

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

«__» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство _____

освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство» _____

на тему: «Структурування борвмісних покриттів, отриманих методом електроіскрового легування, на конструкційних сталях» _____

Здобувача групи _____ МТ.м-21 _____ Новітченко Андрій Ігорович

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

_____ Андрій НОВІТЧЕНКО

Керівник _____
завідувачка кафедри ПМ і ТКМ,
д.т.н., проф. Оксана ГАПОНОВА _____

Нормоконтроль _____
доцент кафедри ПМ і ТКМ
к.т.н., доц. Андрій ДЕГУЛА _____

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра «Прикладне матеріалознавство та технології конструкційних
матеріалів»
зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ О. П. Гапонова

«___» _____ 2023 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Новітченко Андрій Ігорович

1. Тема проекту (роботи) «Структурування борвмісних покриттів, отриманих методом електроіскрового легування, на конструкційних сталях» затверджена наказом по університету від 09.11.2023 року №1254-VI.

2. Термін здачі студентом закінченого проекту(роботи)_____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) зразки, матеріали для проведення дослідження структурного стану модифікованих шарів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1. Аналіз літературних джерел та вибір основних напрямів дослідження.

2. Загальна методика та основні методи дослідження.

3. Експериментальні дослідження та загальні результати.

4. Економічна частина.

5. Охорона праці, довкілля та техніка безпеки.

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

10 слайдів презентації, що відображають зміст роботи.

6. Консультанти з проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Говорун Т. П.	06.11.2023	11.12.2023
Економічна частина	Берладір Х. В.	06.11.2023	10.11.2-23

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури за темою роботи і вибір напрямів досліджень	Листопад 2023	виконано
2	Загальна методика та основні методи дослідження	Листопад 2023	виконано
3	Експериментальні дослідження та обговорення результатів	Листопад - грудень 2023	виконано
4	Економічна частина	Грудень 2023	виконано
5	Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Грудень 2023	виконано

7. Дата видачі завдання _____

Студент _____

(підпис)

Керівник проекту _____

(підпис)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається з 68 сторінок, які містять 6 таблиць, 9 рисунків, список із 47 використаних джерел на 6 сторінках.

Насьогодні розроблені різноманітні методи підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя. Найбільшої актуальності набувають технології отримання зносостійких та зміцнених покриттів високоенергетичною обробкою. Кожен із відомих в даний час методів мають свої переваги та недоліки, що обмежують сферу їх застосування. Тому розробка ефективного, досить простого для освоєння в промисловому виробництві та економічного методу підвищення зносостійкості залишається актуальним науковим та практичним завданням.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування зносостійких покриттів на сталевій підкладці методом електроіскрового легування, що забезпечують підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести аналіз відомих методів поверхневого зміцнення конструкційних сталей та сплавів, що забезпечують модифікацію їх структури, підвищення механічних та триботехнічних властивостей, та визначити напрямок досліджень у роботі.

2. Провести експериментальне дослідження впливу матеріалів вихідних матеріалів та режимів електроіскрового легування на структуру та хімічний склад покриттів..

3. Дослідити залежності мікротвердості покриттів від енергетичних режимів електроіскрового легування.

4. На основі експериментальних досліджень розробити практичні рекомендації щодо призначення оптимальних технологічних режимів електроіскрового легування, що забезпечують максимально високу зносостійкість пар тертя.

Методи дослідження: експериментальні дослідження мікроструктури методами оптичної й електронної мікроскопії, визначення мікротвердості та отримання її розподілу в модифікованих поверхнях.

Об'єкт дослідження – процеси одержання на сталевих поверхнях покриттів для підвищення зносостійкості.

Предмет дослідження – закономірності формування структури та складу зносостійких покриттів, отриманих методом ЕІЛ.

Практичне значення одержаних результатів. На основі дослідження структуроутворення зносостійких покриттів системи Al-C-B запропоновані режими електроіскрового легування сталевих поверхонь відповідальних деталей машин.

Ключові слова: покриття, структура, сталь, бор, мікротвердість.

ABSTRACT

Novitchenko Andrii. Structure formation of boron-based coatings on steels deposited by the electrospark alloying method. – The manuscript.

Qualifying paper for obtaining the qualification of master's degree in the specialty 132 – Materials Science. – Sumy State University, Sumy, 2023.

Various methods have been developed to increase the wear resistance of friction unit parts. Technologies for producing wear-resistant and hardened coatings using high-energy processing are becoming increasingly relevant. Each of the currently known methods has its own advantages and disadvantages that limit their scope of application. Therefore, the development of an effective, simple enough to master in industrial production and economical method of increasing wear resistance remains an urgent scientific and practical task.

The purpose of the work is to establish the regularities of the formation of wear-resistant coatings on a steel substrate by the method of electrospark alloying, which ensure an increase in the wear resistance of steel parts of friction nodes.

Based on the study of structure formation of wear-resistant coatings of the Al-C-B system, modes of electrospark alloying of steel surfaces of critical machine parts are proposed.

Key words: coating, structure, steel, boron, microhardness.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	11
1.1 Поверхнєве пластичне деформування	11
1.2 Хіміко-термічна обробка	13
1.3 Високоенергетичні методи зміцнення	16
1.4 Висновок	23
1.5 Мета та завдання дослідження.....	24
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	25
2.1 Вибір матеріалу дослідження.....	25
2.2 Устаткування та методика електроіскрової обробки	27
2.3 Металографічний аналіз	29
2.4 Електронно-мікроскопічні дослідження.....	32
2.5 Дослідження мікротвердості.....	34
2.6 Висновок	36
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	37
3.1 Основні фізичні процеси при електроіскровій обробці	37
3.2 Дослідження модифікованих сталєних поверхонь після ЕІЛ	40
3.3 Висновок	43
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	45
4.1 Економічна ефективність наукових досліджень.....	45
4.2 Оцінка ефективності прикладних досліджень	46
4.3 Висновок	50
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	51
5.1 Безпека праці людей в цехах і на дільницях термічної обробки.....	51
5.2 Засоби індивідуального захисту робітників.....	54
5.3 Освітлення в термічних цехах	55

	7
5.4 Контрольновимірювальні прилади термічних цехів	56
5.5 Висновок	60
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ТО – термічна обробка

σ_b – границя міцності

δ – відносне подовження при розтягуванні

Ψ – відносне звуження

KCU – ударна в'язкість

HRV – твердість по Віккерсу

ВСТУП

Актуальність роботи. Надійність і довговічність більшості виробів сучасної техніки значною мірою залежить від працездатності і ресурсу великої кількості вузлів тертя (трибосистем) різних систем і механізмів машини і її вузлів. У більшості випадків процес руйнування механічних частин починається з поверхні. Поверхні деталей схильні до зношування, корозії, втоми та інших видів руйнування. Надійність трибосистем в першу чергу визначається зносостійкістю рухомих частин. Зносостійкість визначається фізико-механічними властивостями матеріалів цих деталей і якістю обробки поверхні. Як і для всіх конструкційних матеріалів, властивості матеріалу трибосистем залежать від хімічного складу та структури матеріалу. Що стосується деталей вузла тертя, то для надійності і довговічності трибосистеми важливі структура і властивості поверхневого шару.

Тому підвищення зносостійкості компонентів трибосистеми є актуальною науково-технологічною проблемою сучасного матеріалознавства. Це завдання є одним із найскладніших у галузі науки та техніки, оскільки вимагає аналізу складних і взаємопов'язаних процесів у зоні тертя, які можна вивчити та пояснити лише на основі основних принципів фізики, хімії та матеріалів.

В останні десятиліття розроблені різні методи підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя. Технології отримання зносостійких і зміцнених покриттів шляхом високоенергетичної обробки набувають першочергового значення. Кожен відомий на даний момент спосіб має свої переваги і недоліки, які обмежують сферу його застосування. Тому розробка ефективних, відносно простих в освоєнні та економічних методів підвищення зносостійкості промислового виробництва залишається актуальною науковою та практичною проблемою.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування зносостійких покриттів на сталевій підкладці методом електроіскрового легування, що забезпечують підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя.

Методи дослідження: експериментальні дослідження мікроструктури методами оптичної й електронної мікроскопії, визначення мікротвердості та отримання її розподілу в модифікованих поверхнях.

Практичне значення одержаних результатів. На основі дослідження структуроутворення зносостійких покриттів системи Al-C-B запропоновані режими електроіскрового легування сталевих поверхонь відповідальних деталей машин.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Зміцнення поверхонь деталей машин та технологічного обладнання широко використовується у різних галузях машинобудування. У промисловості залежно від умов експлуатації виробів застосовуються добре відпрацьовані та відносно нові методи поверхневого зміцнення сталей та сплавів, у тому числі поверхневе пластичне деформування, хіміко-термічна обробка, мікродугове оксидування, газополум'яне та іонно-плазмове напилення та ін. Нижче розглядається фізична основа та проводиться порівняльний аналіз названих та інших методів, що забезпечують зміцнення поверхневих шарів деталей машин та підвищення їх триботехнічних властивостей.

1.1 Поверхневе пластичне деформування

Поверхневе пластичне деформування (ППД) як метод зміцнювальної обробки деталей представляє собою сукупність технологічних процесів, застосування яких дозволяє знизити шорсткість поверхні, зміцнити поверхневий шар за рахунок наклепу, нанести спеціальний рельєф та підвищити зносостійкість деталі [1].

Фізичні закономірності деформації поверхневих шарів дуже складні та відмінні від кінематики макродеформацій в об'ємних шарах. У цілому процес ППД полягає у переміщенні частинок тіла, що підлягає деформації. В результаті переміщення частинок у поверхневому шарі відбуваються складні фізико-механічні процеси, що призводять до суттєвих змін структури та властивостей поверхневого шару [2]. Завдяки цьому ППД забезпечує підвищення зносостійкості, опору втоми, контактної витривалості та інших експлуатаційних властивостей оброблюваних деталей на 20-50% [3].

Для традиційних методів зміцнення ППД, таких як накочування, розкочування, і навіть вигладжування, характерні значні деформувальні навантаження, що обмежує їх застосування при обробці нежорстких і

тонкостінних деталей через виникаючі геометричні похибки. Тому введення в зону обробки ультразвукових коливань сприяє зниженню опору пластичному деформуванню і сил тертя на контактних поверхнях, що в кінцевому підсумку призводить до значного зниження статичних навантажень деформування. Вказані особливості процесу зумовили виникнення нового напрямку ППД – оздоблювально-зміцнювальної обробки інструментом, що коливається з ультразвуковою частотою.

Ультразвукова зміцнювальна обробка (УЗО) здійснюється шляхом механічного наклепу поверхні виробів твердим інструментом, що переміщується з ультразвуковою частотою ($f = 18-44$ кГц). За рахунок ущільнення при пластичному деформуванні поверхні твердість поверхневого шару значно зростає при одночасному зменшенні шорсткості поверхні. Основним фактором, що визначає протікання процесу, є імпульсний вплив інструменту на поверхню деталі, що зміцнюється.

Цей метод застосовують для формоутворення зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей із тугоплавких металів, твердих сплавів та твердих крихких матеріалів (кераміка, скло, кварц та ін.) [4]. Точність УЗО може досягати 7-6-го кваліфікацій, шорсткість поверхні – Ra 0,1-0,4 мкм. В результаті УЗО зростає твердість, зносостійкість та довговічність оброблених деталей.

Механічні методи поверхневого зміцнення дозволяють створити сприятливий для фрикційної взаємодії поверхневий рельєф та знизити висоту мікронерівностей оброблених поверхонь. Процес поверхневого пластичного деформування створює у поверхневому шарі значний рівень деформацій та залишкових напружень стискання. Однак ППД вичерпує запас пластичності та здатності поверхневого шару до подальшого накопиченню деформацій, що виникають при терті, що сприяє прискоренню втомного руйнування (зношування) поверхневого шару.

1.2 Хіміко-термічна обробка

Хіміко-термічна обробка (ХТО) широко застосовується у промисловості для підвищення твердості, зносостійкості, опору втомі та контактній витривалості, а також для захисту від електрохімічної та газової корозії.

Фізичною основою методу є дифузійне насичення сталі різними хімічними елементами або їх сполуками з наступним гартуванням та відпуском. ХТО проводиться у твердих, рідких та газових середовищах. За цільовим призначенням вона ділиться на дві основні групи: підвищення зносостійкості деталей (цементация, азотування, борування тощо); для поліпшення антифрикційних протизадирних властивостей металів (сульфідування, сульфоціанування, селенування і т.д.).

Широке поширення в промисловості набув процес цементации низьковуглецевих сталей. Концентрація вуглецю в поверхневому шарі завтовшки 0,15-2,0 мм після цементации становить 0,8-1,0%. Твердість поверхні після цементации, гартування та низького відпуску знаходиться в межах HRC 52-60. В результаті спільної дії температурних і структурних напружень після гартування в цементованому шарі виникають напруження стиснення, а в серцевині – напруження розтягування. Залишкові напруження викликають деформацію виробів, знижують міцність деталі за умов експлуатації. Для підвищення геометричної точності деталей і точності взаємного розташування сполучених поверхонь проводиться наступна механічна обробка цементованих деталей.

У роботі [5] було досліджено структуру та властивості нітроцементованих шарів з високим вмістом азоту (до 0,90%). Нітроцементации піддавали зразки з конструкційних сталей 25ХГТ і 20ХН3А в атмосфері, що складається з ендогазу, аміаку і природного газу з метою підвищення комплексу механічних властивостей сталі. Дослідження хімічного складу нітроцементованих шарів показало, що вміст вуглецю та азоту в дифузійних шарах змінюється у широких межах з варіюванням витрат природного газу та аміаку. Різноманітний і розподіл вуглецю та азоту за товщиною дифузійного

шару. Дослідження структури шарів, сформованих в експериментальних режимах, виявило наявність чотирьох зон, що відрізняє її від структури шарів, отриманої при класичній нітроцементації (поверхнева зона, основна зона та перехідний шар). Основна відмінність спостерігається в зоні, розташованій між основною зоною та перехідною частиною шару. У структурі цієї зони виявлено дрібнозернистий мартенсит без ознак залишкового аустеніту та трооститу.

