнання, приміщенням тощо.

$$A = \frac{C \cdot T}{T_{кор} \cdot 12} \text{ [грн]}, \quad (6.8)$$

де C – балансова вартість даного виду обладнання (приміщень), грн.;

$T_{\text{кор}}$ – час користування;

T – термін використання обладнання (приміщень), цілімісяці.

Згідно пункту 137.3.3 Податкового кодекса амортизація нараховується на основні засоби вартістю понад 2500 грн. Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, яке використовувалося в роботі наведено в табл. 6.8

Таблиця 6.8 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

| Найменування обладнання | Балансова вартість, грн | Строк корисного використання, років | Термін використання обладнання, місяців | Амортизаційні відрахування, грн |
|---|-------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| 1. Комп'ютер | 25000 | 2 | 1 | 1041,67 |
| 2. Установка УЕКС | 80 000 | 4 | 1 | 1666,67 |
| 3. Модернізований блок керування РКС-801М | 5 000 | 4 | 1 | 104,17 |
| Всього | | | | 2812,50 |

До статті «Паливо та енергія для науково-виробничих цілей» відносяться витрати на всі види палива й енергії, що безпосередньо використовуються з технологічною метою на проведення досліджень.

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yt} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{\text{впі}}}{\eta_i} \quad (6.9)$$

де W_{yt} – встановлена потужність обладнання на певному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн;

$K_{\text{впі}}$ – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{\text{впі}} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

Для написання магістерської роботи використовується персональний комп'ютер для якого розрахуємо витрати на електроенергію.

$$B_e = \frac{0,25 \cdot 230 \cdot 7,5 \cdot 0,5}{0,8} = 269,35$$

9. Службові відрядження.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуються як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$V_{\text{св}} = (Z_o + Z_p) * \frac{H_{\text{св}}}{100\%}, \quad (6.10)$$

де $H_{\text{св}}$ – норма нарахування за статтею «Службові відрядження».

$$V_{\text{св}} = 0,2 * (22159 + 866,1) = 4605,03$$

10. Накладні (загальновиробничі) витрати $V_{\text{нзв}}$ охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо. Накладні (загальновиробничі) витрати $V_{\text{нзв}}$ можна прийняти як (100...150)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які виконували дану МКНР, тобто:

$$V_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (6.11)$$

де $H_{\text{нзв}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

$$V_{\text{нзв}} = (122159 + 866,1) \cdot \frac{200}{100\%} = 46050,28 \text{ грн}$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, які безпосередньо стосуються даного розділу МКНР

$$V = 22159 + 866,1 + 2532,57 + 5622,74 + 171,82 + 7722 + 2812,5 + 269,35 + 4605,03 + 46050,28 = 92811,81 \text{ грн}$$

Прогнозування загальних втрат ZB на виконання та впровадження результатів виконаної МКНР здійснюється за формулою:

$$ZB = \frac{V}{\eta}, \quad (6.12)$$

де η – коефіцієнт, який характеризує стадію виконання даної НДР.

Оскільки, робота знаходиться на стадії науково-дослідних робіт, то коефіцієнт $\beta = 0,4$.

Звідси:

$$ZB = \frac{92811,81}{0,4} = 232029,53 \text{ грн.}$$

6.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки

У даному підрозділі кількісно спрогнозуємо, яку вигоду, зиск можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Розрахуємо збільшення чистого прибутку підприємства $\Delta\Pi_i$, для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, за формулою

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_o \cdot N + \Pi_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (6.13)$$

де $\Delta\Pi_o$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

Π_o – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки:

l – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт $l = 0,8333$.

p – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. $p = 0,25$;

x – ставка податку на прибуток. У 2023 році – 18%.

Припустимо, що ціна від зросте на 500 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року на 600 шт., протягом другого року – на 500шт., протягом третього року на 350 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 1 шт., а її ціна до 2500 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\begin{aligned}\Delta\Pi_1 &= [500 \cdot 1 + (2500 + 500) \cdot 600] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 307573,11 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\Pi_2 &= [500 \cdot 1 + (2500 + 500) \cdot (600 + 500)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 564227,45 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\Pi_3 &= [500 \cdot 1 + (2500 + 500) \cdot (600 + 500 + 350)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 743595,28 \text{ грн.}\end{aligned}$$

6.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розрахуємо основні показники, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності.

Розрахуємо величину початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки.

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B, \quad (6.14)$$

де $k_{\text{інв}}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо ($k_{\text{інв}} = 2 \dots 5$).

$$PV = 3 \cdot 232029,53 = 696088,58$$

Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій $E_{\text{абс}}$ згідно наступної формули:

$$E_{\text{абс}} = (ПП - PV) \quad (6.15)$$

де $ПП$ – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^i}, \quad (6.16)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДЦКР, грн.;

T – період часу, протягом якою виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,2;

t – період часу (в роках).

$$\text{ПП} = \frac{307573,11}{(1 + 0,2)^1} + \frac{564227,45}{(1 + 0,2)^2} + \frac{743595,28}{(1 + 0,2)^3} = 1080458,38 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{абс}} = (1080458,38 - 696088,58) = 384369,81 \text{ грн.}$$

Оскільки $E_{\text{абс}} > 0$ то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів НДДКР може бути доцільним.

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій $E_{\text{в}}$. Для цього користуються формулою:

$$E_{\text{в}} = T_{\text{жс}} \sqrt[3]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1, \quad (6.17)$$

$T_{\text{жс}}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_{\text{в}} = \sqrt[3]{1 + \frac{384369,81}{696088,58}} - 1 = 0,38 = 38\%$$

Визначимо мінімальну ставку дисконтування, яка у загальному вигляді визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (6.18)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2022 році в Україні $d = (0,14 \dots 0,2)$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05 \dots 0,1)$.

$$\tau_{\text{min}} = 0,18 + 0,05 = 0,23$$

Оскільки $E_g > \tau_{\min}$ то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g} \quad (6.19)$$

$$T_{ок} = \frac{1}{0,38} = 2,6 \text{ роки}$$

Оскільки $T_{ок} \leq 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел дозволив зробити висновок, найбільш перспективним методом відновлення робочих поверхонь малоресурсних деталей машин є формування на них зносостійких шарів з найбільш доступних матеріалів у поєднанні з технологіями їх нанесення та подальшої обробки; як матеріали для зносостійких покриттів доцільно використовувати сталі феритного та мартенситного класів; аналіз методів підвищення терміну служби деталей та робочих органів показав, що економічно та ефективно наносити зносостійкі сталеві покриття дешевими та простими методами газополуменевого та електродугового напилення.
2. Електроконтактна обробка покриттів створених газополуменевим та електродуговим напиленням зі сталі Св-08 і 40Х13 підвищує їх зносостійкість 2-4 рази а з використанням наповнювачів в 4-5 разів. Присутність в покритті метастабільного аустеніту блокує зародження і поширення в ньому мікротріщин, які формують частинки зношеного матеріалу, а перетворення аустеніту в мартенсит призводить до появи в ньому напружень стиску, що перешкоджає руйнуванню при терті. Кращу стійкість до абразивного зношування показали покриття із сталі 40Х13, тому робочі деталі машин доцільно виготовляти з покриттям створеним електродуговим напиленням із сталей 40Х13 з подальшою електроконтактною обробкою, а деталі триботехнічних з'єднань - із покриттям отриманим газополуменевим напиленням із наповнювачем і електроконтактною обробкою.
3. Для оцінки якості покриттів отриманих високошвидкісним термоструминним напиленням і покриттів отриманих газополуменевим та електродуговим напиленням з подальшою електроконтактною обробкою необхідно виконати дослідження мікроструктури, аналіз пористості, вимірювання мікротвердості, провести випробування на

тертя та зношування. Для скорочення часу, отримання максимальної інформації і можливості керування параметрами процесу створення покриттів використані методи багатфакторного планування експерименту та математичної обробки статистичних даних. Конструювання плану експерименту проведено за допомогою пакету прикладних програм. Оцінку точності експериментальних результатів проводили за допомогою методів теорії ймовірностей та математичної статистики.

