

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: «Дослідження припрацювальних покриттів на сталевих поверхнях,
отриманих методом електроіскрового легування» _____

Здобувача групи _____ МТ.м-21 _____ Молдована Богдана Андрійовича

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

_____ Богдан МОЛДОВАН _____

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

Молдован Богдан Андрійович

1. Тема проекту (роботи) «Дослідження припрацювальних покриттів на сталевих поверхнях, отриманих методом електроіскрового легування» 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 77 сторінок, які містять 7 таблиць, 15 рисунків, список із 68 використаних джерел на 8 сторінках.

Більшість основних компонентів і вузлів відцентрових компресорів, насосів, турбін та інших механізмів працюють на високих швидкостях, навантаженнях, високих температурах і в умовах, які є корозійними, абразивними та іншим чином під впливом робочого середовища. Рішення проблем, пов'язаних з продовженням терміну служби, безпосередньо залежить від підвищення зносостійкості і надійності вузла тертя. Компоненти піддаються найрізноманітнішим умовам експлуатації, причому найбільше навантаження припадає на поверхневий шар. Отже, фактичний термін служби верстата залежить від навантажувальної здатності поверхні деталі, а навантажувальна здатність визначається якістю поверхневого шару деталі. Створення поверхневого шару з особливими властивостями для елементів вузла тертя визначає зміст і актуальність проблеми та її вирішення. Властивості ковзання пари тертя залежать від комбінації валу, підшипника та мастильного матеріалу.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування припрацювальних покриттів на основі MoS_2 на сталевій підкладці методом електроіскрового легування.

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

1. Провести аналіз впливу електроіскрового легування на мікроструктуру та властивості обробленої поверхні.
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 поверхонь, що труться.

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, що містять MoS_2 .

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

Практичне значення одержаних результатів. На основі дослідження структуроутворення припрацювальних покриттів на основі MoS_2 запропоновані режими електроіскрового легування сталевих поверхонь відповідальних деталей машин.

Ключові слова: покриття, структура, сталь, MoS_2 , мікротвердість.

ABSTRACT

Bohdan Moldovan. Investigation of running-in coatings on the steel surfaces 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.

Over the past decades, surface engineering has become increasingly important in most areas of modern engineering. Its innovative nature of development covers a range of scientific areas of various sciences and knowledge, combining methods of targeted changes in the physical and chemical properties of the surface layers of materials by modifying, applying films, coatings, protective layers using various methods and their combinations.

One of the most relevant areas of hardening technologies is the method of electrospark alloying (ESA), which allows improving the mechanical, thermal, electrical, thermal emission and other properties of working surfaces by modifying their structure, which contributes to the improvement of physical and mechanical properties. The advantages of this method are the ability to form local coatings with high adhesion to the substrate; low energy consumption of the process; ease of processing; environmental friendliness, etc.

The influence of electric spark alloying on the structure formation of coatings on steel surfaces is considered. The structure of the coating depends on the alloying regime parameters and the cooling rate after treatment. The microstructural analysis of Al-C-B coatings showed that the surface layer consists of several areas, the number and parameters of which are determined by the energy regimes of the ESA process. The micro-X-ray spectral analysis of the obtained coatings indicates that during the electric spark alloying process, the surface layers are saturated with aluminium, boron and carbon. The diffusion zone increases with increasing discharge energy. Carbon and aluminium diffuse deeper from the surface.

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	10
1.1 Методи модифікування поверхні	10
1.2 Механізми структуроутворення в поверхневому шарі під час електроіскрового легування	10
1.3 Електродні матеріали для електроіскрового легування.....	18
1.4 Перспективні напрямки розвитку технології електроіскрового легування..	23
1.5 Висновок	27
1.6 Мета та завдання дослідження.....	28
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	29
2.1 Вибір матеріалу дослідження.....	29
2.2 Устаткування та методика електроіскрової обробки	29
2.3 Металографічний аналіз	31
2.4 Електронно-мікроскопічні дослідження.....	33
2.5 Дослідження мікротвердості.....	35
2.6 Трибологічні дослідження.....	37
2.7 Висновки	38
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	39
3.1 Основні фізичні процеси при електроіскровій обробці	39
3.2 Дослідження модифікованих сталених поверхонь після ЕІЛ	43
3.3 Висновок	49
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	51
4.1 Теоретична частина.....	51
4.2 Визначення технологічної собівартості.....	51
4.3 Розрахунок накладних витрат.....	55
4.4 Висновок	58

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	59
5.1 Шкідливі фактори при проведенні ремонтних робіт.....	59
5.2 Причини виникнення шкідливих та небезпечних факторів під час зварювальних робіт	61
5.3 Шкідливі речовини, що утворюються під час зварювання	62
5.4 Організація вентиляції при зварювальних роботах.....	63
5.5 Дія на організм електромагнітних полів та безпека в зварювальному виробництві.....	65
5.6 Екологічна безпека під час проведення відновлюваних робіт	66
5.7 Висновок	67
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ВСТУП

Актуальність роботи.

Проблема тертя і зношування деталей механізмів вузлів і спеціального обладнання в екстремальних умовах експлуатації є однією з найскладніших проблем, і важко створити умови, що дозволяють повною мірою використовувати їх потенціал. Недостатня зносостійкість поверхневих шарів вузлів і механізмів не тільки знижує працездатність устаткування і викликає простої, але й створює велике навантаження на потужності ремонтних майстерень і підприємств з виробництва запасних частин. Витрати на ремонт і обслуговування обладнання зазвичай збільшуються з часом пропорційно амортизації продукту.

Найефективнішим способом покращення зносостійкості деталей і вузлів тертя є моделювання та встановлення вдосконалених технологій розробки додатків і виробництва на етапі проектування.

Важливим напрямком вирішення цих проблем є науково обґрунтовані методи зміцнення та модифікації поверхонь тертя методами поверхневої інженерії на основі використання концентрованої енергії, які демонструють максимальну ефективність та економічність.

В останні десятиліття технологія поверхні стає все більш важливою в більшості областей сучасного машинобудування. Характеристики її інноваційного розвитку включають комплекс наукових напрямків різних наук і знань, а також шляхом модифікації та нанесення плівок, покриттів, захисних шарів різними методами та їх поєднаннями, поверхні матеріалів. Вона поєднує методи цільових змін у фізичних і хімічних властивостях шару.

Одним із сучасних напрямків технології зміцнення є метод електроіскрового легування (ЕІЛ). У цьому методі такі властивості, як механічні, теплові, електричні та тепловиділення, можна покращити шляхом зміни структури робочої поверхні, що сприяє покращенню фізико-механічних властивостей.

Перевагою цього методу є те, що він створює локалізоване покриття з хорошою адгезією до основи. Крім того, енергоємність процесу низька, легкість обробки, екологічна чистота.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування припрацювальних покриттів на основі MoS_2 на сталевій підкладці методом електроіскрового легування.

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

1. Провести аналіз впливу електроіскрового легування на мікроструктуру та властивості обробленої поверхні.

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 поверхонь, що труться.

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 припрацювальних покриттів на основі MoS_2 запропоновані режими електроіскрового легування сталевих поверхонь відповідальних деталей машин.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Методи модифікування поверхні

В машинобудуванні широко застосовуються деталі зі сплавів на основі заліза. Сталі забезпечують високі фізико-механічні властивості, технологічність обробки тиском та різанням, забезпечують добру або задовільну зварюваність, виготовлення деталей як малих, так і великих розмірів для роботи з екстремальними навантаженнями та в агресивних середовищах. Одним з суттєвих недоліків сталевих поверхонь є їх схильність до утворення задирок та схоплювання під час проковзування в спряженнях. З метою протидії цьому явищу робочі поверхні модифікують термічною обробкою або наносять функціональні покриття [1]. Для деталей машин, які працюють з високими навантаженнями та потребують забезпечення тривалої довговічності роботи (вали та зубчасті колеса редукторів, кулачкові механізми, гальмуючі пристрої тощо), вибір матеріалу з відповідними властивостями є дуже важливим.

На практиці застосовують різні методи модифікації поверхні: поверхневе пластичне деформування (обробка дробом, обкатка кулькою, обкатка роликом, алмазне вигладжування та ін.), хіміко-термічна обробка, поверхневе термічне оброблення, наплавлення, напилення (PVD, CVD, тощо), оброблення концентрованими потоками енергії (лазерна, електронним і іонним пучками, електроіскрове легування та ін.).

Найбільш перспективними є методи, що засновані на використанні концентрованих потоків енергії та речовини. До таких методів належить електроіскрове легування.

1.2 Механізми структуроутворення в поверхневому шарі під час електроіскрового легування

На сьогоднішній день в літературі представлена достатня кількість робіт,

присвячена електроіскровому легуванню (ЕІЛ). Основоположниками цього методу є подружжя Лазаренко [2], в їх роботах описані основи модифікування поверхні та формування покриттів цим методом.