Спільний аналіз фізико-хімічних і фізико-механічних характеристик нітроцементованих шарів показав, що найбільшу мікротвердість та мікропластичність мають дифузійні шари з високим вмістом азоту у твердому розчині.

У роботі [6] проведено пошарове дослідження тонкої структури сталі 20Х3МВФ-Ш, що піддавалася нітроцементації з подальшою термічною обробкою. Показано, що в залежності від виду термічної обробки змінюється фазовий склад і густина дислокацій по глибині нітроцементованого шару. У мікроструктурі мартенситу загартованого нітроцементованого шару спостерігається висока щільність дислокацій, у той час як щільність дислокацій в мартенситі серцевини і прилеглий до неї зони шару істотно нижче. Залишковий аустеніт характеризується значно меншим ступенем деформаційного зміцнення, ніж мартенсит, що виявляється у суттєво меншій величині щільності дислокацій та мікронапружень. Обробка холодом призводить до додаткового перетворення значних обсягів залишкового аустеніту на мартенсит, що викликає зростання щільності дислокацій у мартенситі.

В роботах [7, 8] досліджувалися процеси азотування як у «чистому» вигляді, так і в різних комбінаціях з іншими технологічними прийомами, такими як оксидування в газовий середовищі (оксиазотування або нітрооксидування). Викладено результати досліджень з оптимізації будови та фазового складу оксиазотованого шару, що забезпечує високу зносостійкість та корозійну стійкість виробів із конструкційних сталей (штоки гідроциліндрів,

шпинделі, клапани та ін.). На основі термодинамічного аналізу показано можливості оптимізації структури шару та інтенсифікації процесів.

Комбінування традиційної термічної і хіміко-термічної обробки з індукційним, електроконтактним та лазерним нагріванням підвищує експлуатаційні властивості деталей. При швидкісному гартуванні усуваються окислення та знеуглецювання поверхні деталей, зменшуються термічні деформації, що дозволяє зміцнювати остаточно оброблені деталі без подальшого шліфування.

У роботі [9] зразки зі сталі 40X нагрівали пропусканням струму зі швидкістю 50 К/с до температури 1020-1270 К і гартували у воді. Потім загартовані зразки піддавали іонно-променевому азотуванню (670, 720, 770 К). Результати досліджень показали, що зі збільшенням температури нагріву підвищується твердість зразків від 21 HRC у вихідному стані до 55-57 HRC. При температурах азотування 670-720 К знижується інтенсивність зношування сталі до 2 разів, порівняно з вихідним матеріалом. Однак, іонна обробка при температурі 770 К погіршує зносостійкість поверхні, що обумовлено виділенням частинок $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ із низькою термічною стабільністю. При терті модифікованої сталі 40X в місцях теплових спалахів відбувається дисоціація частинок $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$, що викликає розміщення поверхневого шару, локалізацію в ньому деформацій та зниження зносостійкості.

У роботі [10] розглянуто технологію низькотемпературного азотування легованих сталей з різним вмістом хрому через наноксидний бар'єр, що полягає у послідовній обробці виробів у розділених атмосферах аміаку та повітря. Встановлено, що залежно від тривалості насичення, на поверхні виробів формується модифіковане двошарове покриття з оксидної плівки нанорозмірної товщини, під якою розташовується зона внутрішнього азотування, або тришарове – з додатковою поверхневою зоною напорошка нітридів заліза, причому кожен з цих шарів має особливі функціональні властивості.

Таким чином, методи ХТО дозволяють суттєво підвищити фізико-механічні характеристики оброблюваних матеріалів. Однак більшість цих методів потребують значних витрат часу для дифузійного насичення поверхневих шарів деталей. Для отримання модифікованого шару глибиною близько 2 мм потрібно кілька десятків годин. Для остаточного формування необхідних властивостей проводиться термічна обробка (ТО) у вигляді гартування та подальшого відпуску. У процесі ТО на поверхні утворюються дефекти у вигляді окалини, а значні внутрішні напруження, що призводять до жолоблення поверхонь і зародження тріщин [4]. Крім того, після ХТО потрібно проведення оздоблювальних операцій з метою усунення дефектів, що виникли. Через високу твердість поверхневих шарів доводиться застосовувати абразивну обробку, в результаті якої в тонкому поверхневому шарі формуються несприятливі схеми внутрішніх залишкових напружень розтягування, що сприяють зародженню мікротріщин у процесі фрикційної взаємодії та зниження зносостійкості матеріалу.

1.3 Високоенергетичні методи зміцнення

Перспективним напрямом структурної модифікації поверхневих шарів деталей машин є обробка високоенергетичними концентрованими потоками енергії та речовини (КПЕ): лазерні технології, електроіскрове легування, електронно-променева обробка, іонно-променева обробка, іонна імплантація, вакуумно-плазмова, імпульсно-плазмова обробка та ін.

Серед високоенергетичних процесів обробки металевих поверхонь особливе місце займає лазерна технологія, завдяки якій досягається значне підвищення міцності та зносостійкості деталей [11-13]. Лазерна обробка дозволяє спеціально змінювати структурно-фазовий стан і елементний склад поверхневого шару шляхом подальшої імпульсної термічної обробки, що може надійно покращити експлуатаційні властивості матеріалу. Лазерно зміцнені поверхні не потребують подальшої механічної обробки, але зносостійкість деталей трибосистеми підвищується в п'ять разів [14].

Впровадження методів лазерного зміцнення обумовлюється наявністю серійного високопродуктивного лазерного обладнання як імпульсної, так і безперервної дії, високою технологічністю процесу, значною номенклатурою оброблюваних деталей, що вимагають локального зміцнення, можливістю отримання заданого комплексу фізико-механічних властивостей [13].

Лазерна модифікація передбачає розплавлення частини металевої поверхні разом з легуючими елементами, які попередньо були нанесені на оброблену ділянку. Це дає можливість отримувати локально модифіковані сплави з заданими експлуатаційними властивостями. Результати експериментальних досліджень структури і властивостей поверхневого шару після лазерної обробки різними легуючими елементами показали, що мікротвердість опромінених оброблених деталей можна підвищити шляхом раціонального вибору способу нанесення і хімічного складу покриття.

У [15] досліджено вплив лазерного гартування на коефіцієнт тертя ковзання та зносостійкість сталевих зразків. Після гартування та високотемпературного відпуски зразки сталі 40Х зміцнювали потужністю випромінювання 1,2–1,5 кВт. На зразках формували сліди зміцнення і зміцнювали поверхню тертя на 25, 40, 50, 60, 80 і 100 %. Результати випробувань показали, що співвідношення поверхні тертя, зміцненої лазерним світлом, до поверхні тертя, не зміцненої лазерним світлом, мало значний вплив на зносостійкість зразка. Зміцнення поверхні тертя сталевих зразків на 50 % підвищує зносостійкість у середньому в 2,5 рази, а на 100 % - у 3,7 рази порівняно з неармованим зразком.

Результати досліджень структури та мікротвердості чавуну марок СЧ25 та ВЧ40 після гартування твердотілими лазерами наведено в роботі [16]. Мікротвердість у зоні лазерного гартування з твердого стану для аустенітно-мартенситної структури складала 600-720 НV і 600-750 НV відповідно. Загальна глибина зміцненого шару становить 0,15-0,25 мм, що відповідає технічним вимогам (глибина гарту робочих поверхонь не менше 0,13 мм).

У роботі [17] досліджено вплив інертного газу на хімічний склад, структуру та властивості покриттів з диселеніду молібдену (MoSe_2), отриманих методом імпульсного лазерного осадження за різних тисків аргону. Підбираючи оптимальний тиск газу під час формування плівки, можна зменшити коефіцієнт тертя приблизно вдвічі, ніж у покриттів, отриманих методом вакуумного формування плівки. Показано, що змінюючи інтенсивність лазерного впливу на сталеву основу, можна отримати тонкий шар алмазоподібного вуглецевого покриття для трибологічних цілей, який надійно знижує коефіцієнт тертя та підвищує зносостійкість поверхні.

Широке застосування лазерної технології обмежене негативним впливом великого внутрішнього падіння напруги на межі розділу між зоною впливу лазера та матрицею на робочі характеристики компонента [18]. Різниця напруг може бути зменшена шляхом подальшого нагрівання, що знижує твердість отриманого покриття і знижує ефективність лазерної обробки. Тому слід використовувати комбінацію методів поверхневого зміцнення з використанням лазерного нагріву деталі.

Одним із відносно нових методів покращення експлуатаційних характеристик компонентів є електронно-променева обробка (ЕПО). Коли частина потоку електронного променя діє на поверхню, частина енергії відбивається поверхнею, а частина поглинається тонким поверхневим шаром матеріалу, що призводить до нагрівання, подальшого плавлення та випаровування залежно від температурних умов. Покращення триботехнічних властивостей деталей забезпечується оптимальним підбором параметрів електронно-променевої обробки. Згідно з дослідженнями застосування подвійного електронно-променевого зміцнення з наступними параметрами обробки: струм електронного пучка $I = 16$ мА, швидкість руху зразка відносно пучка електронів $V = 70$ мм/с, відстань від вихідного вікна до зразка $H = 130$ мм, енергія пучка $E = 1,4$ МеВ, що дозволяє значно зміцнити поверхневий шар вуглецевої сталі У8 і 45 [19].

У роботі [20] досліджено структуру та триботехнічні властивості покриттів на основі Cu-Ni-WC, сформовані методом електронно-променевої наплавки (ЕПН) на сталевих та мідних поверхнях. Введення до складу мідного сплаву карбиду вольфраму істотно підвищує його здатність навантаження, що дозволяє застосовувати його в важко навантажених вузлах тертя. Метод ЕПН дозволяє формувати безпористі покриття з рівномірним розподілом твердої фази по всьому об'єму наплавленого шару. При цьому середній розмір карбідних зерен залишається незмінним. Товщина покриття залежить від кількості проходів електронного пучка. Збільшення кількості твердої фази зменшує знос, збільшує здатність навантаження і час приробітку.

Авторами [21] були отримані покриття з високим вмістом карбиду хрому на низьковуглецевій сталі методом ЕПН. При вмісті хрому 12-14% сформовані покриття мають підвищену корозійну стійкість, яка підвищується при збільшенні питомої поверхневої енергії W . При $W = 8,5-9,5$ кДж/см² корозійна стійкість досягає максимальних значень, які можна порівняти з рівнем корозійної стійкості високолегованої сталі 12X18H10T.

Іонно-променева обробка – іонна імплантація (II) відноситься до ефективної модифікації поверхневих шарів при опроміненні імпульсним, інтенсивним іонним пучком, що може значно покращити зносостійкість і корозійну стійкість деталей [22-24]. II заснована на введенні в тверде тіло прискорених в електростатичному полі іонів, що змінює структурну фазу і елементний склад поверхневого шару. Як первинні частинки можна використовувати позитивні та негативні іони та нейтральні атоми. Коли прискорені іони вводять у металеву матрицю, вони втрачають енергію через пружні зіткнення з атомами матриці та непружні взаємодії з електронами. Іонна імплантація може вводити елементи в кількостях, що перевищують їх максимальну розчинність. Незважаючи на те, що введені частинки проникають лише на невелику глибину, товщина шару зі зміненими властивостями збільшує глибину проникнення на два-три порядки за рахунок розвитку дифузійних процесів через збільшення кількості дефектів структури.

Пі передбачає розпилення опроміненого матеріалу, що призводить до зменшення шорсткості обробленої поверхні. Під час обробки температура деталі змінюється мало. Оскільки термічних дефектів немає, його можна використовувати і для фінішної обробки.

У [25] провені дослідження структурного стану та зміни технології тертя та корозійних властивостей поверхневого шару високолегованої сталі, обробленої концентрованим потоком іонів азоту. Зносостійкість поверхневого шару, насиченого іонами азоту, підвищилась у 2,1 рази порівняно з вихідним станом. Мікротвердість модифікованої азотом поверхні зростає до 12300 МПа. Максимальна стійкість до корозійного розчинення в нейтральних сольових розчинах (10% NaCl) досягається при підборі в нітридному шарі спеціальних нітридів, які зв'язують атоми ванадію і вольфраму в нітридах VN і W₂N. При цьому швидкість корозії сталі знижується на 20%.

Вакуумно-плазмова обробка дозволяє застосовувати композитні та багатошарові процеси модифікації. Нанесення різних складів на конструкційні матеріали та інструмент. У роботі [26] досліджено вплив технологічного режиму вакуумно-плазмового нанесення покриттів TiN і TiC на швидкорізальні сталі P6M5, P9 і тверді сплави T15K6, BK6, BK8. Встановлено, що стійкість ріжучих інструментів з вакуумно-плазмовим покриттям підвищується в 1,5-3,5 рази.

Автори [27] досліджували вплив термоелектричної обробки (ТЕО) на коефіцієнт поверхневого зміцнення легуваних сталей залежно від вмісту вуглецю та часу обробки, а також досліджували розподіл легуючих елементів у поверхневому шарі. Встановлено підвищення зносостійкості зразків після ТЕО в 1,6–1,8 рази. Пошарово аналізували розподіл легуючих елементів у поверхневому шарі зміцненого зразка. Встановлено, що концентрації хрому, нікелю, молібдену, алюмінію, кремнію і ванадію в поверхневому шарі збільшувалися в 1,4-11,4 рази порівняно з об'ємом. Найбільше збагачення спостерігалось алюмінієм (у 3,2–11,4 рази) і хромом (у 1,5–4,0 рази). Металографічні дослідження показали, що розсіювання структурних

компонентів збільшується на різних площах поверхні сталі після електричного впливу при високих температурах.