4. Запропоновані спосіб і схема створення зносостійкого покриття розпиленням сталевих дротів з подальшою електроконтактною обробкою та використанням вуглецевмісних наповнювачів за рахунок термо-деформаційного впливу реалізує в покриттях отриманих газополуменевим та електродуговим напиленням з використанням сталей Св-08 і 40Х13 $\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$ перетворення та насичує їх наповнювачами. Визначено раціональні режими електродугового напилення дротяних сталей Св-08 та 40Х13 під електроконтактну обробку. Шляхом математичного моделювання процесу електроконтактної обробки отримані залежності зносостійкості та пористості покриттів від параметрів процесу. Оптимальний режим електроконтактної обробки повинен забезпечувати аустенітно-мартенситне перетворення у матеріалі покриття та уникати його розплавлення.
5. Визначено кількість вогнегасників у виробничому приміщенні. Розроблено превентивні заходи з підвищення безпеки роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій.
6. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на вище середнього рівень комерційного потенціалу триботехнічних можливостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами». Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи по кожній з статей витрат складе 92811,81 грн.

Загальна ж величина витрат на виконання та впровадження результатів даної НДР буде складати 232029,53 грн. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 3 місяці при прогнозованому прибутку 1080458,38 грн. за три роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kolomeichenko A., Titov N. Technology of Reconditioning with Hardening of Working Elements of Construction and Road Machines by Composite Coatings / A. Kolomeichenko, N. Titov // The VI International Scientific and Practical Conference “Information Technologies and Management of Transport Systems” (ITMTS 2020). – 2021. – Vol. 334. – P.02017.
2. A review on wear-resistant coating with high hardness and high toughness on the surface of titanium alloy / H. Bai, L. Zhong, L. Kang et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 882. – P. 160645.
3. Czupryński A. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Metal Matrix Composite Coatings Deposited on Steel Grade AISI 4715 by Powder Plasma Transferred Arc Welding Part 1. Mechanical and Structural Properties of a Cobalt-Based Alloy Surface Layer Reinforced with Particles of Titanium Carbide and Synthetic Metal–Diamond Composite / A. Czupryński // Materials. – 2021. – 14(9). – P. 2382.
4. High Strength and High Wear-Resistant Ti Composites Fabricated by Powder Metallurgy Pressureless Sintering / Y. Liu, Y. Pan, J. Sun et al. // Advanced Materials Technologies. – 2022. - Vol. 7, Iss. 11. – P. 2200219.
5. Мікосянчик О. О., Шамрай В. Б. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей сільськогосподарської техніки композиційними покриттями/ О. О. Мікосянчик, В. Б. Шамрай // Проблеми тертя та зношування. – 2022. – 4 (97). – С. 44-51.
6. Лузан С. О. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей. Курс лекцій / С. О. Лузан, О. І. Сідашенко, С. О. Лузан. – Харків: ХНТУСГ, 2020. – 127 с.
7. Monte Carlo simulation for exploring the mechanical properties of particle-reinforced composites based on the scale boundary finite element method / K. Zhao, R. Guo, G. Liu, Y. Li // Composite Structures. – 2022. – Vol. 297. – P. 115933.

8. Демиденко О. А. Закономірності формування структури та властивостей порошкових композиційних матеріалів на основі заліза та самофлюсівних сплавів багатофункціонального призначення / О. А. Демиденко. – Дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук: 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали. – Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2021. – 227 с.
9. Lin C., Yao Y. Corrosion-Resistant Coating Based on High-Entropy Alloys / C. Lin, Y. Yao // *Metals*. – 2023. – 13(2). – P. 205.
10. Tunable Coefficient of Thermal Expansion of Composite Materials for Thin-Film Coatings / Long X., Su T., Chen Z., et al. // *Coatings*. – 2022. – 12(6). – P.836
11. Anisimov, V. N. Technological features of processing linear Block-polyurethanes of different morphology / V. N. Anisimov, V. V. Anisimov // *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. – 2019. – № 4. – P. 5–11.
12. Тимофеева, Л. А. Підвищення трибологічних властивостей поверхневого шару чавуну за допомогою оброблення в середовищі перегрітої пари водяного розчину солей / Л. А. Тимофеева, С. С. Тимофеев, Л. В. Волошина, М. А. Колесник // *Вісник ХНАДУ*. – 2021. – вип. 94. – С. 123–127
13. Кропивний, В. М. Чавун з вермикулярним графітом : навч. посібн. / В. М. Кропивний, О. В. Кузик, А. В. Кропивна, Г. М. Засінець. – Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2019. – 222 с.
14. Tuet, Luqiang Wear behaviors of cubic boron nitride tools with various binders in high-speed turning of compacted graphite irons / Liangliang Lin, Zhenming Yang et al. // *Wear*. – 2022. – vol. 504–505. – 204417
15. Lin, Yongchuan Wear mechanism and tool life prediction of high-strength vermicular graphite cast iron tools for high-efficiency cutting /, Shengjian He, Debin Lai et al. // *Wear*. – 2020. – vol. 454–455. – 203319
16. Тимофеева, Л. А. Модифікація поверхні деталей машин і механізмів в умовах тертя та зношування / Л. А. Тимофеева, Л. В. Волошина, С. С.

- Тимофєєв та ін. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – Серія : Технології в машинобудуванні.– № 2 (6). – С. 104–1090.
17. Komarova, G. Influence of ferrimagnetic resonance on conversion of electromagnetic energy by a YIG resonator into mechanical one / G. Komarova // Radiotekhnika. – 2021. – 4(207). – P. 149–158.
18. Тимофєєва, Л. А. Підвищення трибологічних властивостей поверхневого шару чавуну за допомогою оброблення в середовищі перегрітої пари водяного розчину солей / Л. А. Тимофєєва, С. С. Тимофєєв, Л. В. Волошина, М. А. Колесник // Вісник ХНАДУ. – 2021. – вип. 94. – С. 123–127.
19. Кривошея, А. В. Аналіз процесу зубохонінгування зубчастих коліс після зубошевінгування та термообробки / А. В. Кривошея, В. В. Возний, В. Є. Мельник, М. М. Підгаєцький // Сучасна спеціальна техніка. – 2019. – № 3. – С. 75–86.
20. Lavrinenko, V. I. To the analysis of the estimate of energy expenditures in the diamond abrasive treatment by wheels from superhard materials / V. I. Lavrinenko // J. of Superhard Mat. – 2022. – vol. 44, № 4. – P. 285–291.
21. Lavrinenko, V. Determining the conditions for achieving the plastic regime of diamond grinding of ceramics from the standpoint of estimating energy costs of processing / V. Lavrinenko, V. Solod // J. of Superhard Mat. – 2023. – vol. 45, № 1. – P. 65–71.
22. Wu, Kongping. Two-dimensional hole gas formed at diamond surface by Al₂O₃/diamond interface engineering / Kongping Wu, Yong Zhang, Jianli Ma et al. // Diamond and Related Mat. – 2020. – vol 105. – 107807.
23. Deng, Ao. Exploring the activation energy of diamond reacting with metals and metal oxides by first-principle calculation / Ao Deng, Jing Lu, Dongxu Li, Yanhui Wang // Diamond and Related Mat. – 2021. – vol. 118. – 108522.
24. Chen, Naichao. Growth and characterization of chemical vapor deposition diamond coating incorporated amorphous carbon with high Raman bands