Електроіскрове легування металевих поверхонь є явищем електричної ерозії і полярного перенесення матеріалу анода на катод при імпульсних розрядах в газовому середовищі. Процес ЕІЛ починається в момент зближення анода з катодом і при відстані між ними дорівнює пробивному, починається розвиток іскрового розряду тривалістю 10^{-7} - 10^{-8} с, який у багатьох випадках продовжується і завершується після контакту електродів. Потім після пробою міжелектродного проміжку на поверхні електродів розвиваються локальні осередки плавлення та випаровування, які викликають електричну ерозію електродів. Переважне перенесення еродованого матеріалу анода на катод забезпечує формування на катоді поверхневого шару із заданими експлуатаційними характеристиками та фізико-хімічними властивостями. Так як процес перенесення матеріалу анода відбувається в газовому середовищі, то можливе утворення хімічних сполук, внаслідок чого частинки, що відокремилися від анода, можуть бути не схожі на матеріал анода. Потім анод (електрод) відходить від катода і на поверхні останнього залишається шар матеріалу анода, який міцно зчеплений з катодом. У свою чергу значення змінених характеристик визначається технологічними параметрами ЕІЛ, а певні фізико-хімічні властивості залежатимуть від складу та властивостей матеріалів електродів.

За рахунок полярного ефекту ерозії та деяких інших факторів перенесення еродованого матеріалу анода на катод у процесі електроіскрового легування формуються на катоді поверхневі шари, що є результатом взаємодії матеріалів електродів та середовища міжелектродного проміжку. При полярному перенесенні кількість рідкої фази на аноді перевищує ерозію катода, і надалі сформований на катоді поверхневий шар повинен складатися переважно з матеріалу анода. Але гідродинамічне перемішування може сприяти тому, що в цьому шарі можливе отримання покриття по всьому об'єму аж до

поверхні не тільки матеріалу анода, а в ряді випадків і матеріалів катода.

Кристалізація та взаємодія рідких фаз матеріалу електродів при електроіскровому легуванні відбуваються в основному на поверхні катода. На думку авторів [3] розплави матеріалу електрода (анода), взаємодіючи з навколишнім середовищем та матеріалом катода, залишається на його поверхні. Внаслідок цього змінюються фізико-хімічні властивості поверхні анода та катода.

Присутність матеріалу катода у поверхневому шарі анода відбувається як внаслідок потоку парокрапельної суміші та перемішування рідких фаз, так і виду того, що матеріали електродів схильні до схоплювання.

Багатьма дослідниками доведено, що властивості поверхневого шару істотно змінюються при ЕІЛ. Поверхневий шар формується за рахунок розплавленого металу, який залишається на поверхні, і шару металу, що прилягає до неї, що піддається структурним змінам від швидкого нагріву і охолодження металу. Однак властивості цього шару остаточно не визначені. Для простоти вивчення шару дослідники розбивають його на зони. Найпоширенішою є класифікація цих зон як подана на рисунку 1.1.

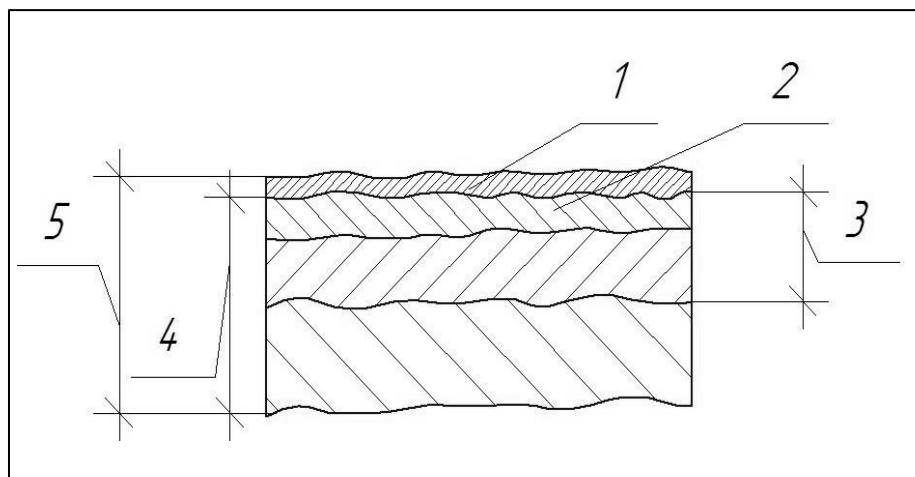


Рисунок 1.1 – Поверхневий шар, отриманий після ЕІЛ: 1 – зона відкладення матеріалу електрода (анода); 2 – «білий» шар, утворений з розплавленого матеріалу заготовки; 3 – зона термічного впливу; 4 – зона пластичної деформації; 5 – змінений поверхневий шар

Отримані зони зазвичай не мають чіткої різниці і здебільшого вони перекривають одна одну. Але незважаючи на це перелічені зони мають свої особливості, які впливають на властивості поверхні і в багатьох випадках зумовлюють можливість успішної експлуатації деталі або ріжучого інструменту. Більш докладний опис кожної із зон розглянуто у роботі [4].

Інші дослідники [2] поділяють на білий шар, перехідний шар, незмінений матеріал заготовки (рисунок 1.2.).

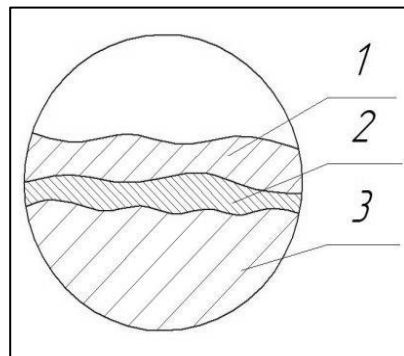


Рисунок 1.2 – Змінений поверхневий шар катода, отриманий після ЕІЛ:

1 - "білий" шар; 2 – перехідний шар; 3 – незмінений матеріал заготовки (основа)

Дослідники, які розділяють отриманий поверхневий шар виробу на дані зони: вважають, що в «білому» шарі спостерігаються хіміко-термічні перетворення, перехідного шару, який включає зону термічного впливу і дифузійну зону і під яким знаходиться незмінений матеріал виробу (катода). Автори вважають, що розподіл зон залежить від матеріалу основи та режимів електроіскрового легування.

Більшість дослідників вважають, що «білий» шар як правило має дрібнозернисту структуру, яка має високу хімічну стійкість, що ускладнює її виявлення шляхом травлення. Утворення білого шару при електроіскровому легуванні, пов'язане з впливом перенесення матеріалу електрода (анода) на катод. Підвищена швидкість тепловідведення призводить до того, що температура в межах невеликого шару знижується до температури плавлення та відповідних фазових перетворень. Тому кристалізація та фазові перетворення, які супроводжують процес ЕІЛ, згодом призводять до утворення

нерівноважних дрібнозернистих структур. На мікрошліфах цей шар має вигляд білих смуг, у зв'язку з цим він і отримав свою назву. На думку багатьох дослідників «білий» шар, слабо піддається травленню через його особливий структурний стан [5]. Деякі інші автори вважають, що білий шар погано піддається травленню, тому що він перебуває в контакті із зоною швидкісного високотемпературного відпустку, яка має більше позитивний електрохімічний потенціал. Для виключення впливу цієї зони білий шар трується звичайним реактивом.

По завершенню іскрового розряду та кристалізації матеріалів на поверхні анода та катода починає відбуватися наступна фаза електроіскрового легування. Суть цієї фази в тому, що між анодом та катодом починає відбуватися щільний фізичний контакт. Час контактування при вібруючому електроді показаний за допомогою осцилографування [3], що відбувається при частоті вібрації 100Гц набагато більше тривалості імпульсів струму і становить 0,6 ... 2мс.

Остання фаза процесу ЕІЛ починається з того, що зменшується механічний тиск між електродами, який пов'язаний з відведенням легуючого електрода від катода (деталі), і завершується розривом електричного ланцюга з видаленням анода від деталі на відстань, що значно перевищує пробивне, найчастіше відповідне амплітуді вібрації. У випадках, коли застосовували джерела імпульсів мають роз'єднані зарядні та розрядні ланцюги, виникнення дуги розмикання між електродами при відході анода від катода не відбувається. У випадках використання RC-генераторів як імпульсів, на останній фазі процесу можлива поява короткої дуги, яка є розривом контактної системи. Дослідження показують, що при м'яких режимах ЕІЛ, коли напруга U_p приблизно рівна 15...50 В дуга взагалі відсутня. Причиною цього є те, що за час розриву контакту через перехідні процеси напруга на конденсаторі, що підключається паралельно іскровому проміжку, не досягає максимального значення потенціалу запалювання короткої дуги. При більш високих значеннях напруги, істотної зміни в процес поява короткої дуги не вносить, тому що

ерозія електродів в даному випадку дуже мала порівняно з ерозією при розряді конденсатора.

Динаміка процесу електроіскрового легування представлена компактними електродами може мати цілу низку варіантів, пов'язаних з характеристиками матеріалу електродів, параметрами імпульсів, кінематикою руху електродів та ін.