Аналіз результатів досліджень структури, технології тертя та фізико-механічних властивостей конструкційної сталі 40X після імпульсної плазмової обробки (ІПО) наведено в [28]. Покриття, сформовані на сталі 40X за допомогою процесу ІРО, мають вищу щільність дислокацій, що призводить до вищої твердості. Процес ІРО дає аустеніт з дрібнозернистою структурою, і його частка збільшується зі збільшенням робочої міцності. Після охолодження в сталі утворюється високодисперсний мартенсит, що покращує її механічні властивості. Експериментальні дослідження на зразках сталі 40X показали, що ІПО в кілька разів підвищує зносостійкість поверхонь тертя при змашуванні маслом і емульсією І-45 (3% водний розчин). Встановлено, що зносостійкість поверхонь, оброблених імпульсною плазмою, зростає в 5-6 разів із збільшенням контактного тиску та швидкості ковзання.

Електроерозійний синтез (ЕЕС) є одним із перспективних методів отримання зносостійких карбідних покриттів. ЕЕС заснована на взаємодії спеціальних екзотермічних сумішей з неблагородними металами під дією електричного розряду з утворенням сплавів. Дослідження, які проводяться в галузі технології ЕЕС, спрямовані на вивчення особливостей процесу формування покриття під впливом імпульсів струму різної потужності, якості покриття внаслідок зміни технічних параметрів процесу та зносостійкості. Визначення оптимального типу покриття за умов зношування. Результати досліджень [29, 30] демонструють перспективність ЕЕС-покриттів та можливості їх використання для зміцнення та ремонту механічних вузлів. Запропоновано та досліджено процес електророзрядного зміцнення деталей у середовищі рідкого азоту, що дає змогу покращити експлуатаційні властивості поверхневого шару без нанесення армування на оброблену поверхню.

У [31] досліджувався процес обробки металів імпульсними електричними розрядами, у якому поверхневі шари металу можуть хімічно взаємодіяти з оточуючим середовищем. Авторами встановлено, що при електроіскровій

обробці (ЕІО) пар латунь (Л-59)-сталь (Ст3) та мідь-сталь (Ст3) у середовищі гасу зі збільшенням енергії в імпульсі відбувається інтенсивне розкладання середовища, яке супроводжується збільшенням виходу газоподібних продуктів: H_2 , CH_4 , C_2H_6 та ін. На основі даних про кількість та склад газоподібних продуктів були розраховані теплові ефекти сумарних реакцій розкладання та встановлено, що частка енергії, що витрачається на хімічні реакції становить 4,24-13,15%.

Найчастіше електроерозійна обробка поверхонь проводиться на повітрі, основними хімічно активними компонентами якого є кисень та пари води. Дослідження продуктів ерозії при розрядах між залізними електродами (армо-залізо) у воді показали наявність у них оксидів та гідроксидів. За інших рівних умов загальна кількість оксидів у продуктах ерозії становила для електродів з армо-заліза приблизно 50-60%, цинку – 50%, міді – 40%, алюмінію – 10%, олова – 10%.

Одним з перспективних методів поверхневого зміцнення деталей КПЕ є електровибухове легування (ЕВЛ). Суть методу ЕВЛ полягає у формуванні структур і зміні властивостей металів і сплавів при імпульсному впливі на поверхню багатофазного плазмового струменя, утвореного з продуктів електричного вибуху провідника. У роботах [32, 33] досліджено вплив ЕВЛ обробки металів і сплавів електричним вибухом різних матеріалів. Встановлено, що електроструминна обробка ВК10КС вуглеграфітовими волокнами та алюмінієвою фольгою дозволяє збільшити твердість поверхневого шару твердого сплаву [32]. ЕВЛ з використанням титану у високоенергетичному режимі з густиною поглиненої потужності $6,0 \text{ ГВт/м}^2$ призводить до утворення двошарової зони легування [33]. Поверхневий шар багатий композитними карбідами $(Ti, W)C$, а середній шар багатий напівкарбідами W_2C . Утворенням карбіду титану в поверхневому шарі цементованого карбіду ВК10КС пояснюється підвищення поверхневої мікротвердості до 25000 МПа. Коефіцієнт тертя після армування ЕВЛ знижується на 30%.

Широке застосування методів високоенергетичної структурної модифікації обмежене складністю та високою вартістю обладнання, а їх серійне виробництво ще не освоєно. Процеси обробки повинні проводитися в більшості випадків під високим вакуумом (10^{-3} до 10^{-5} Па), що вимагає використання складних дифузійних або турбомолекулярних насосів з відповідними допоміжними вакуумними насосами або іонно-геттерними насосами. Недоліками високоенергетичних методів є низька продуктивність процесу, мала глибина зміцнення, неоднорідність фізико-механічних властивостей модифікованої поверхні.

1.4 Висновок

1. Розглянуті відомі методи поверхневого зміцнення деталей з метою підвищення механічних та триботехнічних властивостей, у тому числі щодо нових методів, не задовольняють повною мірою сучасним вимогам до ефективності, універсальності і економічності технологічних процесів.

2. Підвищення вимог до поверхневої міцності та зносостійкості деталей вузлів тертя машин призводить до необхідності вдосконалення відомих та розробки нових високоефективних технологічних методів поверхневого зміцнення конструкційних матеріалів.

3. Великі потенційні можливості мають методи поверхневого модифікування деталей машин, включаючи деталі трибосистем, із застосуванням висококонцентрованих потоків енергії.

4. Одним з найбільш перспективних можна, можливо рахувати метод електроіскрової обробки, при якому формуються та використовуються потоки частинок високої щільності енергії при імпульсному впливі на оброблювану деталь, що дозволяє створювати поверхневі структури з підвищеними механічними та триботехнічними властивостями при значній простоті технологічного обладнання та економічності процесу.

1.5 Мета та завдання дослідження

Результати попередніх досліджень і проведений аналіз стану проблеми підвищення надійності та довговічності деталей вузлів тертя машин дозволяє сформулювати мету та завдання дослідження.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування зносостійких покриттів на сталевій підкладці методом електроіскрового легування, що забезпечують підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести аналіз відомих методів поверхневого зміцнення конструкційних сталей та сплавів, що забезпечують модифікацію їх структури, підвищення механічних та триботехнічних властивостей, та визначити напрямок досліджень у роботі.

2. Провести експериментальне дослідження впливу матеріалів вихідних матеріалів та режимів електроіскрового легування на структуру та хімічний склад покриттів..

3. Дослідити залежності мікротвердості покриттів від енергетичних режимів електроіскрового легування.

4. На основі експериментальних досліджень розробити практичні рекомендації щодо призначення оптимальних технологічних режимів електроіскрового легування, що забезпечують максимально високу зносостійкість пар тертя.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір матеріалу дослідження

У якості об'єкта експериментальних досліджень прийнята конструкційна легована високоякісна сталь 15ХГН2ТА [34], яка широко застосовується для виготовлення шестерень, осей, втулок, синхронізаторів, муфт, валів коробок передач автомобілів та інших видів техніки. Для підвищення механічних властивостей сталі 15ХГН2ТА використовують хіміко-термічну обробку з наступною термічною обробкою, що значно ускладнює та збільшує тривалість технологічного процесу виготовлення деталей.

Зразки для проведення досліджень виготовляли зі сталі 15ХГН2ТА у нормалізованому стані (механічні властивості [40]: межа плинності $\sigma_T = 75 \times 10^3$ МПа; тимчасовий опір $\sigma_b = 95 \times 10^3$ МПа; відносне подовження $\delta_5 = 11\%$; відносне звуження $\psi = 55\%$; ударна в'язкість КСУ $\alpha_H = 10 \times 10^5$ Дж/м²). Хімічний склад сталі наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Хімічний склад (%)сталі 15ХГН2ТА [40]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu
0.13 - 0.18	0.17 - 0.37	0.7 - 1	1.4 - 1.8	до 0.025	до 0.025	0.7 - 1	0.03 - 0.09	до 0.3

У конструкційних сталях, типу 15ХГН2ТА, ферит є основною структурною складовою. Саме він визначає властивості сталі. Легуючі елементи, розчиняючись у фериті, зміцнюють його. Найбільш сильно підвищують твердість повільно охолодженого фериту кремній, марганець, нікель, тобто елементи, що мають відмінну від α -Fe кристалічну решітку. Слабкіше впливають молібден, хром, вольфрам, ізоморфні α -Fe. Чим більша різниця в атомних розмірах заліза та легуючого елемента, тим більше викривлення кристалічної решітки, і тим вище твердість, міцність, але нижче

пластичність та особливо в'язкість фериту (рис. 2.1). Всі легувальні елементи, які найбільш часто використовуються для легування сталі, підвищують твердість фериту [35]. Найважливішим є те, що хром та особливо нікель майже не зменшують, а нікель підвищує, в'язкості сталі. Нікель найбільш сильно знижує поріг холодноламкості. Крім того, нікель, хром, марганець та деякі інші елементи, які добре розчинюються в аустеніті, підвищують його стійкість при охолодженні, тим самим збільшуючи прогартованість сталі. Найбільш ефективно в цьому напрямку діють нікель і хром, вони збільшують прогартованість сталі, як окремо, так і при одночасному введенні в сталь, при так названому комплексному легуванні.

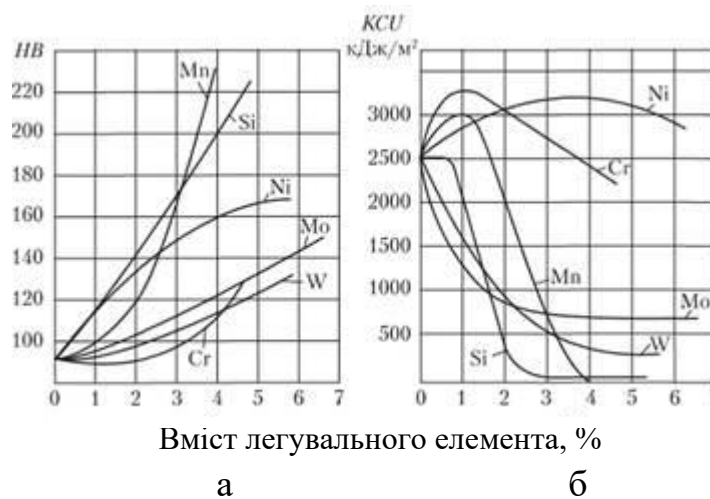


Рисунок 2.1 – Вплив легуючих елементів на властивості повільно охолодженого (нормалізованого) фериту [35]

Найважливішими легуючими елементами в конструкційних сталях є нікель та хром, вони забезпечують можливість досягнення високої міцності, пластичності, в'язкості, прогартованості. При комплексному легуванні (Cr+Mo, Cr+Ni, Cr+Ni+Mo тощо) високі механічні властивості можна отримати практично в будь-якому перетині, тому комплексне легування сталі використовують для великих деталей складної форми. Для забезпечення високої конструктивної міцності кількість легуючих елементів в сталі повинна бути раціональною.

Для виготовлення деталей, які працюють під дією динамічних навантажень в умовах поверхневого зносу, використовують низьковуглецеві сталі, які містять не більше 0,2% С. Такі сталі піддають цементації з наступним гартуванням і низьким відпуском. Твердість поверхні готової деталі повинна складати біля 20-40 НРС. На відміну від вуглецевих сталей, що мають низьку прогартованість, при цементації та термічній обробці легованих сталей відбувається додаткове зміцнення серцевини. Це зміцнення тим більше, чим більш легована сталь.

В сталі 15ХГН2ГА частина нікелю замінена на марганець. Такі сталі використовують для виготовлення деталей, які зазнають значного ударного навантаження, мають великий перетин чи складну конфігурацію, або працюють в умовах дії великих знакоперемінних навантажень. Крім того, в сталь вводять невелику кількість титану для подрібнення зерна.

2.2 Устаткування та методика електроіскрової обробки

Електроіскрова обробка здійснювалася на установці електроіскрового легування моделі Елітрон-52А (рис. 2.2). Ця установка відноситься до універсальних з ручним керуванням. Вона комплектується генератором імпульсів електричного струму, віброзбудником та пристроями для закріплення оброблюваних деталей (зразків).

Режими роботи установки подані в таблиці 2.2. Енергія розряду (W_p), згідно з даними таблиць, обчислюється за формулою:

$$W_p = k \cdot \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (2.1)$$

де k – коефіцієнт, що враховує втрати в колі ($k = 0,6-0,7$);

C – ємність накопичувального конденсатора, Ф;

U – напруга холостого ходу, В.



Рисунок 2.2 – Установка Елітрон-52А для проведення ЕІЛ

Таблиця 2.2

Режими роботи установки моделі «Елітрон-52А»

Тип генератору	Номер режиму	Ємність, С, мкФ	Напруження, U, В	Енергія розряду, W_p , Дж
Транзисторно-теристорний (ТТ)	1	120	35	0,05
	2		75	0,20
	3		100	0,36
	4	300	35	0,11
	5		75	0,60
	6		100	0,90
	7	1560	35	0,60
	8		75	2,6
	9		100	4,60
RC	10	480	80	0,90
	11		95	1,30
	12		110	1,70
Суміщення ТТ+RC	13	120+480	80+100	1,3
	14	300+480	95+100	2,2
	15	1560+480	110+100	6,8

На рисунку 2.3 представлений ескіз зразків для ЕІЛ.

Методика підготовки та обробки зразків на установці включає наступні операції:

1. Знежирення оброблюваної поверхні деталі (зразка) бензином або рідиною, що містить спирт.

2. Встановлення оброблюваної деталі (зразка)
3. Закріплення легуючого електрода (ЛЕ) у тримач вібробудника.
4. Включення генератора імпульсів та перевірка працездатності вібробудника за допомогою короткочасного торкання оброблюваної деталі (зразка).
5. Вибір та завдання необхідної частоти імпульсів вібробудника.
6. Вибір та подача напруги в імпульсі та ємності конденсаторної батареї на генераторі імпульсів.
7. Електроіскрове оброблення поверхні на заданих режимах.