- induced by CuO particles / Naichao Chen, Fasong Ju, Fan Zhou et al. // *Diamond and Related Mat.* – 2021. – vol. 116. – 108387.
25. Herrmann M., Matthey B., Gestrich T. Boron-doped diamond with improved oxidation resistance / M. Herrmann, B. Matthey, T. Gestrich // *Diamond and Related Mat.* – 2019. – vol. 92. – P. 47–52.
26. Sun, Youhong / Enhancement of oxidation resistance via titanium boron carbide coatings on diamond particles / Youhong Sun, Chi Zhang, Jinhao Wu et al. // *Diamond and Related Mat.* – 2019. – vol. 92. – P. 74–80.
27. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с
28. НПА ОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php.
29. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
30. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
31. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>
32. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>
33. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

34. Сакевич В. Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах / В. Ф. Сакевич. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 109 с.
35. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

ДОДАТОК А**ЗАТВЕРДЖУЮ****Завідувач кафедри ГМ****д. т. н., професор Леонід ПОЛЩУК,**_____
(підпис)

« ____ » _____ 2023

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

**на дослідження триботехнічних можливостей комбінованих покриттів з
вуглецевмісними наповнювачами**

Розробив студент**Спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»****Ярослав НАЗРУК**

« ____ » _____ 2023

Керівник: д. т. н., доцент**Роман СИВАК**

1 Найменування і область застосування

Найменування – зносостійке покриття

2 Підстава для виконання роботи

Підставою для розробки даного дипломного проекту є індивідуальне завдання на магістерську кваліфікаційну роботу та наказ ректора по ВНТУ про закріплення тем.

3 Мета і призначення дослідження

Мета: підвищення зносостійкості газотермічних покриттів деталей із сталей мартенситного та феритного класів шляхом їх електроконтактної обробки з використанням вуглецевмісних наповнювачів.

Призначення розробки – відновлення деталей машин.

4 Джерела розробки

Список використаних джерел розробки:

- 4.1 Мікосянчик О. О., Шамрай В. Б. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей сільськогосподарської техніки композиційними покриттями/ О. О. Мікосянчик, В. Б. Шамрай // Проблеми тертя та зношування. – 2022. – 4 (97). – С. 44-51.
- 4.2 Лузан С. О. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей. Курс лекцій / С. О. Лузан, О. І. Сідашенко, С. О. Лузан. – Харків: ХНТУСГ, 2020. – 127 с.
- 4.3 Monte Carlo simulation for exploring the mechanical properties of particle-reinforced composites based on the scale boundary finite element method / K. Zhao, R. Guo, G. Liu, Y. Li // Composite Structures. – 2022. – Vol. 297. – P. 115933.
- 4.4 Демиденко О. А. Закономірності формування структури та властивостей порошкових композиційних матеріалів на основі заліза та самофлюсівних сплавів багатофункціонального призначення / О. А.

Демиденко. – Дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук: 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали. – Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2021. – 227 с.

4.5 Lin C., Yao Y. Corrosion-Resistant Coating Based on High-Entropy Alloys / C. Lin, Y. Yao // Metals. – 2023. – 13(2). – P. 205.

5 Вихідні дані для розробки:

| | | |
|---|-------------------------|---------------------|
| 1 | Тип покриття | 40X13, Св-08 |
| 2 | Горюча суміш | ацетилен, кисень |
| 3 | Відстань, мм | 150 |
| 4 | Товщина шару, мм | 1,0-1,2 |
| 5 | Струм нагрівання, кА | 3,5 |
| 6 | Тиск, МПа | 20 |
| 7 | Час нагрівання, с | 8-10 |
| 8 | Час імпульсів (пауз), с | 0,02-0,04 |

5.1 Технічні вимоги

Технічна характеристика установки для електроконтактної обробки:

- максимальний струм - 19 ± 1.9 кА
- максимальна споживана потужність - 124 ± 12 кВА
- максимальне завантаження – 630 кгс
- час обробки - 1 ... 198 с
- продуктивність - > 20 деталей/година
- розміри - 760x1970x590 мм
- маса - 360 кг

5.2 Вимоги до надійності:

довговічність – не менше 10 тис. год; безвідмовність – напрацювання на відмову – 1 тис. год; збереженість – повинна забезпечуватися працездатність

трибозеднання в режимі очікування, роботи, консервації; ремонтпридатність – відновлена деталь повинна відповідати вимогам експлуатації.

5.3 Вимоги до технологічності розробки, виробництва і експлуатації – технологія відновлення деталей машин повинна забезпечувати високу твердість та зносостійкості поверхневих шарів, а також відновлення поверхні зношених деталей.

5.4 Вимоги до рівня уніфікації і стандартизації, вимоги до використання стандартних, уніфікованих і запозичених складальних одиниць і деталей при розробці, показники рівня уніфікації – по можливості під час дослідження триботехнічних можливостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами використовувати уніфіковані деталі, стандартні вироби та загальнодоступні матеріали і речовини.

5.5 Вимоги безпеки життєдіяльності – забезпечується безпека під час монтажу і ремонті. Допустимі рівні вібраційних і шумових навантажень, допустимі випаровування робочої рідини у відповідності з санітарними нормами. Повинні бути розроблені заходи, що забезпечують технічну безпеку під час монтажу, експлуатації і ремонті пристрою.

5.6 Конструкція повинна відповідати естетичним і ергономічним вимогам, повинна бути зручною в обслуговуванні та управлінні.

5.7 Матеріали, що використовуються для деталей слід вибирати відповідно до рекомендацій.

5.8 Умови експлуатації, вимоги до технічного обслуговування і ремонту:

–умови експлуатації, при яких повинно забезпечуватися використання продукції з заданими технічними показниками – продукція призначена для використання у середньоширотних кліматичних умовах;

–час підготовки продукції до використання після транспортування і зберігання – 10 год;

–вид обслуговування - періодичний;

–періодичність і орієнтовна трудомісткість технічного обслуговування і ремонту – 2 дні (один раз в три місяці);

5.9 Вимоги по транспортуванню і збереженню

- можливість транспортування на будь-якому виді транспортних засобів
- захист від ударів під час завантаження і розвантаження
- зберігання на складі готової продукції
- зберігання у законсервованому вигляді
- складування на стелажах.

6 Економічні показники:

- орієнтований термін окупності витрат на розробку – 3 місяці,
- освоєння виробництва продукції – 1 місяць,
- економічна перевага розробленої продукції у порівнянні з кращими зразками – прогнозований прибуток 1 080 458,38 грн. за три роки.

7 Виконавці НДР: студент спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Ярослав НАЗАРУК

8 Етапи НДР і терміни їх виконання:

- теоретичне дослідження проблематики теми МКР;
- патентно-інформаційний огляд по темі МКР
- дослідження триботехнічних можливостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами;
- проектні та перевірочні розрахунки елементів обладнання;
- техніко-економічне обґрунтування МКР;
- охорона праці;
- висновки.
- оформлення текстових документацій та ілюстративних матеріалів для захисту МКР.