Про процес електроіскрового легування компактними електродами можна сказати, що цей процес включає кілька циклів [6]:

- формування електричного контакту між анодом (електродом) та катодом (деталлю), після зближення електродів та пробою міжелектродного проміжку;
- електрична ерозія електродів;
- полярне перенесення та формування поверхневого шару на поверхні катода (деталі або інструменту);
- розрив електричного контакту між анодом та катодом, у момент розбіжності електродів.

Крім цього процеси на аноді та катоді можна поділити на елементарні, зумовлені перебігом одного розряду (ерозія, взаємодія матеріалів, що переносяться), і накопичувальні, які пов'язані з багаторазовою дією імпульсних розрядів (утворення залишкових напружень, фаз).

Електрична ерозія електродів – це руйнування поверхні електродів, яке супроводжується зніманням металу, в момент проходження електричних розрядів між електродами. Електрична ерозія електродів поєднує процеси, що відбуваються на межі між каналом розряду, з одного боку, і катодом або анодом з іншого. Автори методу ЕІЛ подружжя Лазаренко описали електричну ерозію як фізичне явище, яке полягає у спрямованому викиданні матеріалу електродів під дією самостійного електричного розряду, що протікає між ними. У випадку, коли електроди оточені газовим середовищем, описане явище в більшості випадків супроводжується відкладенням викинутого матеріалу на протилежному електроді, що в свою чергу змінює умови протікання розряду.

Ерозія легуючого електрода і перенесення матеріалу анода на поверхню катода (деталі) відбувається за рахунок асиметрії тепла в гарячій точці містків зв'язку, які утворюються в момент замикання електродів. Контактно-містковий перенесення речовини в основному визначається теплофізичними та термоелектричними ефектами. В даному випадку, енергія, яка проходить містками зв'язку струму, йде на розплавлення матеріалів і в міру подальшого проходження електродів між ними виникає розплавлений місток. Відрив містка відбувається в основі легуючого електрода, за рахунок того, що швидкість охолодження розплавленого металу на поверхні набагато вища.

ЕІЛ супроводжується такими явищами, як [7]:

- під час електричної ерозії анода та катода, спостерігається ефект полярності, а саме відбувається збільшення ерозії одного електрода над іншим;
- електрична ерозія металів залежить від хімічного складу матеріалів електродів, деталі, навколишнього середовища і т.д.;
- кількість матеріалу, що викидається з анода в момент іскрового електричного імпульсу, залежить від енергії та кількості імпульсів.

В електроіскровому легуванні при механічному, тепловому імпульсному впливі на матеріал катода можливе виникнення аномальної дифузії атомів анода.

В процесі ЕІЛ на ділянках оброблюваної поверхні при послідовних локальних впливах імпульсних розрядів формується змінений поверхневий шар, його утворення є фінальним етапом процесу електроіскрового легування. Досліджено, що кількісні та якісні характеристики поверхневого шару, що утворюється у процесі електроіскрового легування, залежать від таких факторів, як тривалість обробки, фізико-механічних характеристик матеріалу електроду та імпульсних розрядів та інші.

В результаті процесу ЕІЛ змінений поверхневий шар являє собою сукупність великої кількості лунок (сукупність гребенів і западин), які істотно впливають на параметри шорсткості поверхні [3]. Шорсткість утвореної поверхні визначається розмірами та геометрією двох груп нерівностей, які

отримані в результаті взаємного перетину лунок, і які утворилися внаслідок спотворення профілю лунки. Перша група більшою мірою визначатиметься розмірами лунок та коефіцієнтом взаємного перекриття лунок, тобто факторами, за допомогою яких визначаються параметри шорсткості. Друга група нерівностей повністю визначається випадковими факторами.

Відкритим питанням для дослідників є вплив матеріалу електрода на процес ЕІЛ. Одні дослідники в ході проведених ними експериментів вважають, що зміцнення матеріалу в іскровому розряді відбувається внаслідок теплової дії іскри [8]. Інші дослідники [3] підкреслюють, що зміцнення деталі або ріжучого інструменту відбувається за допомогою перенесення матеріалу анода на катод. Наступними авторами сформульовано висновки про те, що зміцнення пов'язане як з результатом перенесення речовини анода на катод, так і з результатом теплового впливу іскрового розряду [9].

Проаналізувавши дослідження авторів можна, сказати, що основними видами перенесення та взаємодії речовин електродів є [9]:

- зміцнення відбувається внаслідок осадження матеріалу анода поверхню катода. Великий ефект зміцнення, може бути забезпечений, якщо як анода буде використовуватися матеріал з найбільшою зносостійкістю, твердістю і т.д.;

- поверхневий шар, що отримується в процесі ЕІЛ, це результат взаємодії матеріалів анода і катода між собою та з подальшим утворенням твердих розчинів, оксидів, нітридів, хімічних сполук;

- процес відбувається за рахунок взаємодії матеріалів електродів та за рахунок імпульсних впливів високих температур та тиску, що призводять до появи нерівноважних структур, нових фаз, за певних умов обробки наноструктури чи аморфної структури.

Процес електроіскрового легування дозволяє наносити на поверхню деталей і металорізального інструменту одношарові захисні покриття, які складаються з чистого матеріалу анода або покриття, що є результатом взаємодії між собою матеріалів електродів і міжелектродного середовища. Так

само за допомогою ЕІЛ, можна наносити і багат шарові покриття, які дозволяють отримувати, нові поверхневі матеріали, а так само нанесення наступного шару дозволяє знизити значення шорсткості, покращити тепловідведення, підвищити жаростійкість і сприяє поліпшенню інших властивостей покриття.

1.3 Електродні матеріали для електроіскрового легування

Питанню електродних матеріалів для ЕІЛ присвячено достатня кількість робіт [10]. В процесі ЕІЛ як електроди можуть використовуватися будь-які електропровідні матеріали.

Аналіз літературних даних з електроіскрового легування вуглецевих, легуваних та швидкорізальних сталей показав, що автори використовують широкий спектр електродних матеріалів (ЕМ), в основному тугоплавких сполук (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Електродні матеріали, що використовуються при ЕІЛ металевих поверхонь [11]

Матеріал анода	Матеріал катода	Призначення
Al	Al, Cu, Ti, , VT20, сталі Ст. 3, 35, У10А, ХВГ	к., ж., з.
Cr	VT2, Cu, сталі 30, 45, 40Х, У10А, ХВГ	з., ж., р. і.
Fe	VT20, Мо, сталі Ст. 3, 45,	з., ж.
Co, Ni	VT20, сталі Ст. 3, 45,	з., ж.
Cu	Al, Cu, сталі Ст. 3, X18H10T	к., м. о., е. к.
Zr	VT20	ж., з., р. і.
Ag	Cu, Д16Т, 35ХН3Ф, VT6А	р. і., е. к.
Nb, Мо, Та, W	Сталі 30, 45, У10А, ХВГ, Al, VT20	з., к.

Продовження таблиці 1.1

Графіт	Сталі P18, 65Г, T15K6	р. і., ш. о.
FeCr	Сталі 35, 45, У8А, X12М, 40Х, 4ХВ2С	з., м. о., р. і., ш. о
TiC, TiB ₂	Сталі У8А, P18, P6M5, 65Г, Fe	з., с. г.
Бронзи БрБ2, БрАЖНЦ-9	Чавун, сталі 45, P18, X12Ф1, 2Х13	з.
BK2	Сталі 45, P6M5, 5ХНТ	з., ш. о.
BK3	Сталі 45, У7, 65Г, P18, P6M5, T15K6	з., с. о., ш. о., р. і.
BK6, BK6M	Сталі Ст. 2, 45, У7, P6M5	с. о., р. і.
BK8	BT20, сталі 45, У7, 9ХС, У8, 40Х, 4ХГС, 1Х18Н9Т, P6M3, P6M5, X12М,	с. о., м. о., р. і.
BK15	Сталі У8, P6M5	р. і., ш. о.
T5K10	Сталі 45, P6M5, P6M3	р. і., с. о.
T14K8	Сталь 2Х13	з.
T15K6	Сталі 45, У7, У8, P6M5, P18, 9ХС, ХВГ, 1Х18Н9Т, 65Г, чавун, ВЖЛ-2	з., р. і., м. о., с. о.
T30K4	Сталі 15, У8, 40Х, P18, P6M5, T15K6, BT20	р. і., с. о., м. о.
TiC-Ni-Mo-дтк	Сталі 45, X12Ф1	р. і., ш. о., з.
WC-Co-B	Сталь 45	р. і.
WC-Co-Ni ₃ Al WC-Co-Ni-Cr-B-Si	Сталь 45, X12Ф1, BT20, BT3-1	р. і, ш. о.
WC-Co-Al ₂ O ₃	Сталь 45, BT20, BT3-1	з., р. і.
WC-Co-ДТК	Сталь X12Ф1, BT20, BT3-1	р. і, ш. о.
WB, W ₂ B ₅	Сталь 45	з., с. о.
LaB ₆	Сталі У8, Ст. 3, Мо	р. і.
TiN, ZrN, HfN, AlN, Si ₃ N ₄	Сталі 45, Ст. 3, Мо	р. і.