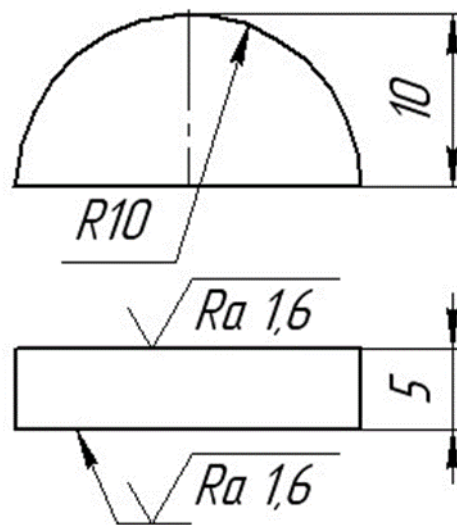


Рисунок 2.3 – Зразок для дослідження структури та властивостей модифікованих поверхонь після електроіскрової обробки

Для дослідження використовували зразки, на які наносили пасту (вазелін, алюмінієва пудра марки ПАД-0 (ГОСТ 5494-95) 56% за масою, порошок аморфного бору близько 5% за масою). Не чекаючи висихання пасту, здійснювали ЕІЛ поверхонь зразків графітовим електродом марки ЕГ-4 ОСТ 229-83 з енергією розряду: 0,13, 0,55 і 4,9 Дж.

2.3 Металографічний аналіз

У машинобудуванні широко застосовується металографічний метод дослідження [36]. Для дослідження підготовлюють зразки, їх досліджують при

збільшеннях до 1000 крат і більше. На зразку під мікроскопом досліджують структуру, оцінюють величину зерна, розташування включень, їх морфологію тощо.

Як відомо [36], завданням металографічного аналізу є встановлення закономірностей формування структури й фазового складу металевих матеріалів, а також оцінка їх впливу на фізико-механічні характеристики. Використовуючи методи оптичної та електронної мікроскопії проводять такі дослідження. Дуже часто, металографічні дослідження доповнюють рентгеноскопією. Дослідження мікроструктури за допомогою мікроскопів називається мікроаналізом.

Мікроструктура - це будова (форма і розмір зерна, включень, меж зерен тощо) металів і сплавів під мікроскопом. Для мікроаналізу підготавлюють зразки. Їх вирізають з досліджуваного матеріалу, потім зразки ретельно шліфують і полірують на шліфувально-полірувальному верстаті. Після такої підготовки він відбиває промені як дзеркало. На шліфі після полірування видно тріщинки, пори, неметалеві включення. Щоб виявити межі зерен і окремі структурні складові, шліф піддають твавленню – дії спеціальних хімічних реактивів. Для травлення мікроструктури сталі часто застосовують 3-5%-ий розчин азотної кислоти в спирті.

Сучасні мікроскопи оснащені компьтеризованим комплексом із спеціальним програмним забезпеченням. Воно дозволяє оперативно визначити: фазовий склад, бал смугастості, величину балу орієнтації відманштеттової структури, бал зерна, кількість неметалевих включень, а також графіт в чавунах відповідно до вітчизняних і міжнародних стандартів [37].

В результаті металографічного аналізу можна визначити:

1. Величину і форму зерен.
2. Наявність фаз, структурних складових, дисперсних частинок; їх кількість, величину, взаємне розташування, будову тощо.

Фаза – це однорідна за складом, будовою частина структури, яка відокремлена від сусідньої межею розділу, під час переходу через яку можуть змінюватися властивості стрибкоподібно.

Структурна складова - більш загальне поняття, характерне для окремих сплавів, може включати одну і кілька фаз, також є відокремленою частиною структури.

Дисперсні частинки - дрібні частки, розподілені в структурі. Це можуть бути оксиди, карбіди, бориди, інтерметаліди тощо. Формуються у структурі в процесі додаткової обробки матеріалів з метою зміни властивостей.

3. Спосіб виготовлення деталі.
4. Визначити характер руйнування матеріалу.
5. Дефекти структури (поверхневі, об'ємні тощо).
6. Наявність та характер тріщини під час руйнування матеріалу під впливом зовнішніх факторів.
7. Перетворення, що відбуваються в металах у процесі обробки (пластичної деформації, термічної обробки, хіміко-термічної обробки тощо).
8. Визначити вид, напрям руху, щільність дислокацій (на електронних мікроскопах).

Зображення мікроструктури отримують використовуючи шліфовану поверхню зразка. Попередньо такий зразок оброблюється абразивними матеріалами для зняття поверхневого шару й отримання шліфувального перерізу. Наступним кроком зразки полірують механічним або електролітичним шляхом. Оптичні дослідження проводяться далі на таких зразках методами оптичної мікроскопії при збільшенні до близька 1 тис. разів.

Такі дослідження є найважливішими при виборі матеріалів, оскільки саме структура металів та сплавів визначає та обумовлює властивості матеріалів [37].

2.4 Електронно-мікроскопічні дослідження

Електронна мікроскопія, сукупність електронно-зондових методів дослідження мікроструктури твердих тіл, їх локального складу і мікрополів (електричних, магнітних тощо) за допомогою електронних мікроскопів (ЕМ) - приладів, в яких для отримання збільшених зображень використовують електронний пучок [38]. Електронна мікроскопія включає також методики підготовки об'єктів, що вивчаються, обробки і аналізу результуючої інформації. Розрізняють два головні напрями електронної мікроскопії: трансмісійну (що працює на просвітлення) і растрову (скануючу), які основані на використанні відповідних типів ЕМ. Вони дають якісно різну інформацію про об'єкт дослідження і часто застосовуються спільно. Відомі також віддзеркалююча, емісійна, оже-електронна, лоренцова й інші види електронної мікроскопії, що реалізуються, як правило, за допомогою приставок до трансмісійних і растрових ЕМ. Нині розрізняють електронну мікроскопію (ПЕМ), що працює на просвітлення і растрову електронну мікроскопію (РЕМ).

Растровий електронний мікроскоп (РЭМ, англ. Scanning Electron Microscope, SEM) - прилад, заснований на принципі взаємодії електронного пучка з речовиною, призначений для отримання зображення поверхні об'єкту з високим просторовим дозволом (декілька нанометрів), а також про склад, будову і деякі інші властивості приповерхневих шарів. Принцип роботи РЭМ полягає в скануванні поверхні зразка сфокусованим електронним пучком і аналізі відбитих від поверхні часток та рентгенівського випромінювання, що виникає в результаті взаємодії електронів з речовиною. Аналіз часток дозволяє отримувати інформацію про рельєф поверхні, про фазову відмінність і кристалічну структуру приповерхневих шарів. Аналіз рентгенівського випромінювання, що виникає в процесі взаємодії пучка електронів із зразком дає можливість якісно і кількісно охарактеризувати хімічний склад приповерхневих шарів [38].

Електронно-мікроскопічні дослідження зразків були проведені за допомогою скандувального електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B, оснащеного енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник Oxford Instruments plc).

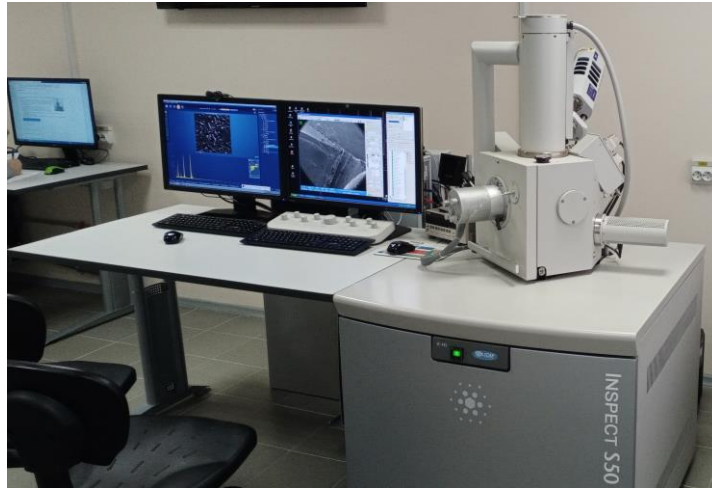


Рисунок 2.4 – Фото скандувального електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B



Рисунок 2.5 – Фото зразків для металографічних досліджень

2.5 Дослідження мікротвердості

Методи визначення твердості (НВ, НС, НРА) характеризують середню твердість сплавів. Для визначення твердості окремих структурних складових сплавів хімічних сполук, евтектичних складових, різних фаз та тонких поверхневих шарів використовують метод визначення мікротвердості або визначення твердості за методом Віккерса. Суть метода полягає у вдавлюванні алмазної піраміди під малими навантаженнями (від 0,05 до 5Н) у наперед зафіксовану під мікроскопом ділянку мікрошліфа з наступним вимірюванням під мікроскопом діагоналей одержаного відбитка [39].

Вимірювання мікротвердості відбувається використовуючи твердомір ПМТ-3.

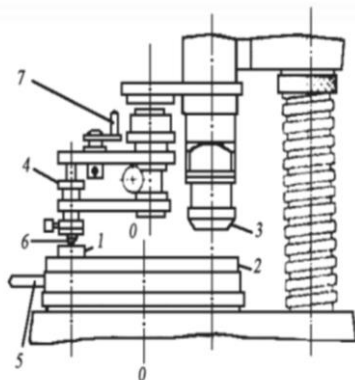


Рисунок 2.4 – Твердомір ПМТ-3: а – схема: 1 – зразок (шліф); 2 – предметний столик; 3 – об’єктив; 4 – вага; 5 – рукоятка предметного столика; 6 – алмазна піраміда; 7 – рукоятка аретира; б – фото

Розглянемо вимірювання твердості за методом Віккерса. Цей метод з одного боку, простіший у використанні, ніж інші випробування на твердість, тому що необхідні розрахунки не залежать від розміру алмазного індентора, а індентор може використовуватися для всіх матеріалів, з іншого боку, складніший, адже потребує виготовлення мікрошліфа як і при металографічному методі дослідження.

Основний принцип метода Віккерса, як і для всіх інших методів визначення твердості, полягає в тому, щоб спостерігати за здатністю матеріалу чинити опір пластичній деформації при вдавлюванні індентора. Метод Віккерса може використовуватися для всіх металів і є одним із найпоширеніших методів визначення твердості, особливо при дослідженні модифікованих шарів, покриттів, аналізу поверхневих властивостей.

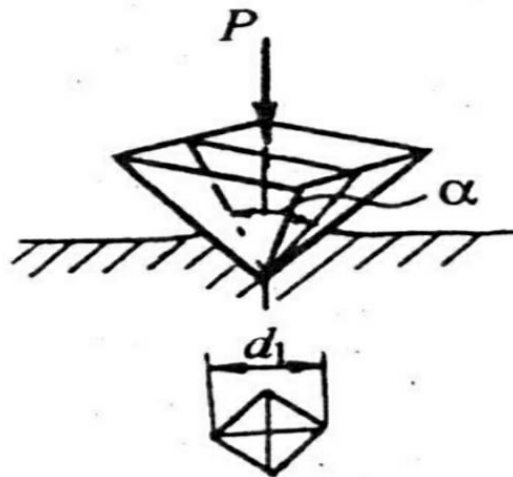


Рисунок 2.5 – Схема вимірювання мікротвердості за методом Віккерса [39]: P - навантаження на піраміду, H ; d_1 - діагональ відбитка; α - кут між протилежними гранями піраміди

При випробуванні на твердість за методом Віккерса в поверхню матеріалу вдавлюється алмазна чотиригранна піраміда. Вона має кут при вершині $= 136^\circ$ (рис. 2.4). Після зняття навантаження вимірюється діагональ відбитка d_1 . Число твердості за Віккерсом HV підраховується за формулою (2.1), як відношення навантаження P до значення діагоналі відбитка (M):

$$HV = \frac{P}{M} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d_1^2} = 1.854 \frac{P}{d_1^2} \quad (2.1)$$

Число твердості за Віккерсом позначається символом HV із зазначенням навантаження P і часу витримки під навантаженням, причому розмірність числа твердості ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) не ставиться. Тривалість витримки індентора під

навантаженням приймають для сталей 10 – 15 с, а для кольорових металів – 30 с.

Вибір значення навантаження залежить від характеру вимірювання. Центр відбитку повинен бути віддалений від краю шліфа або від краю сусіднього відбитка не менше, ніж на дві діагоналі відбитку (при порушенні цих вимог у першому випадку характеристика твердості буде знижена, а в другому – завищена за рахунок наклепу). Для визначення мікротвердості зміцненого шару бажано ваги 1,0 або 2,0 Н.

2.6 Висновок

У розділі була розглянута методика та матеріали для дослідження. У якості об'єкта експериментальних досліджень прийнята конструкційна легована високоякісна сталь 15ХГН2ТА, яка широко застосовується для виготовлення шестерень, осей, втулок, синхронізаторів, муфт, валів коробок передач автомобілів та інших видів техніки. Представлений аналіз впливу легувальних елементів на властивості сталі. Основними легувальними елементами є хром, нікель, титан.

Розглянуті устаткування для електроіскрового легування, режими роботи установки, основні методи дослідження – металографічний аналіз та визначення мікротвердості.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Основні фізичні процеси при електроіскровій обробці

Зміна властивостей сталі можливо двома способами: зміною хімічного складу сталі, або зміною її структури під впливом зовнішнього енергетичного впливу різними методами (механічними, тепловими, енергетичними або їх комбінаціями), включаючи метод електроіскрового легування (ЕІЛ).

Метод ЕІЛ заснований на явищі електричної ерозії при іскровому розряді матеріалу анода та його полярного масопереносу на катод- деталь [40]. При цьому на поверхні оброблюваної деталі формується шар, що складається з матеріалу катода, модифікованого частинками матеріалу анода та міжелектродного середовища. Фазовий склад та структура покриття, сформованого при ЕІЛ, визначаються складом та властивостями матеріалів легуючих електродів та технологічними режимами обробки.