9 Порядок контролю і прийомки

- попередній захист проекту
- захист проекту перед МКР

ДОДАТОК Б

Схеми газополуменевого, електродугового напилення та електродукторної обробки

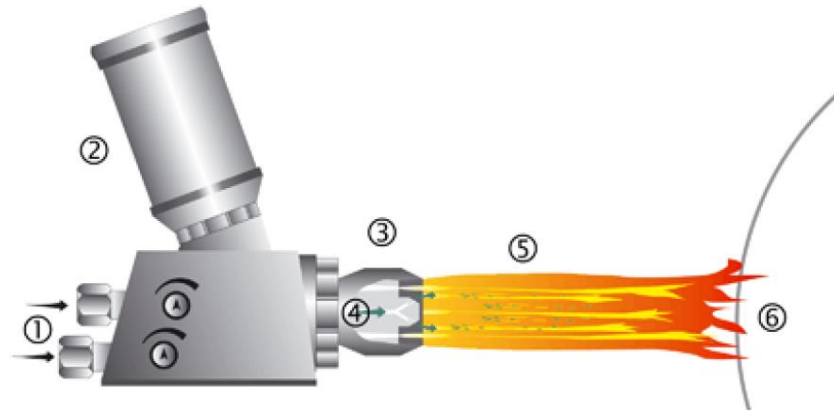


Рис. 1. Газополуменево напилення: 1 – ацетилен; 2 – кисень; 3 – ємність із порошком; 4 – газ; 5 – ацетилен-кисневе полум'я та напилювані частки; 6 – деталь

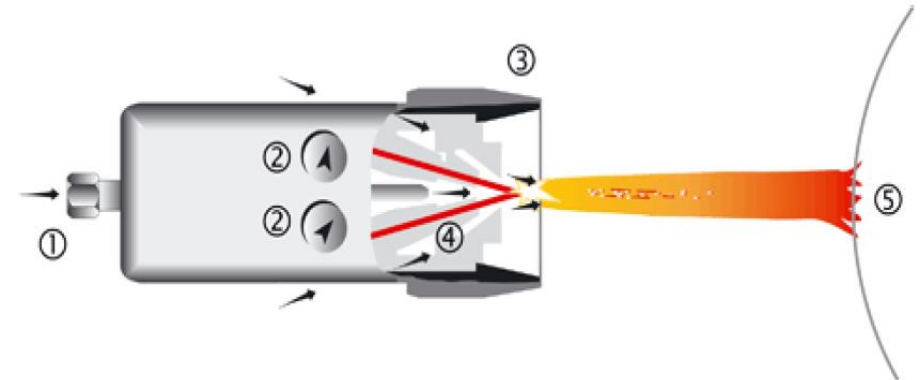


Рис. 2. Електродугове напилення: 1 - газ, що розпилює; 2 – регульована подача дроту; 3 – сопло; 4 - електропровідний дріт; 5 – деталь

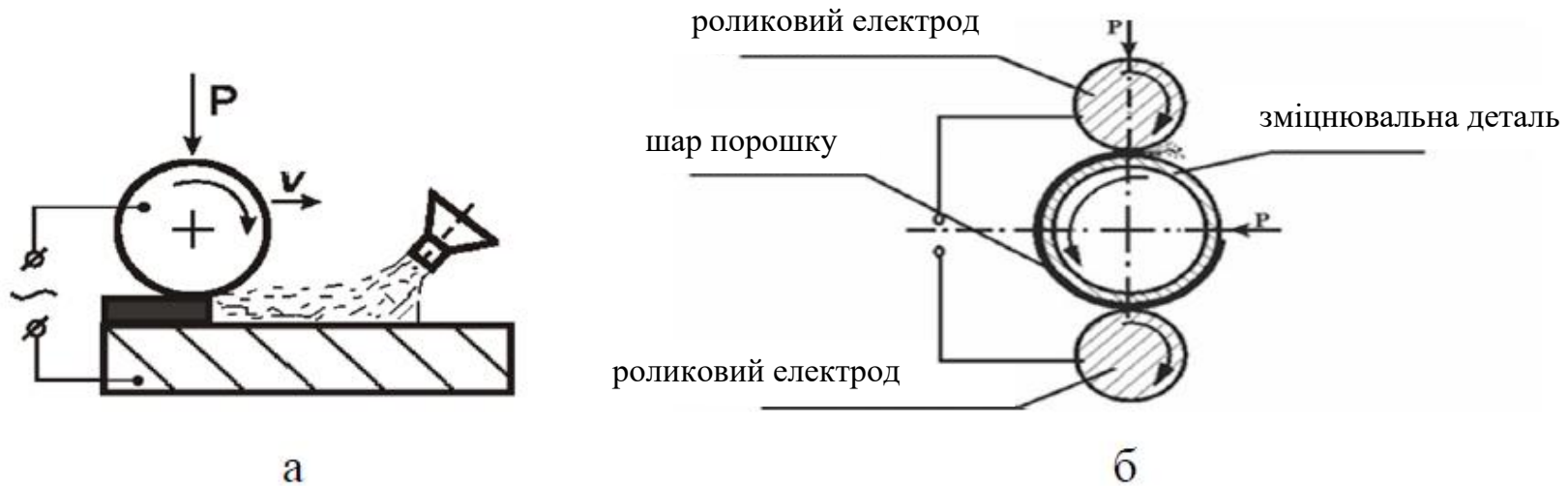


Рис. 3. Схема електродукторної обробки напилених покриттів (а) та технологічна схема електродукторної обробки (б)

Дослідження триботехнічних властивостей газотермічних покриттів з вуглецевмісними наповнювачами після їх електроконтактної обробки

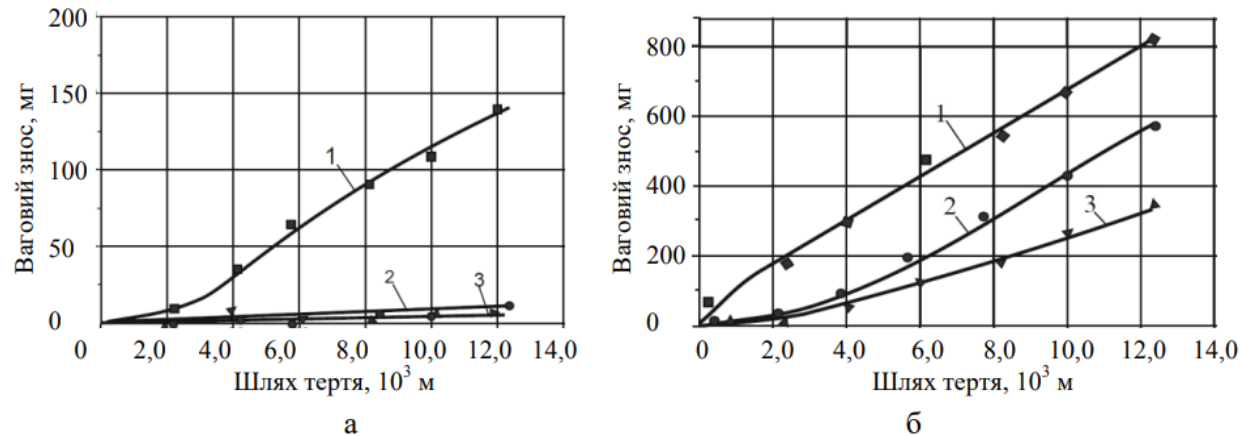


Рис. 4. Залежність вагового зносу $I_q(a)$ від шляху тертя (тертя без змащення, $p_a=3$ МПа) для зразків з покриттями із дротяних сталей 40X13 (а, б) і Св-08 (б): 1 – покриття газополуменевим напиленням; 2 – покриття газополуменевим напиленням і електроконтактна обробка; 3 – покриття газополуменевим напиленням з ультрадисперсною алмазо-графітовою шихтою і електроконтактна обробка