Продовження таблиці 1.1

Примітка. Позначення: з. - підвищення зносостійкості, к. - підвищення корозійної стійкості, ж. - підвищення жаростійкості, р. і. - підвищення стійкості ріжучого інструменту, ш. о. - підвищення стійкості штампової оснастки, е. к. - підвищення працездатності електричних контактів, м. о. - підвищення стійкості металургійного обладнання, с. о. - підвищення стійкості сільськогосподарського обладнання.

В якості легуючого матеріалу електродів (анодів) знаходять застосування легкоплавкі метали, перехідні метали IV–VI груп, їх сплави та сполуки, а також стандартні тверді сплави. Загальна класифікація електродних матеріалів, що застосовуються для ЕІЛ, подана у роботах [10, 12].

Глибина і твердість зміцненого шару залежать від режиму зміцнення (енергетичних параметрів устаткування). Зносостійкість і міцність від утоми деталей машин, зміцнюваних електроіскровим легуванням значною мірою залежать від режимів зміцнення і матеріалу зміцнюваного електрода.

Дослідження, проведені багатьма авторами дозволили дізнатися, як різні електроди впливають на одержувану якість покриттів (шорсткість, величину залишкових напружень, жаростійкість, зносостійкість і т.д.). Так, наприклад автори [13-15] у своїх роботах використовували як електроди матеріали з нержавіючої сталі та вольфрамівмісні сплави та досліджували їх експлуатаційні властивості, зносостійкість та жаростійкість. В ході досліджень, автори з'ясували, що при електроіскровому легуванні титанових сплавів нержавіючою сталлю (11X15H25M6AГ2), алюмінієм, твердими сплавами (Т15К6, ВК6М) та сплавами W-Cr-Co, W-Fe-Ti, відбувається збільшення зносостійкості матеріалами без покриття. Велике збільшення жаростійкості матеріалів, що зміцнюються, до трьох разів спостерігається при використанні алюмінію в якості електродного матеріалу, за рахунок того, що в поверхневому шарі утворюються інтерметаліди TiAl. Так само при використанні в якості анода сталі і сплаву W-Cr-Co підвищується товщина шару, що формується в 1,5

- 3,6 рази більше, ніж з електродними матеріалами з твердого сплаву. У роботі [14] автори провели дослідження процесу ЕІЛ, наносячи на поверхню титанового сплаву VT18 захисне покриття. Як електроди (анооди) використовували Al, TiAl, Ni₃Al. Вибір електродів пов'язаний з їхньою здатністю підвищувати термічну стабільність сплавів титану та жаростійкість.

В одній з робіт [16] як матеріал електрода був взятий твердий сплав ВК6М, призначений для свердління, зенкерування, розгортання, фрезерування сталі, чавуну, деяких важкооброблюваних матеріалів, зміцненню піддавалися фрези і свердла зі швидкорізальної сталі Р18Ф2. Описано процес зносу фрези з нанесеним покриттям. Також у роботі було розглянуто двошарові покриття, які наносилися на токарний різець. Як матеріал електродів твердий сплав ТК і мідь. Твердий сплав дозволяє збільшити руйнування робочого шару, а другий шар із міді дозволяє відвести тепло. Зміцнення проводили по передній задній поверхні вздовж ріжучої кромки. У ході проведеного дослідження їм вдалося отримати збільшення стійкості інструментів у кілька разів: свердла та фрези до 1,6; різця до 1,7. Зносостійкість фрез залежала від електродного матеріалу, мінімальної мали фрези з покриттям із сплаву Т15К6, фрези з нанесеним покриттям із сплаву ВК6М мали велику стійкість.

Автори робіт [17, 18] наводять дані щодо застосування процесу електроіскрового легування для зміцнення ріжучого інструменту. У цьому роботі електродами служили: ЕГ-2, ЕГ-4 (графіти); твердий сплав ВК3, ВК8, Т15К6; білий чавун і ферохром. Дослідники після проведених експериментів з'ясували, що стійкість інструменту при електроіскровому легуванні збільшується у 6-8 разів, а покриття з твердих сплавів ВК3 та ВК8 підвищують стійкість у 4-6 разів.

Автор роботи [8] дає рекомендації щодо зміцнення ріжучого інструменту. Електроіскрове легування задніх поверхонь проводиться, у разі коли остаточний фактор стійкості інструменту визначається зносом поверхні (у разі обробки сталі з невеликим вмістом вуглецю). Зміцнення передньої поверхні проводиться у тому випадку, коли проводиться обробка інструментом

високоміцних матеріалів та сталей з великим вмістом вуглецю. Електроіскрове легування по передній та задній поверхнях проводиться, коли інструмент обробляє зносостійкі матеріали та глибокі отвори.

Ріжучі інструменти (різці, свердла), що застосовуються в токарних автоматах, де обробляються гвинти, гайки, кільця ущільнювачів, зміцнення для різців електроіскровим легуванням проводили по задній і передній поверхнях, для свердлів зміцнення проводилося так само по передній і задній поверхнях, а так само передньої поверхні гвинтової канавки довжиною 5 мм.

Досліджуючи стійкість токарних круглих різців, за умов була прийнята ширина стрічки зносу по задній поверхні. Як анод узяли твердий сплав Н10. У результаті дослідження було встановлено, що стійкість різців підвищилася на 100-300%.

Економічні розрахунки показали, що використовувати електроіскрове легування вигідно, якщо підвищення стійкості інструменту не менше 200%.

Одним із провідних напрямів у технології ЕІЛ є розробка нових ЕМ з низькою собівартістю, що мають крім хороших фізико-хімічних властивостей певні фазові та хімічні склади, що відповідають складу та структурі зміцнюваного матеріалу. При цьому дефіцит електродних матеріалів з твердих сплавів, їх висока вартість та низька продуктивність процесу ЕІЛ визначають необхідність пошуку нових електродних матеріалів та технологій виконання ЕІЛ.

Отже, у літературі представлена широка класифікація електродних матеріалів, що застосовуються для ЕІЛ. В даний час на практиці в якості легуючого електрода використовують переважно тверді сплави на основі карбідів вольфраму і титану, проте вони не завжди відповідають вимогам, що ставляться до поверхонь та електродних матеріалів (ЕМ) для ЕІЛ, оскільки мають високу вартість та є ерозійно стійкими. Крім того, покриття з твердих сплавів підвищують твердість і зносостійкість, проте вони не забезпечують стійкість до корозії, жаростійкість, особливі триботехнічні властивості та ін.

Окремо необхідно зазначити екологічні та економічні питання отримання електродів – існуючі методи, що використовуються на металургійних і хімічних підприємствах, у більшості випадків є екологічно небезпечними.

Така невиправдано обмежена кількість наведених в літературі матеріалів також не дозволяє в повній мірі розкрити можливості даного прогресивного методу.

У цьому аспекті заслуговують на увагу технології отримання покриттів методом ЕІЛ, такі як цементація, сульфидування, борування, металізація та їх комбінації. Як ЕМ застосовують відносно дешеві матеріали, технології їх отримання.

Багато дослідників, проводячи свої експерименти зі зміцнення різальних інструментів і деталей машин, наносять покриття як по передній, так і по задній поверхнях, так і на внутрішні та зовнішні поверхні інструментів та деталей машин. Проф. Тарельником В. Б. і проф. Гапоною О.П. запропоновані нові методи модифікації поверхні методом ЕІЛ із можливістю перенесення на оброблювану поверхню струмонепровідних матеріалів. Ними отримані патенти [19-21], які підтверджують можливість такої обробки і доводять ефективність методу.

1.4 Перспективні напрямки розвитку технології електроіскрового легування

Вивчення останніх досягнень в галузі електроіскрового легування (ЕІЛ) деталей машин показує, що нові технології електроіскрової обробки умовно можна розділити на чотири групи [22]:

- ЕІЛ компактними електродами-інструментами;
- ЕІЛ в гетерогенних середовищах;
- ЕІЛ електродами з обмазуванням;
- ЕІЛ електродами, виготовленими з матеріалів із гетерофазною структурою.

Компактні електроди виготовляються як монолітних литих сплавів у вигляді стрижнів, до складу яких входять твердосплавні матеріали, зазвичай кобальт і титан. Загальними вимогами до таких електродних матеріалів під час процесу ЕІЛ є [23]:

- ерозія легуючого матеріалу, тобто анода, переважно у рідкій та паровій фазах, а матеріалу катода – переважно у рідкій фазі;
- температури плавлення та випаровування матеріалу анода не повинні перевищувати відповідних температур матеріалу катода більш ніж у 23 рази; бажано, щоб теплопровідність матеріалу анода перевищувала теплопровідність матеріалу катода;
- електродний матеріал повинен бути досить міцним при згинанні та розриві;
- необхідна наявність максимально допустимої електроерозійної здатності для найбільшого перенесення матеріалу на зміцнену поверхню;
- гарна електропровідність;
- електродний матеріал повинен містити у своєму складі компоненти, необхідні для отримання зміцненого шару із заданими фізико-хімічними та механічними властивостями.