Формування зміцненого поверхневого шару та покриття при ЕІЛ відбувається в результаті складних плазмохімічних, теплофізичних та механотермічних процесів, що відбуваються на локальних ділянках поверхні оброблюваної деталі під впливом енергії іскрового розряду. При зближенні легуючого електрода-анода з поверхнею деталі, що обробляється (рис. 3.1) відбувається іскровий розряд тривалістю 10^{-6} - 10^{-3} с. В результаті, на поверхнях анода і катода виникають локальні осередки плавлення та випаровування матеріалу, що викликають їх електричну ерозію та взаємний масоперенос. У процесі обробки на поверхні деталі формується тонке покриття з певними фізико-механічними властивостями. Імпульсна теплова дія, що діє паралельно, викликає ряд механотермічних процесів, що призводять поверхневі шари електродів у складнонапружений стан аж до їх пластичної деформації та крихкого руйнування. Оскільки електроди при іскровому розряді знаходяться між собою у кінематичному зв'язку, то поряд з тепловим впливом оброблювана

поверхня деталі піддається ударно-вібраційної дії. При кожній контактній взаємодії електродів утворюються та руйнуються мікролокальні містки зварювання, що викликають спільно з механічним ударно-вібраційним впливом пластичну деформацію поверхневих шарів, що модифікуються. Така енергетична дія з високою щільністю потужності стимулює розвиток в умовах електроіскрової обробки мікрOMETALУРГІЙНИХ процесів (термохімічних, газодинамічних, дифузійних).

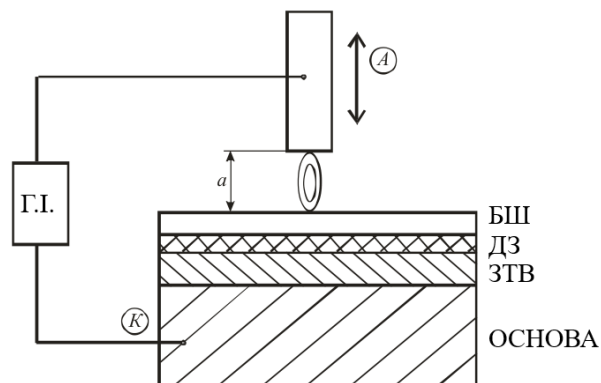


Рисунок 3.1 – Загальна схема процесу електроіскрового легування: А – легуючий електрод (анод); К – поверхня (катод); a – міжелектродний проміжок; Г.І. – генератор імпульсів; БШ – білий шар; ДЗ – дифузійна зона; ЗТВ – зона термічного впливу; ОСНОВА – оброблюваний матеріал

Поверхневий шар, сформований при ЕІЛ, є новою композиційною структурою. Його називають «білим шаром». Верхній тонкий шар складається з матеріалу анода, модифікованого елементами матеріалу катода та міжелектродного середовища. Суцільність та товщина даного шару залежать від структури матеріалу легувального електрода, режимів та часу обробки.

Під верхнім шаром розташовується модифікований зміцнений шар, що складається з суміші матеріалів анода та катода, що утворюється в результаті конденсації іонно-плазмової та крапельної фази та дифузії хімічних елементів матеріалу анода у матеріал катода. Під ним розташовується нижній і найбільший за товщиною шар, утворений в результаті імпульсного теплового

впливу (зона термічного впливу). Його структура відрізняється від структури матеріалу оброблюваної деталі будовою та зернистістю. З переміщенням углиб ця структура перетворюється на структуру основного матеріалу [40].

Таким чином, модифікування та зміцнення поверхневого шару відбувається завдяки наступним процесам [41]:

- осадження (конденсація) матеріалу анода лежить на поверхні катода;
- дифузія частинок матеріалу анода поверхневий шар матеріалу катода; утворення твердих розчинів та хімічних сполук (оксиди, карбіди, інтрметаліди);
- утворення зони взаємної кристалізації Me_1 і Me_2 , нерівноважних структур, фаз, а також дрібнозернистої структури.

При формуванні фазового складу та структури матеріалів та покриттів при ЕІЛ протікають такі фізико-хімічні процеси, як дифузія, фазові перетворення, теплоперенесення, масоперенесення, гетерогенні хімічні реакції, пружна та пластична деформація та ін.

До основних особливостей електроіскрового легування слід зарахувати:

- локальну обробку поверхні - легування можна здійснювати в певних, визначених місцях радіусом від часток міліметра і більше, не захищаючи при цьому решту поверхні деталі;
- високу міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою (висока адгезія покриття з основою);
- відсутність нагріву деталі в процесі обробки;
- можливість використання в якості матеріалів для обробки як чистих металів, так і їх сплавів, металокерамічних композицій, тугоплавких сполук тощо;
- дифузійне збагачення поверхні катода складовими елементами анода без зміни розмірів деталі-катода;
- відсутність необхідності спеціальної попередньої підготовки оброблюваної поверхні.

В даний час електроіскрове легування використовується для:

- збільшення твердості, корозійної стійкості, а також зносо- і жаростійкості;
- зниження здатності до схоплювання поверхонь при терті;
- відновлення розмірів інструменту, деталей машин та механізмів;
- зміни електричних властивостей контактуючих елементів та емісійних здібностей поверхні;
- проведення на оброблюваній поверхні мікрометалургійних процесів для утворення на ній необхідних хімічних сполук;
- створення на робочій поверхні перехідних шарів певної шорсткості;
- нанесення радіоактивних ізотопів.

Процес формування покриттів в ЕІЛ залежить від таких основних факторів: характеру анодних і катодних матеріалів, їх поведінки при іскровому розряді, електричних параметрів процесу, складу навколишнього середовища, часу обробки. Формування покриттів характеризується рядом закономірностей [40]. Характерним явищем є те, що при формуванні шару збільшення часу обробки не призводить до збільшення товщини, а навпаки, з певної точки, до його зменшення. Це пояснюється тим, що в процесі ЕІЛ змінюється хімічний склад катода та його фізико-механічні властивості, характер теплообміну та маси між анодними та катодними матеріалами [40].

3.2 Дослідження модифікованих сталених поверхонь після ЕІЛ

Проведені металографічні дослідження отриманих Al-C-B покриттів показали, що вони складаються з декількох структурних ділянок. Їх кількість, а також параметри визначаються енергією розряду при ЕІЛ (рис. 3.2).

При відносно невисоких енергіях розряду (0,13 Дж) шари складаються з 3-х зон – верхній «білий» зміцнений шар, дифузійна зона і основа. Збільшення енергії розряду від 0,55 Дж призводить до зміни кількості ділянок та їх структури (рис. 3.2, в): верхній шар з дендритною структурою (до 75 мкм), прошарок (до 10-15 мкм), дифузійна зона, що характеризується структурою неповної перекристалізації, яка для сталі 15ХГН2ТА визначається нагріванням

до температурного діапазону 710-800 °С. Метал на цій ділянці піддається частковій перекристалізації.

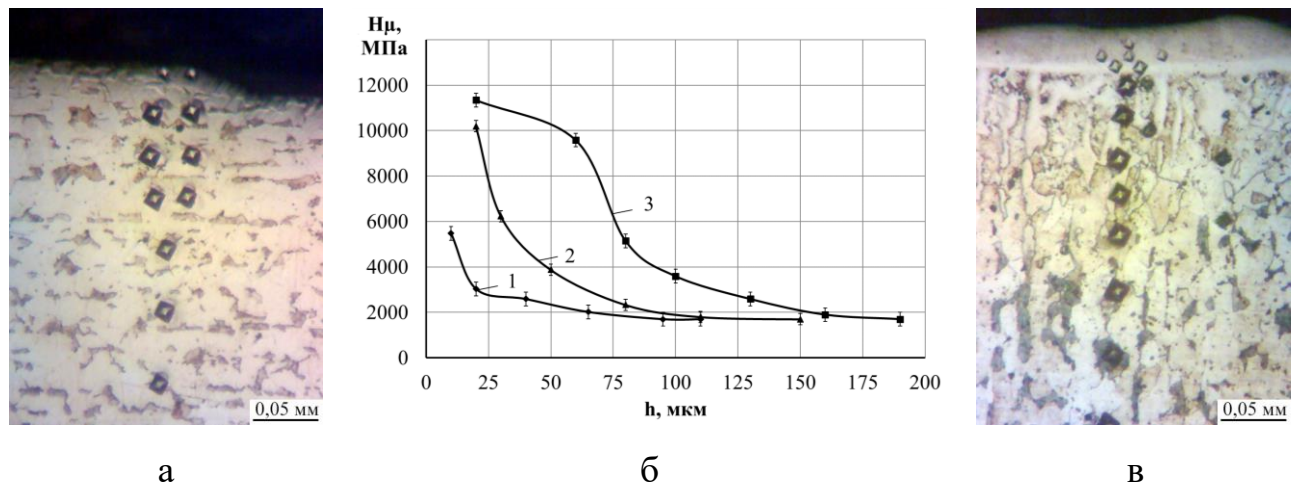


Рисунок 3.2 – Мікроструктури (а, в) і розподіл мікротвердості (б) Al-C-V покриттів: а – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 0,55$ Дж; б – на графіку 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,55$ Дж, 3 – $W_p = 4,9$ Дж

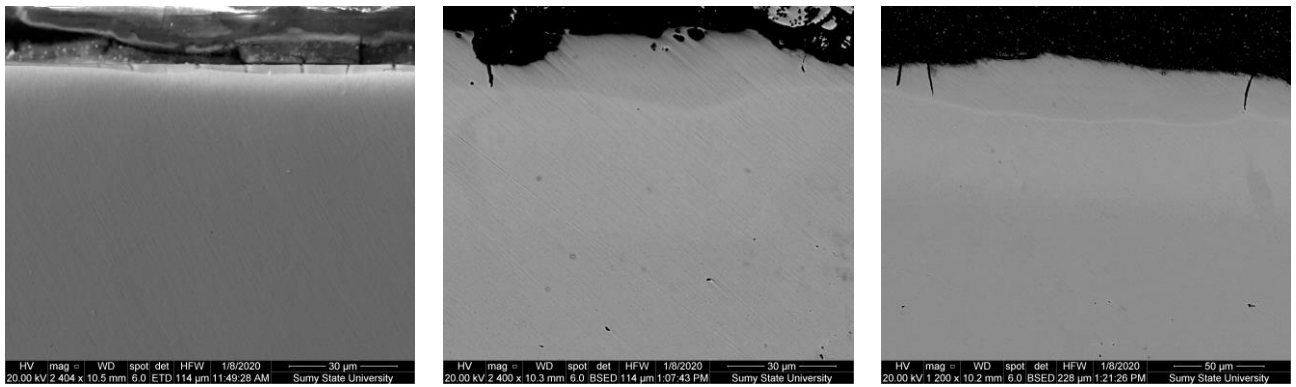
Таблиця 5.1

Якісні параметри Al-C-V покриттів, отриманих методом ЕІЛ

Енергія розряду, Дж	Шорсткість, мкм			Зміцнений шар		
	Ra	Rz	Rmax	Hμ, МПа	h, мкм	S, %
0,13	1,1	2,7	7,2	5474	20	60
0,55	2,9	4,1	16,3	10196	30	80
4,9	8,9	18,7	46,1	11345	75	98

S, % - суцільність шару

На рисунку 3.3 представлені результати електронно-мікроскопічних досліджень Al-C-V покриттів. При $W_p = 0,13$ Дж формуються тонкі і не суцільні шари. Зі збільшенням енергії розряду товщина покриттів, їх суцільність, збільшуються. Необхідно відмітити, що зі збільшенням енергії розряду відбувається збільшення дифузійної зони Al, C і V. Так, при $W_p = 0,13$ Дж ця зона складає 5-7 мкм, тоді як при $W_p = 4,9$ Дж – 23-25 мкм (рис. 3.4, табл. 5.1). Більшою мірою вглиб від поверхні дифундує вуглець і алюміній.

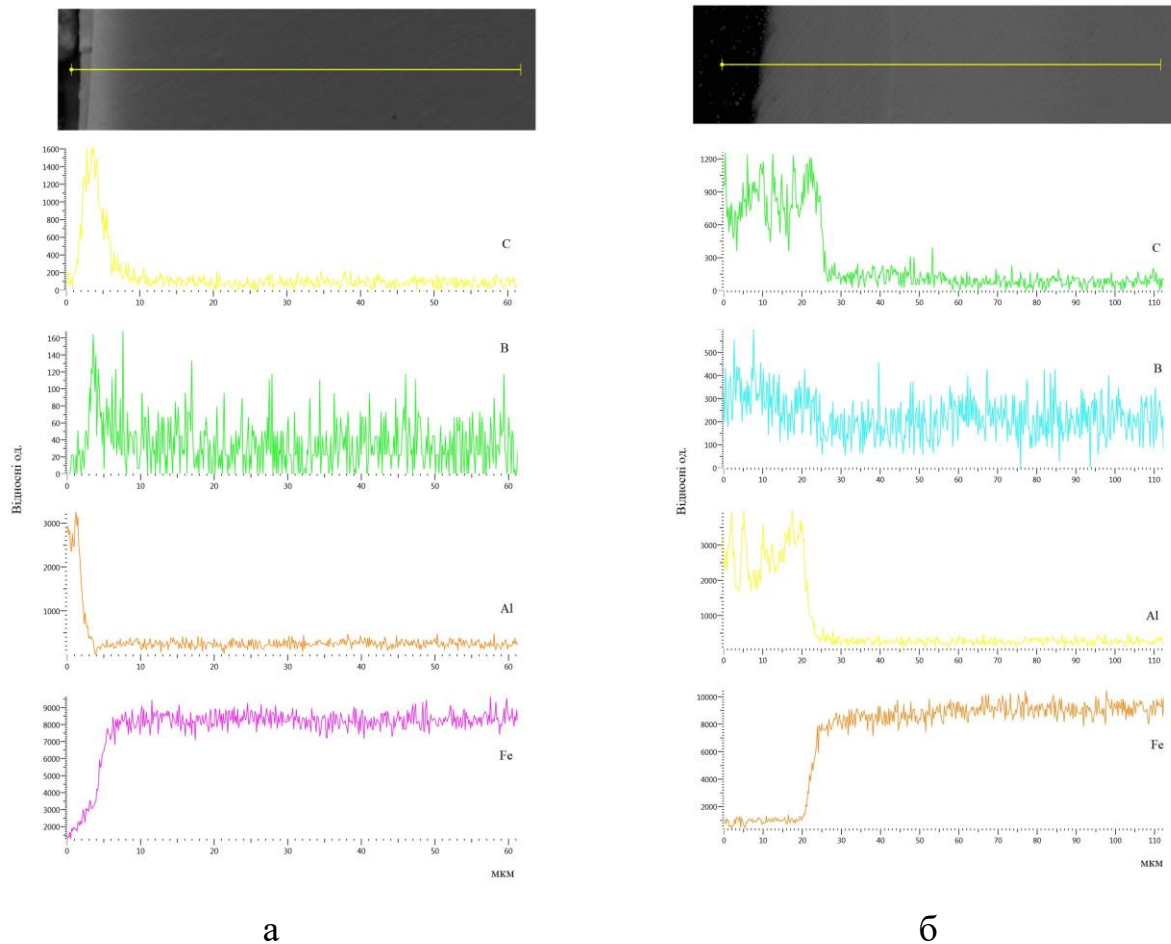


а

б

в

Рисунок 3.3 – Структури поверхневих Al-C-V покриттів, отриманих методом ЕІЛ: а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 4,9$ Дж