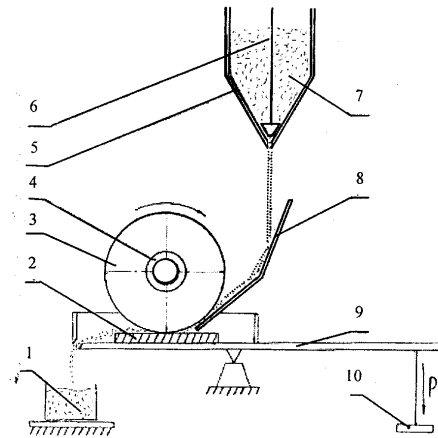


Рис. 5. Випробування зразків в умовах абразивного зношування

Матеріали та технічні характеристики устаткування для напилення покриттів

Табл. 1. Хімічний склад сталей мартенситного (40X13) та феритного (Св-08) класів

| Марка матеріалу | Концентрація елементів, мас. % | | | | | | | Твердість після напилення, HV |
|-----------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|--------|-------------------------------|
| | C | Cr | Ni | Ti | Mn | Si | Fe | |
| 40X13 | 0,42 | 13,4 | 0,54 | 0,13 | 0,44 | 0,27 | основа | 360...420 |
| Св08 | 0,06 | 0,1 | – | – | 0,40 | 0,25 | основа | 250...300 |

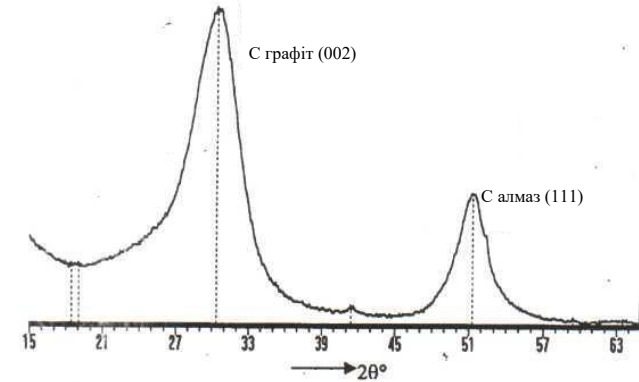


Рис. 6. Фрагмент рентгенівської дифрактограми алмазографітової шихти

Табл. 2. Технічна характеристика дротяного терморозпилювача

| Показник | Значення |
|--|---------------|
| Продуктивність, кг/год | 2,8 |
| Коефіцієнт використання матеріалу, що наноситься | 0,90 |
| Діаметр дротів, що розпилюються, мм | 1,6-4,0 |
| Швидкість подачі дротів, м/хв | 0,4-20 |
| Максимальне зусилля протягування дроту, Н | 125 |
| Привід подачі дроту | Електродвигун |
| Максимальна робоча напруга електродвигуна, В | 27 |
| Робочий тиск газів, МПа: | |
| кисень | 0,2-0,4 |
| ацетилен | 0,1 |
| пропан-бутан | 0,1-0,2 |
| повітря | до 50 |
| Витрата газів, м ³ /год: | |
| кисень | 4,0 |
| ацетилен | 1,0 |
| пропан-бутан | 0,5-1,0 |
| повітря | до 50 |
| Вага терморозпилювача, кг | 2,5 |
| Розмір пістолета-терморозпилювача, мм | 278x106x240 |
| Розміри блока ручного керування, мм | 410x150x90 |
| Вага блока ручного керування, кг | 2,85 |

Табл. 3. Технічні характеристики обладнання для електродугової металізації та активованого електродугового напилення

| Показник | Електродуговий апарат | |
|---|-----------------------|--------|
| | Стационарний | Ручний |
| Продуктивність розпилення сталі, кг/год | 20,0 | 10,0 |
| Швидкість подачі дроту, м/хв. | 3,81-4,2 | 2...12 |
| Коефіцієнт використання матеріалу | 0,70 | 0,75 |
| Робочий струм, А | 500 | 400 |
| Витрата повітря при 0,6МПа, м ³ /год | 150 | 90 |
| Витрата пропан-бутану, кг/год | - | - |

Аналіз параметрів та вибір режимів процесів газополуменевого та електродугового напилення

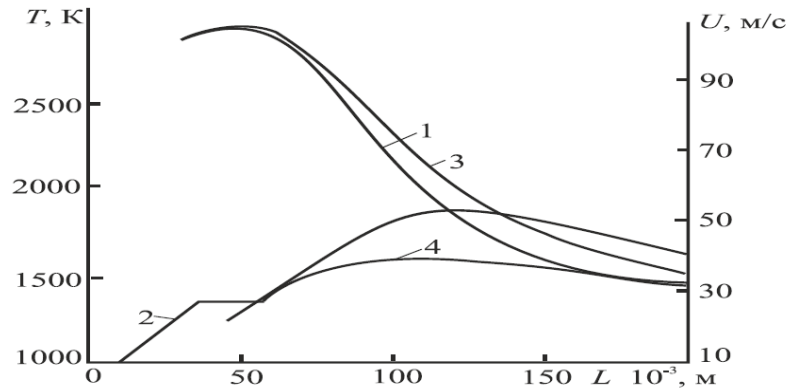


Рис. 7. Залежності температури (1, 2) та швидкості (3, 4) газополуменевого струменя (1, 3) та частинок (2, 4) розпилюваного матеріалу дроту 40X13. Режим напилення: тиск – 0,1 МПа; витрата ацетилену - 1,0 м³/годину; витрата кисню - 0,9 МПа; тиск стисненого повітря – 0,16 МПа; витрати ацетилену - 2,00 м³/год кисню - 0,5 м³/годину

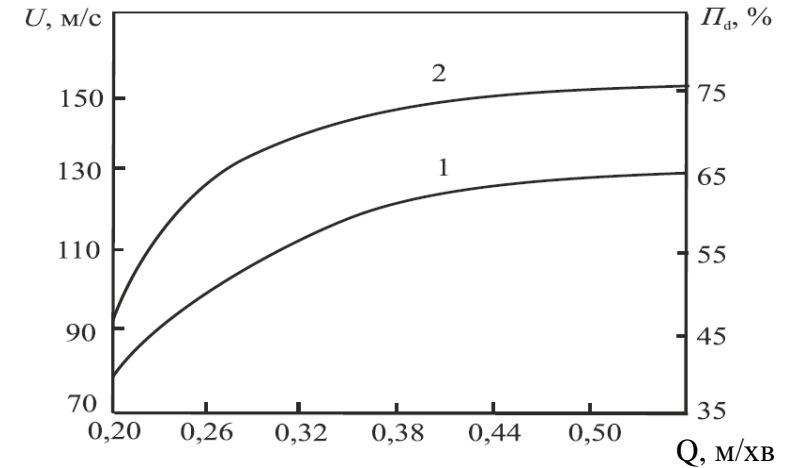


Рис. 8. Вплив витрати повітря на швидкість польоту і кількість частинок розміром менше 15 мкм розпилюваних сталевих дротів 50X13 (1) та Cv-08 (2) діаметром 2 мм (використовувалися середні значення)

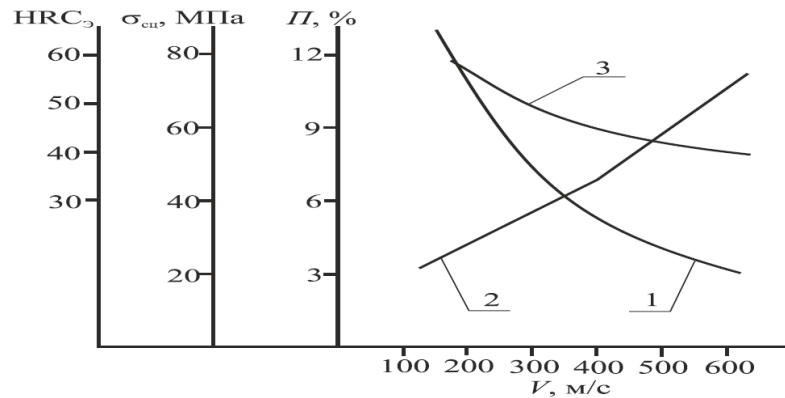


Рис. 9. Вплив швидкості витікання повітря із сопла (V , м/с) на властивості покриттів при електродуговому напиленні: 1 пористість (Π , %); 2- міцність зчеплення ($\sigma_{зч}$, МПа); 3- твердість (HRC_c)