Тверді сплави марок ВК і ТК, що широко застосовуються в даний час як електродні матеріали, мають високу ерозійну стійкість, низький коефіцієнт перенесення і високу вартість через наявність вольфраму і кобальту. Тому такі тверді сплави не завжди задовольняють вимогам до електродних матеріалів.

Спосіб ЕІЛ в гетерогенних середовищах [24] полягає в тому, що матеріал, що знаходиться в дрібнодисперсному стані в газі, потрапляє в проміжок між електродом (анодом) і деталлю (катодом). У проміжку збуджуються високовольтні розряди з частотою близько 2000 Гц, внаслідок чого порошок плавиться і осаджується на оброблюваній поверхні, утворюючи покриття із заданими властивостями. Перевага способу - отримання покриття з рівномірною структурою поверхні. Однак спосіб складний як у технологічному, так і в апаратному оформленні. У зв'язку з обмеженою номенклатурою

порошків, що випускаються для ЕІЛ, виникають складності отримання порошку відповідного складу і дисперсності. Крім того, отримання суспензії порошку в газі, також непросте завдання, що вимагає наявності спеціальної апаратури та технології.

Незважаючи на значну кількість переваг схеми процесу ЕІЛ порошковими матеріалами порівняно зі схемою використання компактних електродів, є такі недоліки, що стримують її застосування в промисловості [25]:

- утворена парова фаза з розплавленого металу (порошку) взаємодіє як із поверхнею катода, і з поверхнею анода;
- нерівномірне конденсація парової фази металу на поверхні електрода-анода змінює величину міжелектродного проміжку, при значному зменшенні якого відбувається припинення процесу ЕІЛ;
- витрати енергії на формування покриття на катоді значні.

Одним із напрямків розвитку технології електроіскрової обробки пропонується шляхом використання електродів з обмазками, виготовленими, в тому числі, з використанням технології сухого ізостатичного пресування (СІП) і високотемпературного синтезу (СВС). Застосування обмазок електродів є перспективним напрямком розвитку способу електроіскрової обробки, так як дозволяє не тільки змінювати хімічний склад шару, що наплавляється, і захищати наплавлювану поверхню від впливу навколишнього середовища, але і регулювати його температуру з допомогою зниження чи підвищення теплопровідності обмазки. Це може призвести до поліпшення якості поверхні деталі, що обробляється, і збільшувати товщину покриття. До того ж якщо підібрати склад обмазки таким чином, що при електроіскровій обробці виділятиметься достатня кількість CO_2 , то очікується збільшення шару покриття в кілька разів [26]. Але цей спосіб ЕІЛ також має недоліки. Є необхідність у спеціальному синтезі матеріалів обмазок, розроблення технології отримання таких електродів, застосування дорогого обладнання тощо.

У роботі [27] проведено дослідження способів отримання покриттів за допомогою ЕІЛ електродами із силіцидів молібдену та вольфраму та їх

використання для різних практичних застосувань. Такі покриття є виключно зносостійкими за високих температур, у тому числі і в окислювальних середовищах.

Автором [28] були досліджені нові електродні матеріали для електроіскрової обробки. Матеріали одержують за допомогою високорозповсюдженого високотемпературного синтезу (СВС) і модифікують їх нанокристалічними добавками. Дослідження показали, що введення нанокристалічних добавок в електродний матеріал знижує швидкість зношування зразків з 80 мкм/с до 48 мкм/с, причому збільшення зносостійкості електроіскрових покриттів спостерігається як на титанобороалюмінієвих, так і титанохромових карбідних покриттях. Це пояснюється збільшенням мікротвердості.

Електроди, виготовлені з матеріалів з гетерофазною структурою, містять мікродисперсні частинки і нанонитки, вкраплені в матрицю, можуть значно змінити властивості покриття. Це пояснюється тим, що ниткоподібні монокристали і полікристали, особливо нанометрової розмірності, мають винятково високу міцність і твердість. Зменшення розміру зерен металів із 10 мкм до 10 нм дає підвищення міцності у 30 разів [29]. При цьому виявлено ще одну унікальну властивість наноструктур: зі збільшенням міцності одночасно зростає пластичність.

Перспективним напрямом використання наноматеріалів є можливість їх добавок у невеликих кількостях до звичайних сплавів для виготовлення електродів-анодів [30]. Встановлено, що додавання лише 0,5% частинок з нанометровою розмірністю в матеріал анода значно змінює властивості виробу, збільшуючи ударну в'язкість сплаву в 1,5 рази.

Розглядаючи зазначені вище способи, можна зробити висновок, що технологія їх використання дуже специфічна, і призначена для певного кола деталей, що виготовляються з тугоплавких сплавів (сталь, чавун, титан та ін.).

Аналіз зазначених вище нових технологій дозволяє виявити певну тенденцію розвитку електроіскрової обробки. Більшість нових технологій

орієнтовані на застосування або порошкових матеріалів з дрібнодисперсними частинками або сплавів у вигляді композиційних матеріалів, що містять основну матрицю і різні включення в ній частинок нанометрового розміру. Це відповідає загальному напрямку розвитку металообробних технологій у світі.

По відношенню до електродів для електроіскрової обробки напрямок розвитку виглядає наступним чином: застосування суцільних електродів, трубчастих електродів, складових електродів із дротів, порошкових електродів, електродів з матеріалів на молекулярному та атомарному рівні (рідких, пилоподібних, у тому числі композиційних – з вкрапленнями наночастинок у матриці).

1.5 Висновок

1. Проведений літературний огляд показав, що нанесення захисних покриттів, як на різальний інструмент, так і на деталі машин, методом електроіскрового легування, є одним з найдієвіших й економічно виправданих методів для продовження терміну служби деталей машин.

2. Багато дослідників говорять про те, що в процесі ЕІЛ протікають складні фізико-хімічні процеси, які зрештою призводять до перенесення матеріалу електрода (анода) на катод і структура залежить від режимів легування та вихідних матеріалів.

3. Перенесення матеріалу анода на катод забезпечує формування на катоді поверхневого шару із заданими експлуатаційними характеристиками та фізико-хімічними властивостями. Залежно від призначення покриття та виду обробки як легуючий електрод застосовуються різні матеріали. Доцільно використовувати електроди, отримані методом СВС-екструзії.

4. Покриття, яке наноситься методом електроіскрового легування, міцно з'єднується з матеріалом основи за рахунок дифузії.

5. Дослідження, проведені багатьма авторами, показують що шорсткість нанесеного покриття, методом електроіскрового легування виходить вище, ніж це прийнято у робочих поверхнях ріжучого інструменту,

що може негативно позначитися, як на шорсткість оброблюваної деталі, так і на коефіцієнт тертя при обробці різанням.

6. Зносостійкі покриття істотно впливають на параметри якості формованого поверхневого шару, оброблюваних деталей, знижуючи показник шорсткості, залишкові напруги. Однак досліджень з вивчення впливу захисних покриттів на різальний інструмент у процесі різання дуже мало.

1.6 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 сталь 40Х, яка широко застосовується для виготовлення валів, осей, плунжерів, вал-шестірень, штоків, шпинделів, та інших виробів. Для підвищення механічних властивостей сталі 40Х використовують об'ємну термічну обробку, або поєднання об'ємної і поверхневої обробки. Застосування поверхневої обробки значно ускладнює та збільшує тривалість технологічного процесу виготовлення деталей.

Зразки для проведення досліджень використовували у відпаленому стані. Хімічний склад сталі наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Хімічний склад (%) сталі 40Х [31]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.36 - 0.44	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	до 0.3	до 0.035	до 0.035	0.8 - 1.1	до 0.3

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	Напругення, 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

Методика підготовки та обробки зразків на установці включає наступні операції:

1. Знежирити оброблену поверхню деталі (зразка) бензином або спиртовмісною рідиною.
2. Встановити оброблювані деталі (зразки).
3. Закріплення сплавних електродів на тримачі вібратора.
4. Увімкнення генератору імпульсів і перевірка працездатності вібратора короткочасним дотиком до обробленої деталі (зразка).
5. Вибір частоти імпульсів вібратора.
6. Вибір і подача імпульсної напруги та ємності батареї конденсаторів на генератор імпульсів.
7. ЕІЛ поверхні в призначеному режимі.

Для дослідження використовували зразки розміром 15x15x8 мм, на які наносили спеціальну пасту (сірчана мазь з додаванням колодної сірки). Потім здійснювали ЕІЛ електродом інструментом з молібдену при енергії розряду $W_p = 0,13 - 3,4$ Дж і продуктивності 0,8 - 2,5 см²/хв. на установці моделі «Елітрон-22А». Як електрод-інструмент застосовують стрижень з молібдену діаметром 4 мм і довжиною 45 мм.

2.3 Металографічний аналіз

У машинобудуванні широко застосовується металографічний метод дослідження [32]. 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 [32], 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 [33].