а

б

Рисунок 3.4 – Розподіл елементів у Al-C-V покриттях, отриманих методом ЕІЛ : а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 4,9$ Дж

Таким чином, мікроструктурний аналіз Al-C-V покриттів показав, що поверхневий шар складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких

визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ. При енергіях розряду порядку 0,13 Дж шари складаються з 3-х ділянок – верхній «білий» зміцнений шар, дифузійна зона і основа з ферито-перлітною структурою. При цьому, величина «білого» шару для цих режимів становить 20-30 мкм. Збільшення енергії розряду до 4,9 Дж призводить до зміни кількості ділянок та їх структури: верхній шар з дендритною структурою (до 75 мкм), прошарок (10-15 мкм), дифузійна зона, що характеризується структурою неповної перекристалізації, а також основного металу. ДюрOMETричні дослідження показали, що зі збільшенням енергії розряду збільшується мікротвердість як верхнього зміцненого шару, так і дифузійної зони: при $W_p = 0,13$ Дж $H_u = 5474$ МПа, а при $W_p = 4,9$ Дж – 11345 МПа.

Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що при електроіскровому легуванні відбувається насичення поверхневих шарів алюмінієм, бором і вуглецем. Зі збільшенням енергії розряду дифузійні зони вуглецю, бору та алюмінію збільшуються, причому активніше вглиб від поверхні дифундує вуглець і алюміній. Крім того, при $W_p = 0,13$ Дж формуються тонкі і не суцільні шари. Зі збільшенням енергії розряду товщина покриттів, їх суцільність, збільшуються.

3.3 Висновок

Розглянутий вплив електроіскрового легування на структуроутворення покриттів на сталених поверхнях. Будова покриття залежить від режимних параметрів легування та швидкості охолодження після обробки.

Мікроструктурний аналіз Al-C-B покриттів показав, що поверхневий шар складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ. При енергії розряду 0,13 Дж шари складаються з 3-х ділянок – верхній «білий» зміцнений шар, дифузійна зона і основний метал з ферито-перлітною структурою. При цьому, величина «білого» шару для цього режиму становить біля 20 мкм. Збільшення енергії розряду до 4,9 Дж призводить до зміни кількості ділянок та їх структури: верхній шар з

дендритною структурою (до 75 мкм), прошарок (до 10-15 мкм), дифузійна зона, що характеризується структурою неповної перекристалізації, а також основного металу. ДюрOMETричні дослідження показали, що з посиленням енергетичного впливу при ЕІЛ збільшується мікротвердість як верхнього зміцненого шару, так і дифузійної зони: при $W_p = 0,13$ Дж $H_{\mu} = 5474$ МПа, а при $W_p = 4,9$ Дж - 11345 МПа.

Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що при електроіскровому легуванні відбувається насичення поверхневих шарів алюмінієм, бором і вуглецем. Зі збільшенням енергії розряду дифузійна зона збільшується. Необхідно відмітити, що при енергії розряду $W_p = 0,13$ Дж формуються тонкі і не суцільні шари. Зі збільшенням енергії розряду товщина покриттів, їх суцільність, збільшуються. Необхідно відмітити, що зі збільшенням енергії розряду відбувається зростання дифузійної зони Al, C і B: при $W_p = 0,13$ Дж ця зона складає 5-7 мкм, тоді як при $W_p = 4,9$ Дж – 23-25 мкм. Більшою мірою вглиб від поверхні дифундує вуглець і алюміній.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Економічна ефективність наукових досліджень

Сукупність всіх поточних витрат за виробництво продукції визначається показником собівартості (витрати виробництва). Собівартість продукції — це загальна сума витрат на виробництво одиниці товару або надання послуги. Простіше кажучи, собівартість продукції — це сума грошей, яку підприємець витрачає на виробництво та продаж товару. Стосовно підприємства собівартість продукції — ціна тих природних ресурсів, сировини, матеріалів, палива, енергії, основних засобів, трудових ресурсів, що використовуються у процесі виробництва продукції (робіт, послуг), а також інших витрат на її виробництво і реалізацію. Сума витрат відповідно до статей калькуляції складає основу їх функціональної участі у виробничому процесі [43].

До першої статті витрат відносять витрати на сировину та основні матеріали, з яких виготовляють продукцію, або є важливими і необхідними компонентами при її виготовленні. До цієї групи відносять також допоміжні матеріали, що використовуються в технологічних цілях. Загальні витрати на основні та допоміжні матеріали додають до собівартості виробляємих виробів та замовлень прямим шляхом, враховуючи затверджені норми витрат на одиницю продукції, а також ціни на відповідні матеріали та послуги.

До другої статті відносять витрати, що пов'язані з оплатою виконання робіт та послуг. До цієї статті належать витрати на оплачення праці працівників, які пов'язані залученням до процесу виготовлення деталей, продукції, виконанням певних робіт та надання послуг. Також сюди включається премії, додаткова заробітна плата. Друга стаття враховує виплати, що передбачені трудовим законодавством за невідпрацьований виробничий час (доплати підліткам, матерям-одиначкам, щорічна відпустка, виконання державних обов'язків, за роботу в нічний час тощо). Як правило, вона складає 10-20% від основної заробітної плати.

До третьої статті відносять амортизаційні відрахування. З одного боку, вони виступають як елемент собівартості, з іншого в якості джерела внутрішнього фінансування організації / підприємства. Збільшення величини амортизаційних відрахувань стає перспективним з погляду створення внутрішніх грошових ресурсів підприємства. Крім того, ці фінансові ресурси можна використовувати в якості інвестиційних, але в поточній діяльності підприємства. Але збільшення амортизаційних відрахувань призведе до збільшення витрат виробництва, а отже, при цьому збільшується ціна продукції, що може бути недопустимо і непривабливо для споживача. Це особливо важливо за умов конкурентної боротьби над певним ринком товарів чи послуг, за умов випуску високовартісної, а отже і не конкурентоспроможної продукції.

Також важливою є стаття витрат, яка пов'язана з витратами на ремонт обладнання. Як відомо, кошти на ремонт відраховуються з амортизаційних відрахувань, а отже є пов'язаною з попередньою статтею витрат

Четверта стаття враховує витрати на енергію. До цієї статті додаються витрати на всі види палива та енергії, які безпосередньо використовуються в процесі виробництва продукції. Це можуть бути ресурси, що отримані ззовні, а також вироблені самим підприємством.

4.2 Оцінка ефективності прикладних досліджень

Економічні розрахунки проводились для сталі 15ХГН2ТА Без термічної обробки із врахуванням тільки обробку електроіскровим методом (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Режим обробки досліджуваної сталі

№ зразка	Режими обробки
1	ЕІЛ в бормісній пасті

Для визначення вартості технології розраховуються окремі елементи витрат. Вартість зразка визначається за формулою 4.1

$$C_m = (Q \cdot C_m) \cdot a, \text{ (грн)} \quad (4.1)$$

де Q – норма витрати матеріалу (маса заготовки, для прикладу шестерні невеликого розміру), кг;

$Q_{\text{зразка}}$ буде 1,5 кг.

C_m – показник, що враховує ціну матеріалу, з якого виготовлена заготовка, в грн.;

для сталі 15ХГН2ТА – 65 грн./кг.

a – коефіцієнт, що може враховувати витрати на проведення обробки (умовно приймаємо 1,5).

Згідно формули 4.1, маємо:

$$C_m = 1,5 \cdot (65 \cdot 1,5) = 146,25 \text{ (грн)}$$

Основна та додаткова заробітна плата робітника виробництва з відрахуваннями на соціальне забезпечення та інші фонди (на операції) розраховується за формулою 4.2:

$$Z_p = C_{\text{ч}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{t_{\text{шт}}}{60} \cdot K_{\text{мн}} \cdot n, \text{ (грн)} \quad (4.2)$$

де $C_{\text{ч}}$ – годинна тарифна ставка відповідного розряду, грн. (приймаємо III розряд: ставка 20 грн./год.);

K_1 – коефіцієнт, що враховує додаткову зарплату (приймаємо $K_1 = 1,7$);

K_2 – коефіцієнт, що враховує багатостаттєве обслуговування (приймаємо $K_2 = 1,4$);

$t_{\text{шт}}$ – час на операцію для однієї заготовки (партії), ЕІЛ = 0,5 годин,

$K_{\text{мн}}$ – коефіцієнт, що враховує обслуговування кількома одиницями обладнання (приймаємо $K_{\text{мн}} = 1$);

n – кількість одиниць обладнання на даній операції, шт

Відповідно до формули 4.2 проводимо розрахунки:

$$Z_p = 20 * 1,7 * 1,4 * 0,5 / 60 * 1 * 1 = 0,4 \text{ (грн)}$$

Із розрахунку 100 деталей на рік 400 грн.

Амортизаційне відрахування по обладнанню, віднесені на даний метод розраховуємо за формулою 4.3:

$$A_0 = \frac{S_0 \cdot K \cdot a \cdot n}{N_{\text{год}} \cdot 100} \quad (4.3)$$

де S_0 – вартість одиниці обладнання, грн.; установка та пристосування - 50 000 грн.;

K – коефіцієнт, що враховує витрати на транспортування і монтаж устаткування; приймаємо $K = 1,15$;

a – норма амортизаційних відрахувань (5% від вартості обладнання);

n – кількість одиниць обладнання на даній операції, 1 шт.;

$N_{\text{год}}$ – річна програма експериментальних зразків, шт. (приймаємо 100 шт.)

Відповідно до формули 4.3 проводимо розрахунки:

$$A_0 = 50\,000 * 1,15 * 2500 * 1 / 100 * 100 = 14375 \text{ (грн)}$$

Вартість ремонту обладнання розраховується пропорційно вартості амортизації і розраховується з використанням форми 4.4:

$$P = A_0 \cdot K \text{ (грн)} \quad (4.4)$$

де K – коефіцієнт, що встановлює залежність суми ремонтних витрат від величини амортизації (приймаємо 15%)

Відповідно до формули 4.4 проводимо розрахунки:

$$P = 14375 * 1,5 = 21\,562 \text{ (грн)}$$

Вартість електричної енергії для цих методів розраховується за формулою 4.5:

$$E = [K_1 \cdot N_y \cdot (t_{шт} \cdot t_{маш}) + K_2 \cdot N_y \cdot t_{маш}] \cdot \frac{S_E}{60}, (\text{грн})$$

де N_y – сумарна встановлена потужність одиниці обладнання, кВт;

K_1 – коефіцієнт, що враховує використання встановленої потужності, що втрачається при ненапруженій роботі обладнання (приймаємо $K_1 = 0,4$);

K_2 – коефіцієнт використання встановленої потужності устаткування в процесі термообробки (приймаємо $K_2 = 0,8$);

$t_{шт}$ – час на операцію для однієї заготовки (партії), хв.;

$t_{маш}$ – машинний час на операцію, хв. (приймаємо 0,15 хв.);

S_E – вартість одного кВт/год. електроенергії, грн. (приймаємо $S_E = 3$ грн.)

$$E = [0,4 \cdot 50 \cdot (420 \cdot 0,15) + 0,8 \cdot 50 \cdot 0,15] \cdot \frac{3}{60} = 63,3 (\text{грн})$$

Таблиця 4.2

Витрати на ряд операцій

Найменування операції	Витрати на операцію (грн)
Основна та заробітна плата робітникам за даний вид роботи (100 зразків)	400
Амортизаційні відрахування по обладнанням	14375
Витрати на ремонт обладнання	21 562
Витрати на силову електроенергію	63,3
Загальна сума	36 400

4.3 Висновок

В економічній частині розраховані складові частини економічної доцільності проведення експериментальних досліджень. Її основою є собівартість. Собівартість продукції — це загальна сума витрат на виробництво одиниці товару або надання послуги, тобто сума грошей, яку підприємець витрачає на виробництво та продаж товару. В нашому випадку вона складається з вартості зразка (заготовки), основної та додаткової заробітної плати робітників, амортизаційних відрахувань, вартість електроенергії, обладнання та витрати на його ремонт.

Проведені розрахунки показала, що загальна вартість обробки 100 деталей буде складати 36 400 грн.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1 Безпека праці людей в цехах і на дільницях термічної обробки

Головною ціллю охорони праці на підприємстві є формування на кожному робочому місці безпечних умов праці, безпечної експлуатації обладнання, зменшення або повна нейтралізація дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів на організм людини і, як наслідок, зниження вирогідності професійних захворювань та виробничого травматизму.

У цьому розділі представлений аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть виникнути при роботі термічного цеху. Дані рекомендації до розробки заходів і засобів, спрямованих на зменшення несприятливого впливу на робочих.

Розглянемо охорону праці в термічних цехах відповідно до наказу державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 18.12.2007.