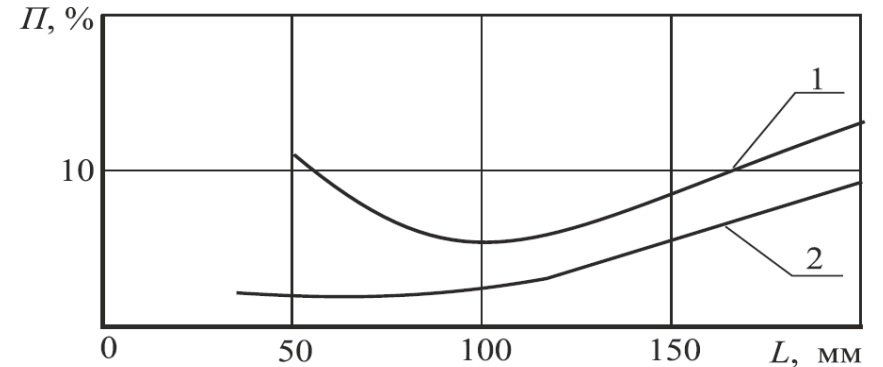


Рис. 10. Залежність пористості покриттів від дистанції напилення при різних швидкостях переміщення електродугового апарату: 1- $P_r = 0,6$ МПа; $V_m = 0,2$ м/с; 2 – $P_r = 0,6$ МПа; $V_m = 0,6$ м/с

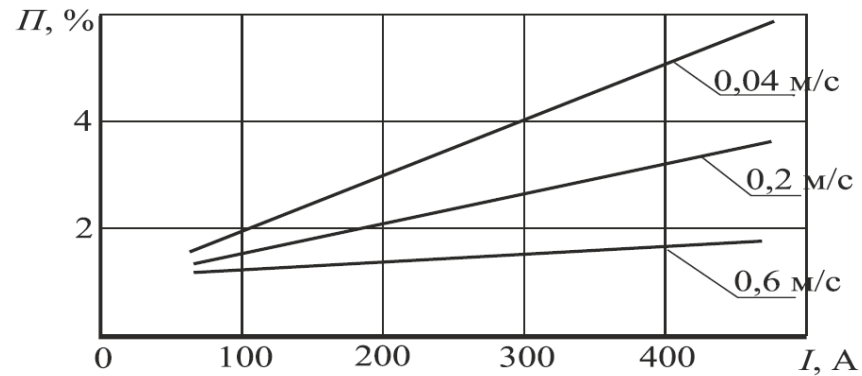


Рис. 11. Вплив робочого струму дуги на пористість покриттів отриманих електродуговим напиленням, при збільшенні швидкості $V_{\text{пм}}$ переміщення апарату для напилення

Особливості електроконтактної обробки газотермічних покриттів

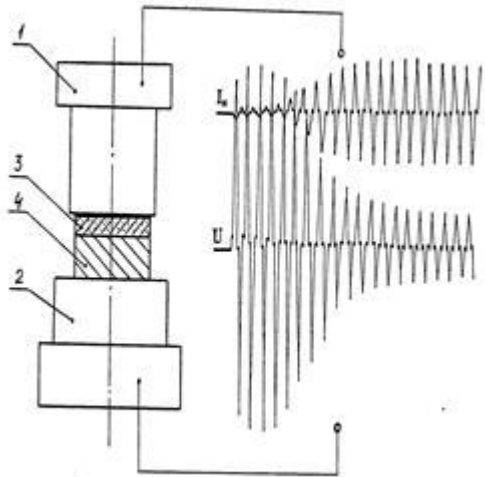


Рис. 12. Електроконтактна обробка напилених зразків

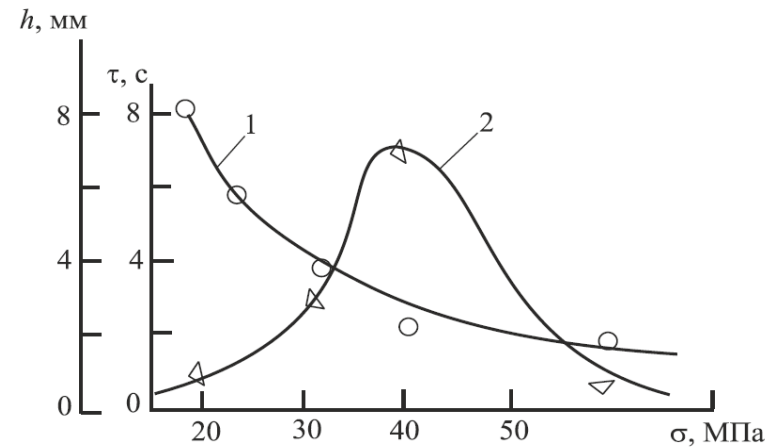


Рис. 13. Вплив тиску при електроконтактній обробці на тривалість процесу (1) та глибину зони термічного впливу (2)

Схеми, методи і режими формування покриттів

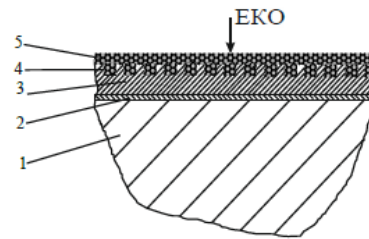


Рис.14.Схема зносостійкого покриття:

- 1 - основа (сталь Ст. 3);
 2 - прошарок (сталь Х20Н80);
 3 - ГПН/ЕДН - покриття зі сталей 40Х13/Св08;
 4 - пори в поверхневому шарі покриття;
 5 - вуглецевмісні наповнювачі (колоїдний графіт, УДАГ).

Таблиця 4

Методи і режими формування зносостійких покриттів

| МЕТОД | Характеристика методів | | | |
|--|---|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| | Матеріал покриття | Робочі Гази | Відстань наплення, мм | Товщина шару покриття, мм |
| Газотермічне наплення (ГПН, ЕДН) | 40Х13 Св-08 | Пропан + кисень | 150 – 180 | 1,0 - 1,5 |
| Електрохімічне полірування (відкриття пор) | Склад електроліту | Температура електроліту, °С | Густина струму, А/см ² | Тривалість процесу, хв. |
| | Н ₃ РО ₄ (760 г)+СгО ₃ (100 г) | 40 – 50 | 0,5 | 8,0 - 10,0 |
| Ультразвукова Обробка | Тип вуглецевмісного наповнювача | Частота колювання, кГц | Тривалість процесу, хв. | Робоче середовище |
| | Колоїдний графіт, УДАГ, 0,5 об. %. | 44,0 | 7,0-8,0 | Спирт етиловий С ₂ Н ₅ ОН |
| Електроконтактна обробка | Сила струму, кА I | Тиск, МПа Р | Тривалість ЕКО, Т, с | Час імпульсів, t _{ім} і пауз t _п , с |
| | 3,0-0,8 | 10 – 60 | 8-10 | 0,02...0,04 |

Математичні моделі, що встановлюють зв'язок зносостійкості і пористості покриттів з технологічними характеристиками електроконтактної обробки

$$Y_1 = 3,25576 + 2,37774x_3^2 - 2,07533x_2^3 + 0,545923x_1^3 x_2 - 0,842191x_1^3 + 0,284621x_2^3 x_3^2 - 1,51418x_1^2 x_2^2 - 1,45394x_3^3 - 0,73219x_1^3 x_2^2 - 1,95605x_2 x_3^3 - 1,65074x_2^2 + 1,15314x_2^2 x_3^3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,00811228 + 0,00394767x_2 x_3^2 + 0,00349501x_2^3 x_3^2 + 0,00250342x_1^3 x_2^2 x_3^2 - 0,00381417x_1^3 x_2^2 x_3^3 - 0,00172934x_2^3 + 0,000583571x_2 + 0,00135172x_2^3 x_3^3 - 0,00107438x_1^3 + 0,00212148x_3^2 + 0,00132599x_2^2 - 0,00223146x_1 + 0,00162397x_3 \quad (2)$$

де Y_1 , Y_2 – математична модель в кодованих значеннях для пористості та зносостійкості покриття відповідно.