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 можна отримати за допомогою полірованої поверхні зразка. Такі зразки попередньо обробляють абразивами для зняття поверхневого шару та отримання шліфованого зрізу. Наступним кроком є механічне або електролітичне полірування зразка. Такі зразки були додатково оптично досліджені за допомогою методів світлової мікроскопії при приблизно 1000-кратному збільшенні.

Такі дослідження є найважливішими при виборі матеріалів, оскільки саме структура металів та сплавів визначає та обумовлює властивості матеріалів [33].

2.4 Електронно-мікроскопічні дослідження

Електронна мікроскопія, сукупність електронно-зондових методів дослідження мікроструктури твердих тіл, їх локального складу та мікрополів (електричних, магнітних та ін.) за допомогою електронної мікроскопії (ЕМ), приладу, що використовує електронний промінь для отримання збільшених зображень [33]. Електронна мікроскопія включає також методи підготовки об'єктів до дослідження, обробки та аналізу отриманої інформації. Електронна мікроскопія має два основних напрямки: просвічувальна і сканувальна, які базуються на використанні відповідних типів ЕМ. Вони дають якісно різну інформацію про об'єкт дослідження і часто використовуються разом. Відомі також відбивна, емісійна, оже-електронна, лоренц-мікроскопія та інші види електронної мікроскопії, які, як правило, реалізуються за допомогою приладдя для пропускання та ґраткової ЕМ. В даний час розрізняють електронну

мікроскопію (ТЕМ) і скануючу електронну мікроскопію (СЕМ), які працюють при освітленні.

Растровий електронний мікроскоп (РЕМ, англ. Scanning Electron Microscope, SEM) — прилад, заснований на принципі взаємодії електронного пучка з речовиною, призначений для отримання зображень поверхні об'єктів з високою просторовою роздільною здатністю (декілька нанометрів) і складом ближніх поверхневих шарів, структури та деяких інших характеристик. SEM працює шляхом сканування поверхні зразка сфокусованим пучком електронів і аналізу частинок, відбитих від поверхні, і рентгенівського випромінювання, створеного взаємодією електронів із речовиною. Аналіз частинок може отримати інформацію про морфологію поверхні, різницю фаз і кристалічну структуру приповерхневих шарів. Аналіз рентгенівського випромінювання, що виникає під час взаємодії електронного пучка зі зразком, дає змогу якісно та кількісно охарактеризувати хімічний склад приповерхневого шару [34].

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).

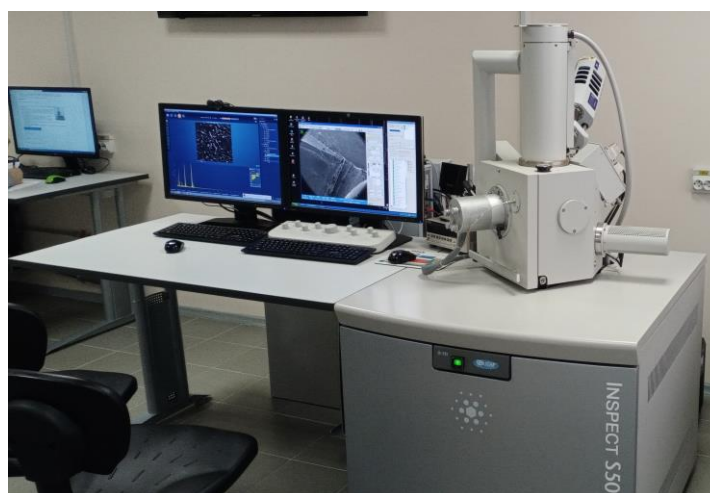


Рисунок 2.4 – Фото SEO-SEM Inspect S50-B



Рисунок 2.5 – Зразки для металографічних досліджень

2.5 Дослідження мікротвердості

Методи визначення твердості (HB, HRC, HRA) 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 [35].

Вимірювання мікротвердості відбувається використовуючи твердомір ПМТ-3.

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.

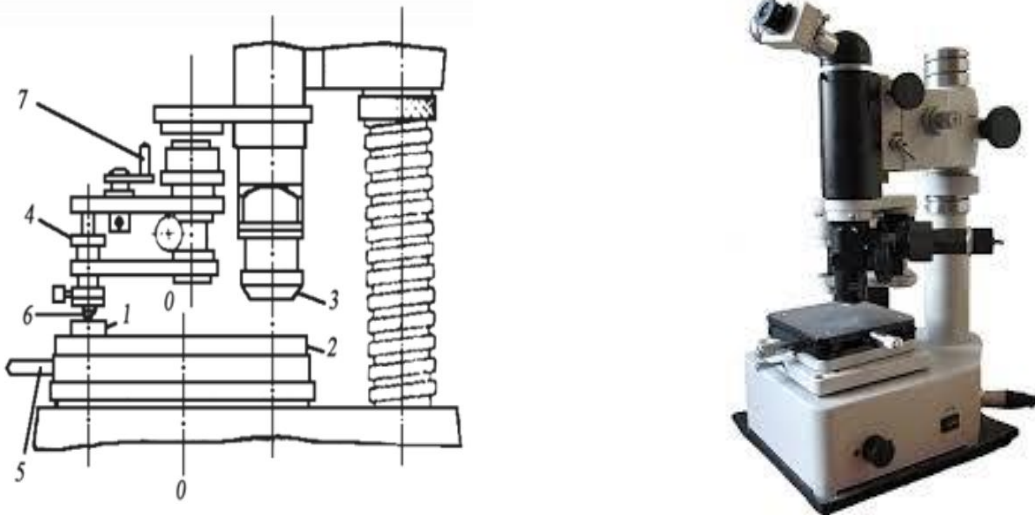


Рисунок 2.4 – Твердомір ПМТ-3: а – схема: 1 – зразок (шліф); 2 – предметний столик; 3 – об’єктив; 4 – вага; 5 – рукоятка предметного столика; 6 – алмазна піраміда; 7 – рукоятка аретира; б – фото

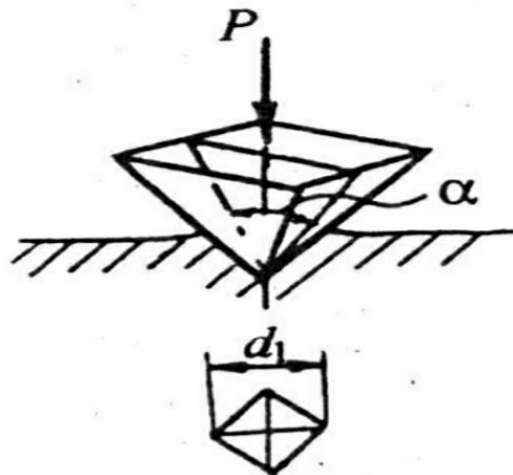


Рисунок 2.5 – Схема вимірювання мікротвердості за методом Віккерса [39]: P - навантаження на піраміду, Н; d_1 - діагональ відбитка; α - кут між протилежними гранями піраміди

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.

При випробуванні на твердість за методом Віккерса в поверхню матеріалу вдавлюється алмазна чотиригранна піраміда. Вона має кут при вершині $= 136^\circ$ (рис. 2.5). 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 Трибологічні дослідження

Вихідними параметрами процесу тертя є знос фрикційних елементів, величина моменту тертя, температура, шлях і час фрикційного контакту. Сучасні дослідники також оцінюють такі характеристики процесу тертя, як частка металевих контактів, тривалість окремих контактів, акустичне випромінювання тощо [36].

Машина тертя складається з приводів для переміщення контактних зразків, пристроїв для встановлення цих зразків, вантажів для фрикційної системи тертя, пристроїв контролю вихідних параметрів і багатьох додаткових

пристроїв (для подачі мастила на фрикційні контакти, підігріву фрикційної системи (або охолодження) тощо.

Трибологічні властивості формованого поверхневого шару визначали на тестері Т-01М виробництва Радомського політехнічного інституту (Польща) відповідно до трибологічного стандарту DIN-50324:1992-07 «Випробування на тертя та зношування твердих тіл тертя ковзання». Схема випробовування «кулька – диск» (рисунок 2.6). Зразки, випробувані на тестері мали розмір $\varnothing 25 \times 6$ мм.