Ці правила використовуються на всіх суб'єктах господарювання (далі - організації), які проводять термічну обробку або проектують у будівництві, реконструкцію та експлуатацію термічних цехів і ділянок, а також беруть участь у конструюванні, виготовленні, монтажі і налагодженні нового обладнання; технічному обслуговуванні, експлуатації, ремонті і модернізації діючого устаткування для термічної обробки металів.

Працівники під час прийняття на роботу і в процесі роботи проходять перевірку знань відповідно до Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці.

При термічній обробці металів можливий вплив на працівників різних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, у тому числі [44]:

- незахищені рухливі елементи виробничого устаткування;
- заготовки, готові вироби або деталі, що пересуваються (далі - деталі);

- транспортні засоби, що рухаються;
- аерозолі фіброгенної дії (пилу);
- несприятливий мікроклімат робочої зони;
- підвищена температура поверхонь устаткування і матеріалів;
- знижена температура при обробці деталей холодом;
- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання (ультрафіолетового, видимого, інфрачервоного, лазерного, мікрохвильового, радіочастотного);
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- знижена освітленість робочого місця;
- пожежо- і вибухонебезпека;
- хімічні фактори загальнотоксичного, дратівного,
- канцерогенного впливу на організм працівника;
- важкість і напруженість праці.

З метою контролю процесів підготовки виробів до термообробки, операцій контролю та регулювання параметрів (температури, тиску в робочому просторі печі, хімічний склад газового середовища тощо) термічної обробки металів необхідно застосовувати блокування, а також засоби світлової та звукової сигналізації про порушення технологічного процесу, які можуть призвести до виникнення аварійної ситуації [44].

При підготовці виробів та деталей до термічної обробки (нанесення захисних паст, травлення, знежирення та ін.) та при проведенні термічної обробки із застосуванням речовин, що володіють токсичними, пожежо- та вибухонебезпечними властивостями (гасу, мастила, розплавів солей та металів, рідких середовищ) повинна бути виключена можливість впливу цих речовин на працюючих. Нагріті в процесі термічної обробки вироби та деталі необхідно

розміщувати в місцях, обладнаних ефективною витяжною вентиляцією або спеціально обладнаних охолоджувальних приміщеннях або пристроях. Місця можливого виділення у повітряне середовище виробничих приміщень речовин, токсичних, вибухонебезпечних речовин та пилів мають бути забезпечені витяжною механічною вентиляцією у вибухозахищеному виконанні.

При розробці технологічних процесів термічної обробки металів повинні передбачатися оптимальні режими роботи обладнання, що забезпечують:

- безперервність технологічного процесу;
- раціональний ритм роботи людей, які виконують окремі технологічні операції;
- виключення можливості створення аварійної обстановки.

У всіх випадках виникнення аварійних ситуацій при веденні технологічного процесу роботу слід негайно припинити та вжити заходів щодо усунення аварійної ситуації. Ведення технологічного процесу слід продовжувати лише після того, як буде з'ясовано причину, що створила аварійну обстановку та вживуть заходів щодо її усунення [44].

Усі робітники, службовці та інженерно-технічні працівники термічних цехів та дільниць проходять інструктаж з безпеки праці та пожежної безпеки:

- вступний – на час вступу працювати;
- первинний – на робочому місці;
- повторний – не рідше одного разу на три місяці;
- позаплановий – у разі порушення вимог безпеки праці, нещасного випадку та ін.

При монтажі й експлуатації термічних електропечей необхідно виконувати ряд загальних вимог з техніки безпеки. Знижувальні трансформатори і панелі керування встановлюються безпосередньо на металевій конструкції електропечі, а пірометричної апаратури - на спеціальні пірометричні щити. Якщо пірометрична і силова апаратура розташовані на одному щиті, контактори встановлені на конструкціях, які не пов'язані з загальним каркасом щита.

Електроізоляція всіх струмоведучих частин повинна бути якісною та надійною. Вона підлягає регулярній перевірці.

Основними засобами захисту від ураження струмом є: забезпечення недоступності струмоведучих частин, які знаходяться під напругою, для випадкового доторкання; для цього завантажувальне вікно печі обов'язково блокується; уникнення небезпеки ураження при появі напруження на корпусах, кожухах і інших частин електрообладнання, що досягається застосуванням малих напружень, використанням подвійної ізоляції, вирівнюванням потенціалу, захисним заземленням, зануленням, захисним відключенням і таке інше; застосування спеціальних електрозахисних засобів – переносних приладів і пристосувань; організація безпечної експлуатації електроустановок. Апаратуру керування електропідігрівом доцільно розташовувати в безпосередній близькості від робочого місця.

5.2 Засоби індивідуального захисту робітників

Ті, хто працює в термічних цехах, повинні використовувати засоби індивідуального захисту. Відповідно до чинного законодавства ці засоби повинні бути надані роботодавцем кожному працівнику за рахунок коштів роботодавця.

Під індивідуальними захисними пристосуваннями та засобами мається на увазі спецодяг (у тому числі спецвзуття, спецбілизна та спеціальні головні убори), окуляри, респіратори, промислові протигази та протишуми, а також захисні мазі та пасти, що видаються підприємством робітнику для захисту від впливу професійних шкідливих факторів [45].

Спецодяг повинен захищати працюючого від несприятливих впливів довкілля (механічних, хімічних і термічних), не порушуючи при цьому терморегуляції організму.

Спецодяг робочих гарячих цехів у місцях, що піддаються опроміненню, шиється з кількох шарів:

- зовнішній шар - із лляної незаймистої тканини, середній - з легкої вовняної тканини або бавовняної сітки,
- внутрішній - з м'якої бавовняної тканини.

Для захисту від інтенсивного опромінення використовують спецодяг із місцевими накладками з металізованої тканини. Однак накладки з металізованої тканини є непроникними для повітря та пари та можуть знайти обмежене застосування.

Спецодяг працюючих у відділеннях ціанування, рідинного азотування, щоб уникнути отруєння термічних цехів, що працюють на інших ділянках, повинен здаватися в прання знешкодженим і зберігатися окремо від спецодягу працюючих інших ділянок термічних цехів. Заміна спецодягу на чистий, що зберіг свої захисні властивості, не рідше одного разу на 10 днів [45].

5.3 Освітлення в термічних цехах

Також слід розглянути норми освітлення термічних цехів промислових підприємств. Адже від того наскільки якісно організовано освітлення у виробничих цехах та приміщеннях на промислових підприємствах залежить безпека праці працівників, а також їхня продуктивність. Недостатнє освітлення підвищує ризик травматизму на виробництві, сприяє погіршенню самопочуття та здоров'я працівників підприємства. Крім того, погана освітленість може позначитися також на продуктивності підприємства, підвищуючи ймовірність випуску браку.

При проектуванні освітлення в промислових цехах слід приділити увагу наступним факторам [45]:

- конструктивним особливостям приміщення;
- відображає показники поверхонь;
- видам робіт, що виробляються в даному приміщенні.

Особливу увагу слід приділити освітленню робочих місць. При організації освітлення на промислових підприємствах необхідно виконати низку вимог:

- висвітлення виробничих приміщень має відповідати нормативам.
- світильники, що використовуються для промислового освітлення повинні бути надійними, безпечними, стійкими до вібрацій та механічних пошкоджень, а також володіти пило- та вологозахистом.
- необхідно забезпечити високий індекс кольору.
- необхідно мінімізувати пульсацію освітлювальних приладів.
- світильники, що застосовуються, повинні бути енергоефективними, економічними і мати тривалий термін експлуатації.

5.4 Контрольновимірювальні прилади термічних цехів

Приміщення термічних цехів, термічне обладнання та комунікації повинні бути оснащені контрольно-вимірювальними приладами для контролю рівнів небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що виникають у цьому процесі.

Контрольно-вимірювальні прилади повинні бути розташовані в місцях, зручних для спостереження, обслуговування та захищені від можливих пошкоджень. Для зміни приладів повинні бути передбачені пристрої, що відключають [45].

У термічних цехах, відділеннях та ділянках на газопроводах на лініях стисненого повітря у легкодоступних місцях для можливості локалізації дії небезпечних та шкідливих виробничих факторів повинні бути встановлені швидкодіючі пристрої, що відсікають і ізолюють вплив небезпеки.

Контролює роботу витяжних вентиляційних пристроїв та систем сигналізації в установленому порядку. Загатовальні масла повинні щотижня піддаватися контролю на вміст у них води. Виявлена вода має бути видалена.

Для вимірювання та регулювання температури в нагрівальних печах, установках та соляних ваннах застосовують наступні контрольно-вимірювальні прилади: термометри, термопари, мілівольтметри, потенціометри, пірометри, міліскопи тощо [27].

Термометри є найпростішими приладами для вимірювання температури в рідких і газових середовищах від -50 до $+600$ °C. Найбільш поширені рідинні термометри, засновані на спостереженні видимої зміни висоти стовпчика ртуті або забарвленого спирту, що знаходяться у скляній кульці.

Термопари призначені для вимірювання температури вище 600 °C. Термопара є приладом, в якому є два різнорідні провідники, спаяні з одного кінця. У ланцюзі двох різнорідних провідників при нагріванні виникає терморухаюча сила, величина якої зростає зі збільшенням температури нагріву в місці спаю провідників.

Потенціометри застосовують для точних визначень температури (похибка вимірювання не перевищує ± 5 °C). Сутність вимірювання температури потенціометром полягає в тому, що електрорушійна сила термопари врівноважується рівною їй за величиною, але протилежною за знаком електрорушійною силою від стороннього джерела струму).

Міліскопи застосовують для швидкого і точного вимірювання температури нагріву тіла, що рухається. Найбільш широко вони використовуються для контролю та автоматичного регулювання температури при полум'яному поверхневому гартуванні.

5.5 Охорона довкілля

Охорона навколишнього середовища (НС) – це комплекс науково-обґрунтованих міжнародних, державних, регіональних, адміністративно-господарських, політичних, економічних, громадських заходів, спрямованих на підтримання фізичних, хімічних і екологічних параметрів природного середовища в межах, які забезпечують нормальні умови життєдіяльності людини та можливість збереження і зміцнення її здоров'я.

Екологічні та природоохоронні відносини в суспільстві регулюються Конституцією України, в 13-ій статті якої зазначено: «Земля, її надра, атмосферне повітря, водні та інші природні ресурси є всенародним надбанням, а власником їх є Держава».

Проблеми охорони навколишнього середовища в цій області виробництва пов'язані з наступним [46]:

- шум;
- викиди в атмосферу;
- стічні води;
- тверді відходи.

Пил виділяється при термічних (наприклад, плавильна піч) і фізико-хімічних технологічних процесах – наприклад, формування та виробництво прутків, а також при механічних діях, таких, як навантаження/розвантаження сировини, в основному піску, а також процеси відливки та доведення.

У процесі плавлення форма і хімічний склад твердих викидів у вигляді пилу, частинок металу і парів оксидів металу можуть змінюватися залежно від типу печі, палива, оплавленого металу чи сплаву, режимів плавки. Як правило, вагранки під час роботи виробляють велику кількість твердих частинок (наприклад, кокс, летюча зола, кремнезем, іржа та вапняк). Електродугові печі (ЕДП) також є джерелом великих кількостей твердих частинок, як при завантаженні, а також під час плавки, подачі кисню і на стадії зневуглицьовування. Інші типи плавильних печей забезпечують більш низький процент викидів, особливо індукційні електричні печі [46].

Для запобігання значних викидів твердих частинок потрібно:

- використовувати індукційні пелі
- використання в плавильних печах технологій, які дозволяють понизити використання значної кількості електричної енергії (наприклад, встановлення кисневопаливних пальників тощо).

Викид оксидів нітрогену, викликаний нагріванням до високих температур та окисленням нітрогену. Зменшення викидів можна досягти, якщо змінити основний технологічний процес і вторинну технологію очищення в місці викиду.

Хлориди і фториди присутні в невеликих кількостях у відпрацьованих газах з плавильних печей і утворюються з флюсових речовин. Запобігання і зниження викидів цих утворених газів слід проводити на стадії сухого видалення пилу, а також в процесі використання технологій скрубєрів мокрого очищення, що встановлюються в печах для зменшення викидів твердих частинок і при плавлі сталі оксидів сірки [47].

Процес термічної або хіміко-термічної обробки вимагає великої кількості енергії, при цьому в печі утворюється значна кількість CO_2 і це веде до збільшення забрудненості повітря діоксидом вуглецю (CO_2). Цей оксид, як відомо, утворюється під час спалювання палива. Рекомендуються наступні методи запобігання викидам CO_2 [47]:

- впровадження у виробництво провідних технологій спалювання (наприклад, збагачення киснем повітря, що використовується при продувці, попередніє підігрівання ресурсів при завантаженні, управління параметрами спалювання);

- виконання необхідного регламенту експлуатації та техобслуговування устаткування та недопущення часткового завантаження термічного обладнання;

- Вибір палива з низьким хімічним вмістом вуглецю до теплотворної здатності (наприклад, метану CH_4). Викиди оксиду вуглецю CO_2 при спалюванні метану десь на 60% менше, порівняно з викидами під час спалювання кам'яного вугілля або нафтового коксу.

Під час ТО та ХТО утворюються різноманітні джерела шуму, включаючи навантаження/розвантаження деталей, а також системи транспортування та вентиляції. Рекомендовані методи боротьби з шумом включають наступне [46]:

- звукоізоляція приміщення або їх огороження;

- звукоізоляція приміщень, які призначені для навантаження/розвантаження деталей;
- використання заслінок, огороження вентиляторів, ізоляція вентиляційних труб;
- введення заходів для боротьби з шумом.

5.5 Висновок

В даному розділі було розглянуто охорону праці в термічних цехах. Робітники під час роботи на термічних дільницях піддаються впливу різного роду шкідливих факторів. Це шум, забруднення повітря, підвищені температури, вірогідність ураження електричним струмом тощо. Під час термічної обробки можуть виділятися в повітря цеху шкідливі речовини, такі як оксиди вуглецю, хлориди та інші летючі речовини, джерелом яких є атмосфера печі, охолоджувальне середовище (наприклад, пари води, мастила з масляного баку, оксиди азоту від селітрової ванни, пари хлору та оксид вуглецю під час термічної обробки в соляних печах.