Оптимізація технологічного процесу електроконтактної обробки

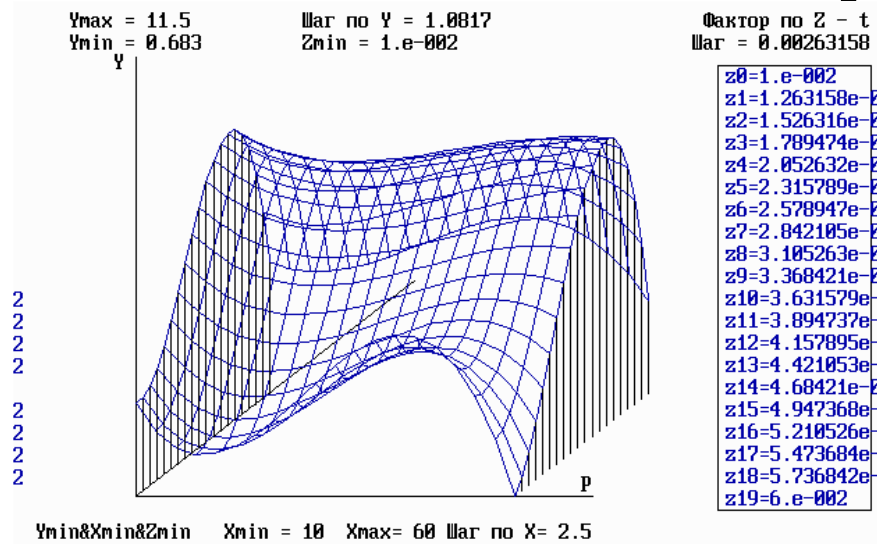


Рис. 15. Графіки проходження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_2)$ у тривимірному просторі при $X_3 = 2$ кА (пористість)

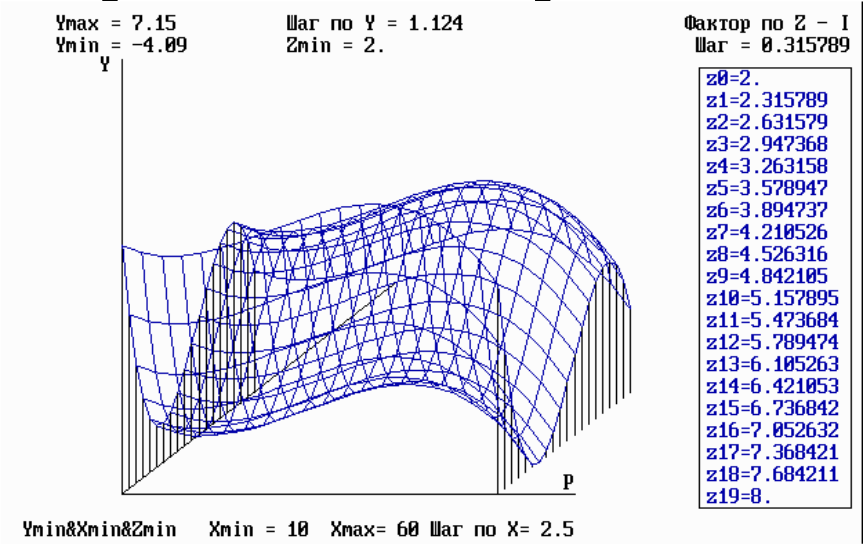


Рис. 16. Графіки проходження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_2)$ у тривимірному просторі при $X_2 = 0,06$ с (пористість)

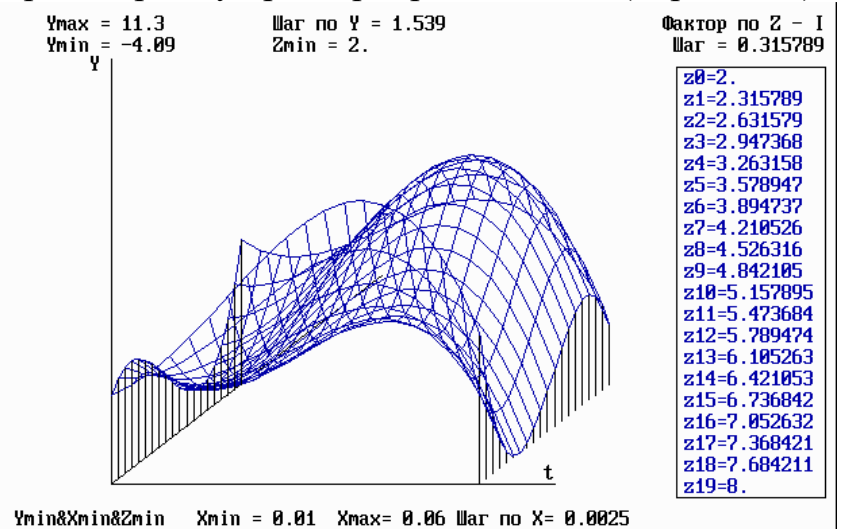


Рис. 17. Графіки проходження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_2)$ у тривимірному просторі при $X_1 = 60$ МПа (пористість)

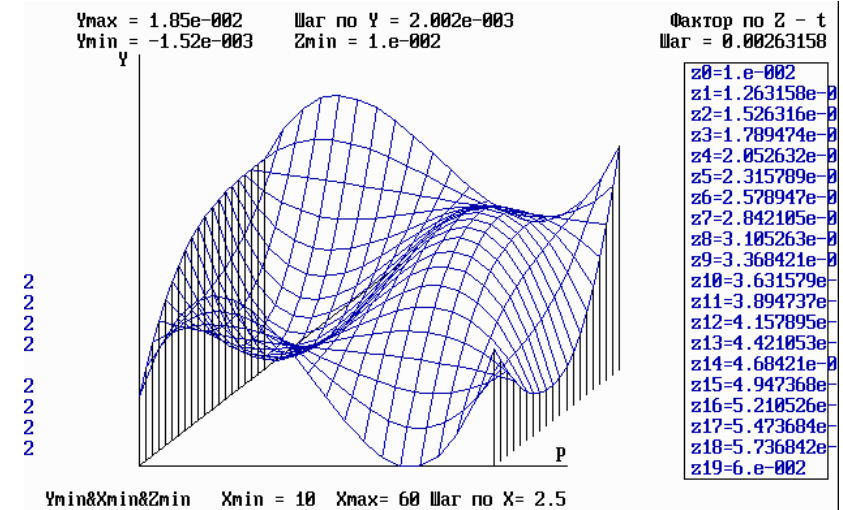


Рис. 18. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_1, X_2)$ у тривимірному просторі за $P_{min} = 10$ МПа, $P_{max} = 60$ МПа (зносостійкість)