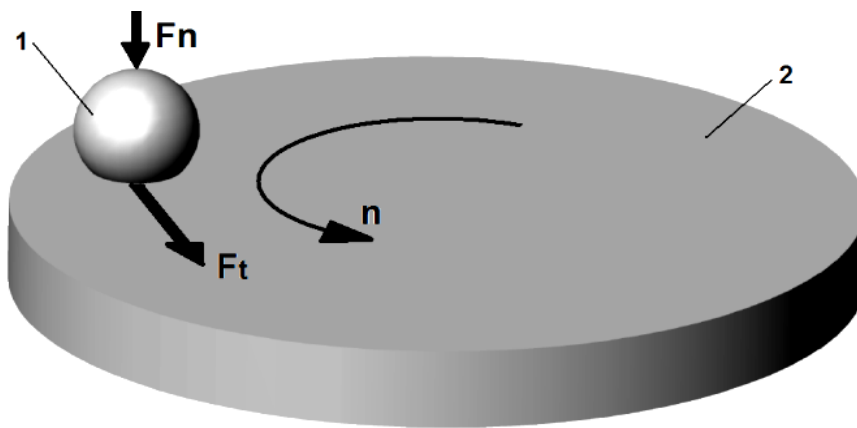


Рисунок 2.6 – Схема випробовування на трибо-тестері Т-01 М: 1 – кулька; 2 – диск [37]

2.7 Висновки

У розділі була розглянута методика та матеріали для дослідження. У якості об'єкта експериментальних досліджень прийнята конструкційна легована сталь 40Х, яка застосовується для виготовлення валів, осей, плунжерів, вал-шестірень, штоків, шпинделів та інших виробів. Представлений аналіз впливу легувальних елементів на властивості сталі. Основними легувальними елементами є вуглець і хром.

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

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Основні фізичні процеси при електроіскровій обробці

Зношення деталей контактних з'єднань, особливо зношення антифрикційних частин, є причиною розбалансування агрегату внаслідок зміни розмірів зношених частин, що призводить до нестабільності обладнання, втрати продуктивності та погіршення якості продукції [38, 39]. Авторами [40, 41] показано, що кількість і тривалість взаємних ремонтних робіт на 70 % залежить від фрикційного з'єднання. Зменшення тертя і зношування металевих поверхонь є основним вузлом взаємодії машин і механізмів, актуальною проблемою, вирішення якої вимагає сучасної науки і техніки.

Дисульфід молібдену MoS_2 є відомим твердим мастильним матеріалом з хімічною та термічною стабільністю до $600\text{ }^\circ\text{C}$, що забезпечує його постійну присутність у композиційних матеріалах під час виготовлення та експлуатації матеріалу [42, 43]. Дисульфід молібдену є ефективним мастильним матеріалом, особливо для деталей, що піддаються легким або помірним умовам експлуатації [44].

Як ми знаємо, щоб підвищити зносостійкість деталей машин, необхідні масла та мастила, що містять присадки, що знижують тертя. Одним із матеріалів, що використовуються для зменшення тертя, є дисульфід молібдену (MoS_2). Гексагональний кристал MoS_2 має шарувату структуру. Дисульфід молібдену має твердість за Моосом 1,0-1,5. Він також має високу хімічну стійкість і стійкість до більшості кислот і радіоактивного випромінювання. У вакуумі MoS_2 розкладається на молібден і сірку при $1100\text{ }^\circ\text{C}$.

Мастильні властивості дисульфиду молібдену пояснюються його кристалічною структурою. Ван-дер-Ваальсові зв'язки між шарами сірки дозволяють шарам сірки вільно рухатися, таким чином зменшуючи тертя. З іншого боку, іонний зв'язок між Mo і S надає шару високу міцність, здатну

витримувати тиск мікровиступів на поверхню тертя. Покриття товщиною 2,5 мікрона містить 4000 шарів (S-Mo-S). Шар сірки, що утворює поверхню кристалів дисульфиду молібдену, має міцну адгезію до металевих поверхонь [45].

В даний час порошок природного MoS_2 з мікронним шаром широко використовується як тверде мастило й ефективна присадка до масел і мастил для поліпшення їх фрикційних властивостей. Досягнення в галузі нанотехнологій призвели до розвитку досліджень процесів і механізмів зношування за участю нанокристалічних сполук, а також до порівняння між традиційними концепціями змащення та «наномасильними матеріалами» [46]. Відомо, що використання наночастинок трисульфиду молібдену (Mo_3O) як твердої присадки до мастил може покращити трибологічні властивості мастил [47].

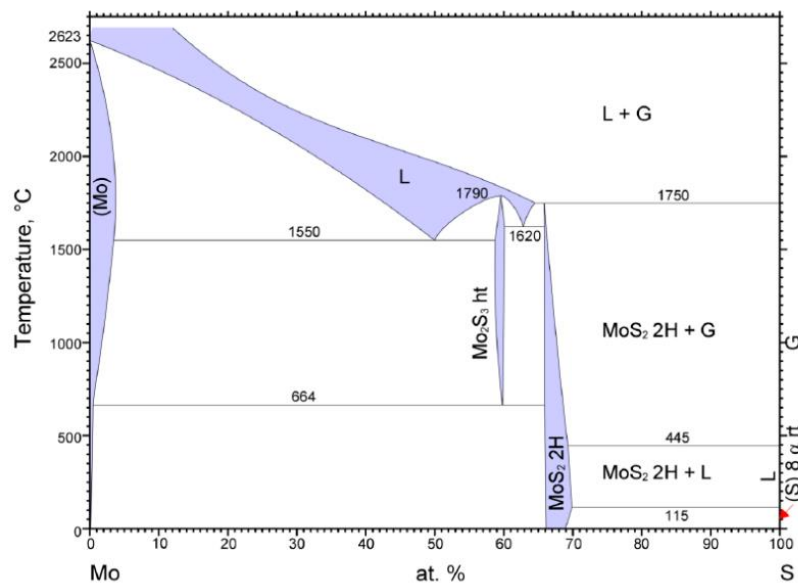


Рисунок 3.1 – Фазова діаграма системи Mo-S [48]

Взаємодія молібдену Mo і сірки S є предметом досліджень протягом багатьох років. На рис. 3.1 показана фазова діаграма системи Mo-S при атмосферному тиску, G є газом, а L є розчином [48], а в Mo-S утворюються два стабільних сульфідів молібдену Mo_2S_3 і MoS_2 , які можна отримати безпосередньо з елементів. Фаза Mo_2S_3 нестабільна при температурах нижче

610 °C. При 1000 °C у фазі MoS₂ розчиняється до 69% (ат. % S). Температура плавлення MoS₂ вище 1800 °C. Розчинність S в Mo досягає 1,5% (ат.%) при 1100 °C.

Відомі методи сульфоціанування для електроосаджених Fe-Mo покриттів [49]. Автори експериментально встановили найбільш раціональне середовище сульфоціанування. Це пастоподібне покриття, що складається з 35-40% жовтих кров'яних солей, 15-20% сульфату колхіцину, 5-8% вогнетривкої глини і 25-30% сажі, з крохмальним клейстером в якості зв'язуючого. Сульфоціанування проводиться при температурі 550-6000°C, в результаті чого утворюється зносостійке покриття з поверхневими карбонітридними зонами, насиченими сульфідом заліза і дисульфідом молібдену. Однак ця технологія є шкідливою для навколишнього середовища.

В роботі [50] в результаті досліджень розроблено нову методику формування пакетів гнучких елементів муфт. Введенням додатково дисульфиду молібдену до складу металопластикового мастила, що складається з парафіну і мідного порошку, вдалося підвищити опір фреттингу гнучкого елемента в 2,5 і 1,1 рази порівняно з гнучким елементом без мастила і з металопластиковим мастилом, що не містить дисульфиду молібдену.

В роботі [51] представлено один із способів підвищення рівня експлуатаційної надійності паливної апаратури дизелів, а саме плунжерної пари паливного насоса. Автори пропонують технологічний підхід до відновлення працездатності деталей шляхом нанесення антифрикційного покриття, що містить дисульфід молібдену, методом вакуумно-плазмового напилення. Застосування цієї технології покращує експлуатаційні характеристики та збільшує термін служби плунжерної пари.

Метод хіміко-термічної обробки (ХТО) також відомий як метод отримання сульфомолібденових покриттів на сталевих поверхнях шляхом послідовного або одночасного насичення їх Mo і S [52]. Незважаючи на те, що ХТО значно покращує якість поверхневого шару механічних деталей, метод має низку недоліків. До них належать: об'ємний нагрів деталі, що призводить

до зміни (деформації, викривлення); громіздке та дороге технічне обладнання; тривалий час обробки; висока енергоємність; висока вартість; екологічна та людська небезпека.

Метод електроіскрового легування (ЕІЛ) добре відомий і все частіше використовується в промисловості для підвищення зносостійкості і твердості поверхонь, таких як деталі машин, що працюють при високих температурах і в жорстких умовах експлуатації [15].

Метод ЕІЛ відкриває нові можливості для нанесення трибологічних покриттів. В роботі [9] описано метод нанесення зносостійкого антифрикційного покриття на оброблені поверхні поршневих кілець. Цей метод передбачає формування молібденового покриття товщиною 30 мкм, мікротвердістю 6400 МПа і шорсткістю Rz 1,5-1,1 мкм. Легована поверхня вручну полірується наждачним папером, покривається міддю і піддається процесу поверхневого пластичного деформування, після чого наноситься мастило, що містить дисульфід молібдену і графіт для поліпшення зносостійкості вузла тертя. Однак ця технологія має серйозні недоліки, такі як збільшення кількості технічних операцій, наявність мастильних матеріалів на поверхні і ризик забруднення робочого середовища компонентами, що вкрай небажано в вузлах тертя, наприклад, в текстильному обладнанні та обладнанні харчової промисловості.