В розділі представлений аналіз засобів протидії шкідливим факторам під час роботи в термічних дільницях. Існують стандарти, які регламентують правила розміщення обладнання і устаткування в термічних цехах. Проаналізовано вплив забрудненого повітря, речовин, які потрапляють в повітря під час проведення робіт в термічних цехах на здоров'я працівників. Розроблено ряд заходів щодо попередження забруднення повітря в цеху. Також проаналізовані і запропоновані заходи боротьби із шумом на термоділянці.

ВИСНОВКИ

1. На основі критичного аналізу переваг та недоліків відомих методів поверхневого зміцнення деталей з метою підвищення їх механічних та триботехнічних властивостей встановлено, що одним з найбільш перспективних методів є електроіскрове легування, при якій потоками частинок високої щільності енергії забезпечується створення поверхневих структур з підвищеними механічними та триботехнічними властивостями при значній простоті технологічного обладнання та економічності процесу.

2. Розглянута методика та матеріали для дослідження. У якості об'єкта експериментальних досліджень прийнята конструкційна легована високоякісна сталь 15ХГН2ГА, яка широко застосовується для виготовлення шестерень, осей, втулок, синхронізаторів, муфт, валів коробок передач автомобілів та інших видів техніки. Представлений аналіз впливу легувальних елементів на властивості сталі. Основними легувальними елементами є хром, нікель, титан. Розглянуті устаткування для електроіскрового легування, режими роботи установки, основні методи дослідження – металографічний аналіз (оптична та електронна мікроскопія) та визначення мікротвердості.

3. Розглянутий вплив електроіскрового легування на структуроутворення покриттів на сталених поверхнях. Будова покриття залежить від режимних параметрів легування та швидкості охолодження після обробки. Мікроструктурний аналіз Al-C-B покриттів показав, що поверхневий шар складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ. Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що при електроіскровому легуванні відбувається насичення поверхневих шарів алюмінієм, бором і вуглецем. Зі збільшенням енергії розряду дифузійна зона збільшується. Більшою мірою вглиб від поверхні дифундує вуглець і алюміній.

4. В економічній частині розраховані складові частини економічної доцільності проведення експериментальних досліджень. Її основою є

собівартість. Собівартість продукції — це загальна сума витрат на виробництво одиниці товару або надання послуги, тобто сума грошей, яку підприємець витрачає на виробництво та продаж товару. В нашому випадку вона складається з вартості зразка (заготовки), основної та додаткової заробітної плати робітників, амортизаційних відрахувань, вартість електроенергії, обладнання та витрати на його ремонт. Проведені розрахунки показала, що загальна вартість обробки 100 деталей буде складати 36 400 грн.

5. Розглянуто охорону праці в термічних цехах. Робітники під час роботи на термічних дільницях піддаються впливу різного роду шкідливих факторів. Це шум, забруднення повітря, підвищені температури, вірогідність ураження електричним струмом тощо. В роботі представлений аналіз засобів протидії шкідливим факторам під час роботи в термічних дільницях. Існують стандарти, які регламентують правила розміщення обладнання і устаткування в термічних цехах. Проаналізовано вплив забрудненого повітря, речовин, які потрапляють в повітря під час проведення робіт в термічних цехах на здоров'я працівників. Розроблено ряд заходів щодо попередження забруднення повітря в цеху. Також проаналізовані і запропоновані заходи боротьби із шумом на термоділянці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Триботехніка та основи надійності машин [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. Ф. Дмитриченко [и др.] ; Національний транспортний ун-т. - К. : ІНФОРМАВТОДОР, 2006. - 216 с.
2. Дурягіна З. А. Фізика та хімія поверхні Монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. 208 с.
3. Основи технологій обробки поверхонь деталей машин : підручник / В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, В.А. Яновський; за ред. В.А. Кириловича. – Житомир : Видавець О.О. Євенок, 2017. – 266с.
4. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст]: навч. посіб. / А.Г.Фесенко та [ін.] – Д.: РВВ ДНУ, 2015. – 104 с.
5. Каморченко В. А Підвищення зносостійкості зубчастих коліс методами хіміко-термічної обробки: дипломна робота / В.А. Каморченко – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020 – 126 с.
6. Кленов О. С. Технологічне забезпечення бездефектної обробки деталей гідроапаратури на фінішних операціях: автореф. дис.на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 – технологія машинобудування. / О. С. Кленов // – Одеса: ОНПУ, 2011. – 21 с.
7. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.
8. Трибологічні властивості карбонітридних покривів, сформованих на титані термодифузійним карбонітруванням / О. І. Яськів, І. М. Погрелюк, О. В. Самборський, В. М. Федірко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. - №3. - 2011. - С. 40-45.
9. Біленко Е.Г. Вплив швидкісної термічної обробки з подальшим іонно-променевим азотуванням на фізико-механічні властивості сталі 40Х [Текст] /Е.Г. Біленко, І.І. Вегера // Тертя та зношування. - 2008. - №6. - С. 578-582..
10. Bottoli F., Jellesen M.S., Christiansen T.L., Winther G., Somers M.A.J.

High temperature solution-nitriding and low-temperature nitriding of AISI 316: effect on pitting potential and crevice corrosion performance, *Appl. Surf. Sci.* 431 (2018) 24–31, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.094>.

11. Дурягіна З.А., Лазько Г.В. Структура та властивості сталі 12Х18Н10Т після комплексного лазерного легування // *Фізика і хімія твердого тіла.* - Т. 10, № 3 (2009) С. 665-669.

12. Laser surface alloying on aluminum and its alloys: A review / Yiming Chi, Guochao Gao, Huijun Yua, Chuanzhong Chena. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 100, 2018, P. 23-37

13. Riabkina-Fishman M., Zahavi J. Laser alloying and cladding for improving surface properties. *Applied Surface Science*. Vol. 106, 1996, P. 263-267.

14. Гаркунов, Д.Н. Триботехника: учебник для студентов ВУЗов [Текст] / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.

15. Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями / В. Є. Марчук, Б. А. Ляшенко, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота // *Проблеми тертя та зношування.* - 2013. - № 2. - С. 80-87.

16. Майоров, В.С. Загартування чавунних деталей випромінюванням твердотілого лазера [Текст] / В.С. Майоров, С.В. Майоров // *Металознавство та термічна обробка металів.* - 2009. - №3 (645). - С. 6-8..

17. Structure and mechanical properties of W–Se–C/diamond-like carbon and W–Se/diamond-like carbon bi-layer coatings prepared by pulsed laser deposition / Yu. Fominski, S.N. Grigoriev, J.P. Celis, R.I. Romanov, V.B. Oshurko. *Thin Solid Films*. Vol. 520 (21). 2012, P. 6476-6483.

18. *Laser and Electron Beam Processing of Materials* / C.W. White and P.S. Peercy. 1980 Elsevier. ISBN 978-0-12-746850-1

19. Батаєва, Є.А. Вплив вихідного стану на неоднорідність структури вуглецевих сталей, зміцнених методом електронно-променевої обробки при атмосферному тиску [Текст] / Є.О. Батаєва, І.А. Батаєв, В.Г. Буров, Л.І. Тушинський, М.Г. Голковський // *Металознавство та термічна обробка металів.* - 2009. - №3 (645). - С. 3-6.

20. Дехонова, С.В. Структура та триботехнічні властивості сплаву Cu-Ni-WC, отриманого методом електронно-променевої наплавки [Текст] / С.В. Дехонова, С.В. Степуляк, В.Г. Дурнів [та ін.] // Тертя та зношування. - 2002. - Т.23. - №6. - С. 678-679.
21. Полетика, І.М. Структура та властивості корозійностійких покриттів, отриманих методом електронно-променевої наплавки в атмосфері повітря [Текст] / І.М. Полетика, Ю.Ф. Іванов, М.Г. Голковський [та ін.] // Металознавство та термічна обробка металів. - 2009. - №12. - С. 33-39.
22. Formation of Perspective Composite Coatings by Ion-Beam Assisted Deposition / F.F. Komarov , V.V. Pilko , A.D. Pogrebnjak, C. Karvat , K. Kiszczak, C. Kozak. Acta Physica Polonica. 2013. Vol. 123. No. 5. P. 800-803. DOI: 10.12693/APhysPolA.123.800
23. Wear resistance of ion-implanted metallic materials / I.B. Kurakin, A.E. Ligachov, J.E. Remnev, M.G. Sipailo. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 51, Iss. 1–3, 1992, P. 180-185. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(92\)90235-3](https://doi.org/10.1016/0257-8972(92)90235-3)
24. Cotell M., Hirvonen James K.. Effect of ion energy on the mechanical properties of ion beam assisted deposition (IBAD) wear resistant coatings. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 81, Iss.1, 1996, P. 118-125. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02650-9](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02650-9)
25. Білий, А.В. Структура та властивості обробленої концентрованими потоками іонів азоту інструментальної мартенситно-старіючої сталі типу Fe-Co-W [Текст] / О.В. Білий, В.А. Кукаренко, К.І. Чій // Матеріалознавство та термічна обробка. - 2011. - №12. - С. 11-15.
26. Grigoriev, S.N.; Metel, A.S.; Melnik, Y.A.; Volosova, M.A. Equipment and Technology for Combined Ion–Plasma Strengthening of Cutting Tools. *Machines*. 2018, 6, 58. <https://doi.org/10.3390/machines6040058> .
27. Паульс, В.Ю. Вплив параметрів термоелектричної обробки на поверхневе зміцнення легованих сталей [Текст] / В.Ю. Паульс, В.М. Кусков, Н.І. Смолін // Матеріалознавство. - 2006. - №12. - С. 50-53.
28. Братушка, С.М. Структура та триботехнічні характеристики сталі,

легованої Мо або W у режимі оплавлення плазмовим струменем [Текст] / С.М. Братушка, Ю.М. Тюрін, О.В. Колісніченко, О.Д. Михалєв, Р.Ю. Ткаченка, Н.А. Махмудов, А.В. Пшик, Р. Денисенко, І.В. Якущенко // Тертя та зношування. – 2012. – Том 33. – №1. – С. 32-45.

29. Комплексні технології обробки деталей поліграфічного обладнання : монографія / П.О. Киричок., С. М. Зигуля, О. І. Бараускєне. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, В-во «Політехніка», 2023. — 137 с.

30. Жуков О. М. Підвищення ефективності виготовлення елементів торцевих імпульсних ущільнень турбомашин нанесенням функціональних покриттів [Електронний ресурс] : автореф. дис. канд. техн. наук : спец. 05.02.08 / Олексій Миколайович Жуков ; [наук. керівник Тарельник В. Б.] ; Сум. нац. аграр. ун-т. – Харків, 2019. – 25 с.

31. Шевеля, В.В. Трибохимия и реология износостойкости [Текст] / В.В. Шевеля, В.П. Олександрєнко. – Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278 с.

32. Oskolkova, T.N., Glezer, A.M. Surface Hardening of Hard Tungsten-Carbide Alloys: A Review. *Steel Transl.* 47, 788–796 (2017). <https://doi.org/10.3103/S0967091217120099>

33. Харламов Ю. А. Методи модифікування поверхневих шарів деталей машин та інструментів. Сучасне машинобудування, 2000. №3-4 (5-6). С. 112-118.

34. ГОСТ 4543-71 Сталь якісна і високоякісна. Сортовий та фасонний прокат, калібрована сталь.

35. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник / Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 348 с.

36. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: Підручник. К.: Вища освіта, 2012. 548 с.

37. Фізичні методи вивчення властивостей матеріалів : підручник / Е.К. Посвятенко, Р.В. Будяк, О.В. Мельник, В.Г. Нікітін. – К. : НТУ, 2019. – 184 с.

38. Методи та засоби мікроскопії: моногр. / В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик,

Ю.Ю. Бондаренко та ін. - К.: НТУУ "КПІ", 2013. - 336 с.

39. 5449 Методичні вказівки щодо виконання лабораторної роботи з теми "Визначення твердості матеріалів" із дисципліни "Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів" [Електронний ресурс] : для студ. спец. 132 "Матеріалознавство" усіх форм навчання / А. І. Дегула, Т. П. Говорун, Н. А. Харченко. — Суми : СумДУ, 2022. — 23 с.

40. Проблеми експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості [Текст] : колективна монографія / В. С. Марцинковський, В. Б. Тарельник, Є. В. Коноплянченко та ін. ; за ред. : В. Б. Тарельника, Є. В. Коноплянченка. - Суми : Литовченко С.Б., 2020. — 410 с.

41. Забезпечення захисту поверхонь торцевих імпульсних ущільнень турбомашин шляхом формування зносостійких наноструктур : монографія / В. Б. Тарельник, Є. В. Коноплянченко, О. П. Гапонова [та ін.] ; за заг. ред. В. Б. Тарельника. – Суми : Університетська книга, 2022. – 252 с.

42. Analysis of the structural condition of a surface coating after electroerosive alloying. I. Features of formation of electroerosive coatings on steel 45 / V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, N. S. Evtushenko, V. A. Herasymenko // Metallofizika i noveishie tekhnologii. – 2018. – Vol. 40, № 2. – P. 235–253. DOI: 10.15407/mfint.40.02.0235

43. Економіка виробничого підприємства: Навчальний посібник / За ред. І. М. Петровича. — К.: Знання 2001. — 405 с.

44. Ресурс НПАОП 28.5-1.02-07 Правила охорони праці при термічній обробці металів <https://pro-oboi.com.ua/doc/15180/>

45. Пістун І.П. Охорона праці при виконанні зварювальних і термічних робіт: навчальний посібник / І.П. Пістун., Р.А. Яцюк, І.О. Трунова. – Львів: УАД, 2011. – 446 с.

46. Величко О.М., Зеркалов Д.В. Контроль забруднення довкілля: Навчальний посібник. – К.: Основа, 2002. – 256 с.

47. Зеркалов Д.В. Екологізація енергоспоживання: Монографія. – К.: – ТОВ Міжнар. фін. агенція, 1998. – 271 с.