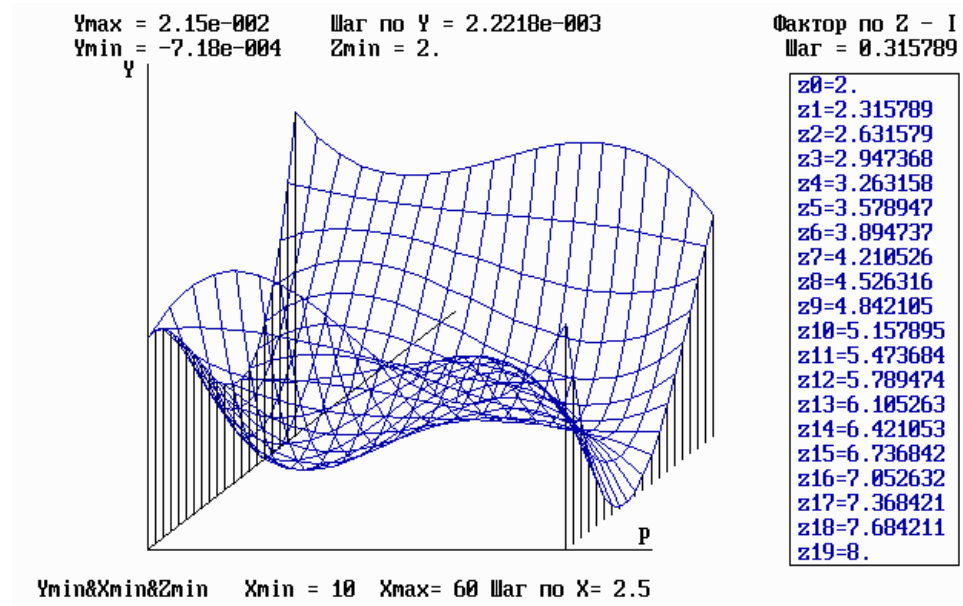


Рис. 19. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_1, X_2)$ у тривимірному просторі за $X_2 = 0,06$ с (зносостійкість)

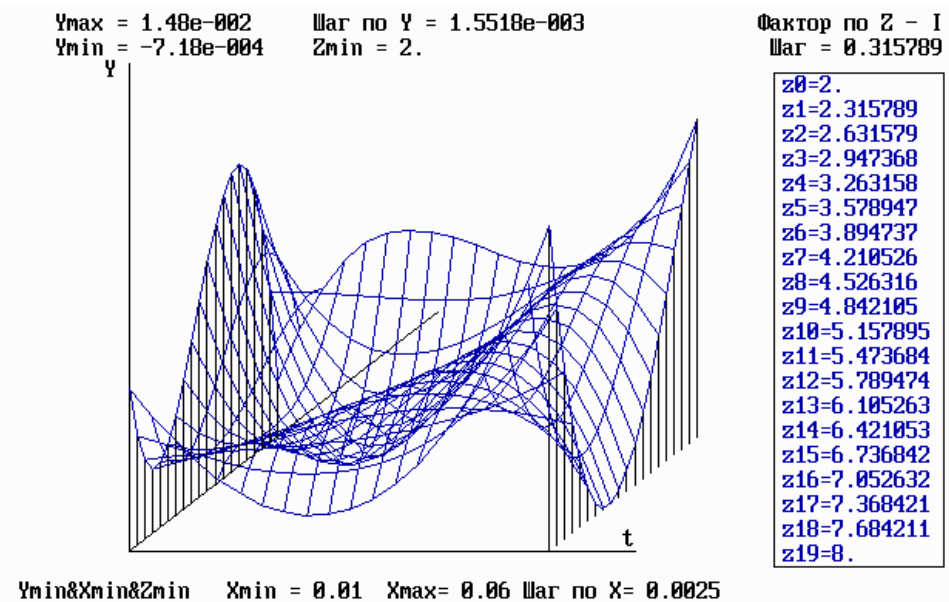


Рис. 20. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_1, X_2)$ у тривимірному просторі за $X_1 = 60$ МПа (зносостійкість)

Висновки

1. Аналіз літературних джерел дозволив зробити висновок, найбільш перспективним методом відновлення робочих поверхонь малоресурсних деталей машин є формування на них зносостійких шарів з найбільш доступних матеріалів у поєднанні з технологіями їх нанесення та подальшої обробки; як матеріали для зносостійких покриттів доцільно використовувати сталі феритного та мартенситного класів; аналіз методів підвищення терміну служби деталей та робочих органів показав, що економічно та ефективно наносити зносостійкі сталеві покриття дешевими та простими методами газополуменевого та електродугового напилення.
2. Електроконтактна обробка покриттів створених газополуменевим та електродуговим напиленням зі сталі Св-08 і 40Х13 підвищує їх зносостійкість 2-4 рази а з використанням наповнювачів в 4-5 разів. Присутність в покритті метастабільного аустеніту блокує зародження і поширення в ньому мікротріщин, які формують частинки зношеного матеріалу, а перетворення аустеніту в мартенсит призводить до появи в ньому напружень стиску, що перешкоджає руйнуванню при терті. Кращу стійкість до абразивного зношування показали покриття із сталі 40Х13, тому робочі деталі машин доцільно виготовляти з покриттям створеним електродуговим напиленням із сталей 40Х13 з подальшою електроконтактною обробкою, а деталі триботехнічних з'єднань - із покриттям отриманим газополуменевим напиленням із наповнювачем і електроконтактною обробкою.
3. Для оцінки якості покриттів отриманих високошвидкісним термоструминним напиленням і покриттів отриманих газополуменевим та електродуговим напиленням з подальшою електроконтактною обробкою необхідно виконати дослідження мікроструктури, аналіз пористості, вимірювання мікротвердості, провести випробування на тертя та зношування. Для скорочення часу, отримання максимальної інформації і можливості керування параметрами процесу створення покриттів використані методи багатофакторного планування експерименту та математичної обробки статистичних даних. Конструювання плану експерименту проведено за допомогою пакету прикладних програм. Оцінку точності експериментальних результатів проводили за допомогою методів теорії ймовірностей та математичної статистики.
4. Запропоновані спосіб і схема створення зносостійкого покриття розпиленням сталевих дротів з подальшою електроконтактною обробкою та використанням вуглецевмісних наповнювачів за рахунок термо-деформаційного впливу реалізує в покриттях отриманих газополуменевим та електродуговим напиленням з використанням сталей Св-08 і 40Х13 $\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$ перетворення та насичує їх наповнювачами. Визначено раціональні режими електродугового напилення дротяних сталей Св-08 та 40Х13 під електроконтактну обробку. Шляхом математичного моделювання процесу електроконтактної обробки отримані залежності зносостійкості та пористості покриттів від параметрів процесу. Оптимальний режим електроконтактної обробки повинен забезпечувати аустенітно-мартенситне перетворення у матеріалі покриття та уникати його розплавлення.
5. Визначено кількість вогнегасників у виробничому приміщенні. Розроблено превентивні заходи з підвищення безпеки роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій.
6. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на вище середнього рівень комерційного потенціалу триботехнічних можливостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами. Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи по кожній з статей витрат складе 92811,81 грн. Загальна ж величина витрат на виконання та впровадження результатів даної НДР буде складати 232029,53 грн. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 3 місяці при прогнозованому прибутку 1080458,38 грн. за три роки.

ДОДОТОК В
ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Дослідження триботехнічних можливостей комбінованих покриттів з вуглецевмісними наповнювачами»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

(БДР, МКР)

Підрозділ: кафедра «Галузевого машинобудування», ФМТ

(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 86,9% Схожість 13,1%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ✓ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна
за перевірку

(підпис)

Шенфельд В. Й.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи

(підпис)

Назарук Я. В.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Сивак Р. І.

(прізвище, ініціали)