Відоме сульфитування шляхом ЕІЛ графітовими електродами на сталевій поверхні виробу [53], де сірковмісна сполука наноситься на поверхню сталі безпосередньо перед легуванням графітовими електродами. Основними недоліками цього методу є неможливість утворення дисульфиду молібдену на поверхні деталі, знижена можливість зменшення коефіцієнта тертя, а також те, що зносостійкість і зношуваність пари тертя недостатньо високі, особливо при відсутності змащування.

Тому актуальним є підвищення якості поверхневого шару сталевих деталей, що працюють в парах тертя, шляхом розробки способу формування

зносостійких антифрикційних покриттів, що містять на поверхні дисульфід молібдену, за допомогою електроіскрового легування.

3.2 Дослідження модифікованих сталених поверхонь після ЕІЛ

Нами запропонований спосіб сульфомолібденування металевих поверхонь, що полягає в нанесенні консистентної речовини, що містить сірку, і електроіскрове легування молібденовим електродом при енергіях розряду 0,13; 0,55; 3,4 Дж (табл. 3.1). В якості підкладки використовували сталь 40Х.

Таблиця 3.1

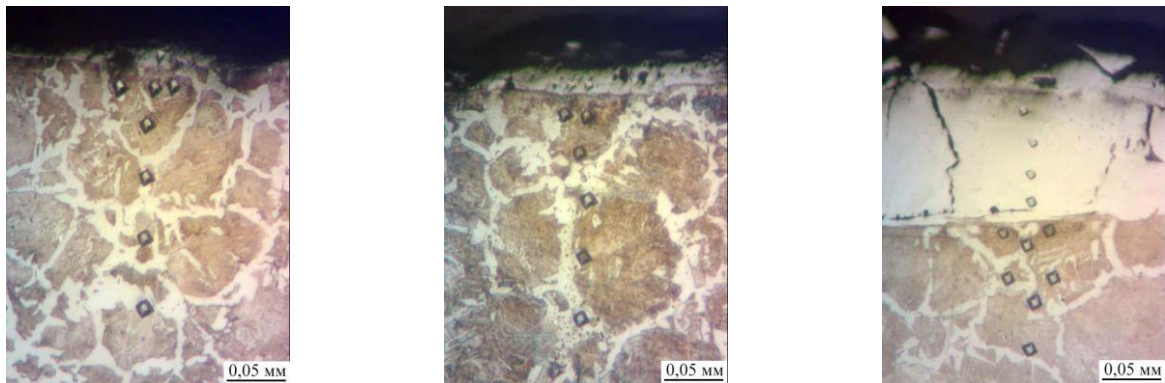
Якісні параметри сульфомолібденових покриттів, отриманих методом ЕІЛ

Енергія розряду, Дж	Шорсткість, мкм			Шар зниженої мікротвердості			Зміцнений шар		
	Ra	Rz	Rmax	H _μ , МПа	h, мкм	S, %	H _μ , МПа	h, мкм	S, %
0,13	0,8	2,3	6,5	1320	10	50	5474	25	75
0,55	2,0	3,5	14,7	1670	20	70	7832	40	90
3,4	5,7	14,9	38,7	2040	30	80	10731	70	95

S, % – суцільність шару

Для вивчення сульфомолібденових покриттів застосовували сканувальний електронний мікроскоп з системою мікроаналізу. Використовували зображення, отримане за допомогою BSE-детектора зворотно-розсіяних (відображених) електронів, і що містить добре помітні області з чіткими межами, що відрізняються за відтінком залежно від атомного номера хімічного елемента. У таких зображеннях світлі області – це ділянки, що містять більш важкі елементи (в нашому випадку молібден), від яких електрони пучка відображаються краще, ніж від більш легких. Аналіз ділянки поверхні, що містить покриття, і фрагмент основного металу з доевтектоїдною структурою, показав, що отриманий шар має неоднорідний склад з різною концентрацією елементів (рис. 3.3). Так, згідно з картами розподілу елементів

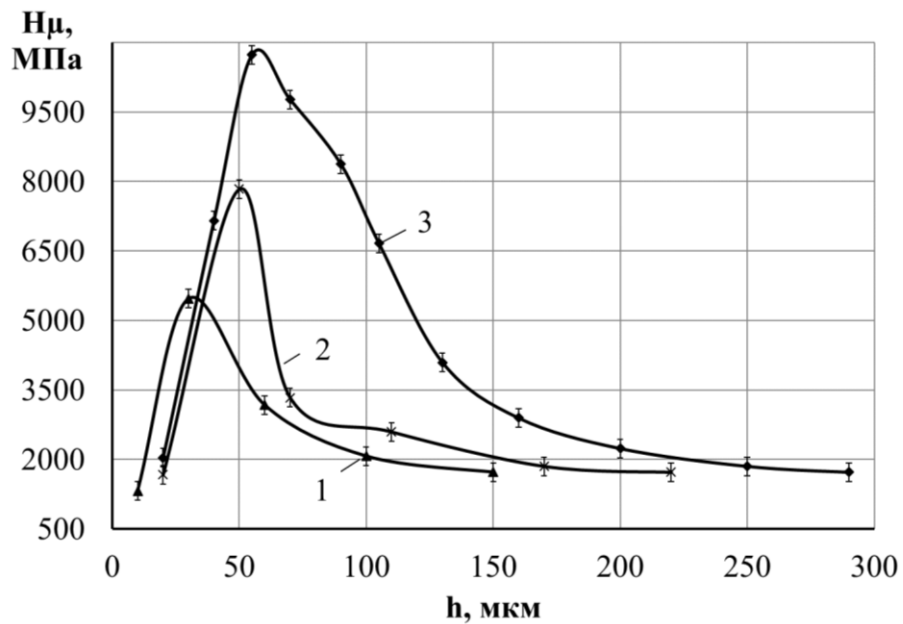
за площею досліджуваних зразків (рис. 3.4), на поверхні концентрується сірка, молибден розподіляється більш рівномірно в покритті.



а

б

в



г

Рисунок 3.2 – Мікроструктури (а-в) и розподіл мікротвердості (г) у поверхневому шарі після сульфомолибденування методом ЕІЛ:

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж;

г – на графіку 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,55$ Дж, 3 – $W_p = 3,4$ Дж

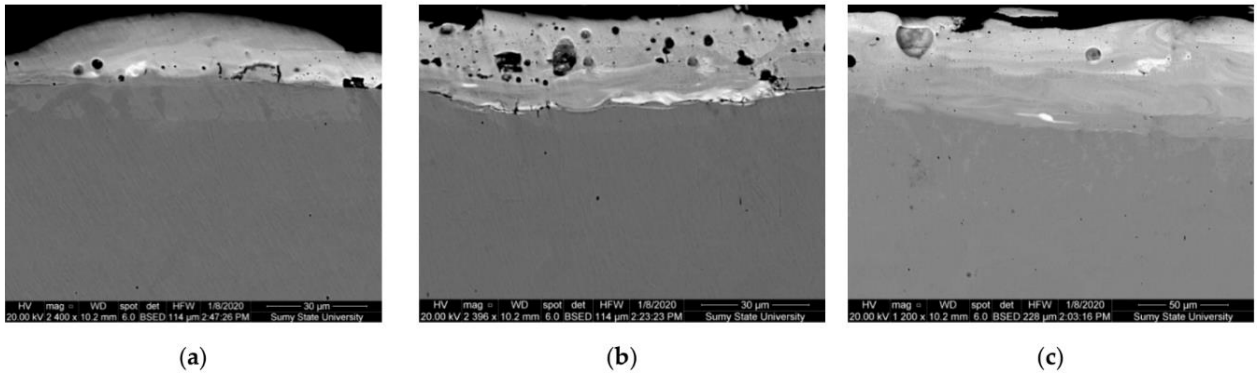


Рисунок 3.3 – Результати електронно-мікроскопічних досліджень сульфомолібденових покриттів, отриманих методом ЕІЛ:

a – $W_p = 0,13$ Дж; b – $W_p = 0,55$ Дж; c – $W_p = 3,4$ Дж;

В результаті локального енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізу отримані криві розподілу сірки, молібдену і заліза (рис. 3.5). Показано, що сірка та молібден концентруються на глибині до 4 і 19 мкм, відповідно, при $W_p = 0,13$ Дж, до 5 і 25 мкм при $W_p = 0,55$ Дж, до 15 і 70 мкм при $W_p = 3,4$ Дж, відповідно. Рентгеноструктурний аналіз отриманих покриттів підтверджує результати енергодисперсійного аналізу (рис. 3.6). Так, при невисоких енергіях розряду фазовий склад покриттів на сталі 40 представлений твердим розчином ОЦК, за періодом ґратки близьким до фериту, мартенсит, ГЦК твердий розчин і інтерметалід FeMo (σ -фаза). Очевидно, у зв'язку з легуванням ОЦК-твердого розчину (фериту) сіркою і молібденом, не рівноважними умовами охолодження збільшується параметр a (табл. 3.2).

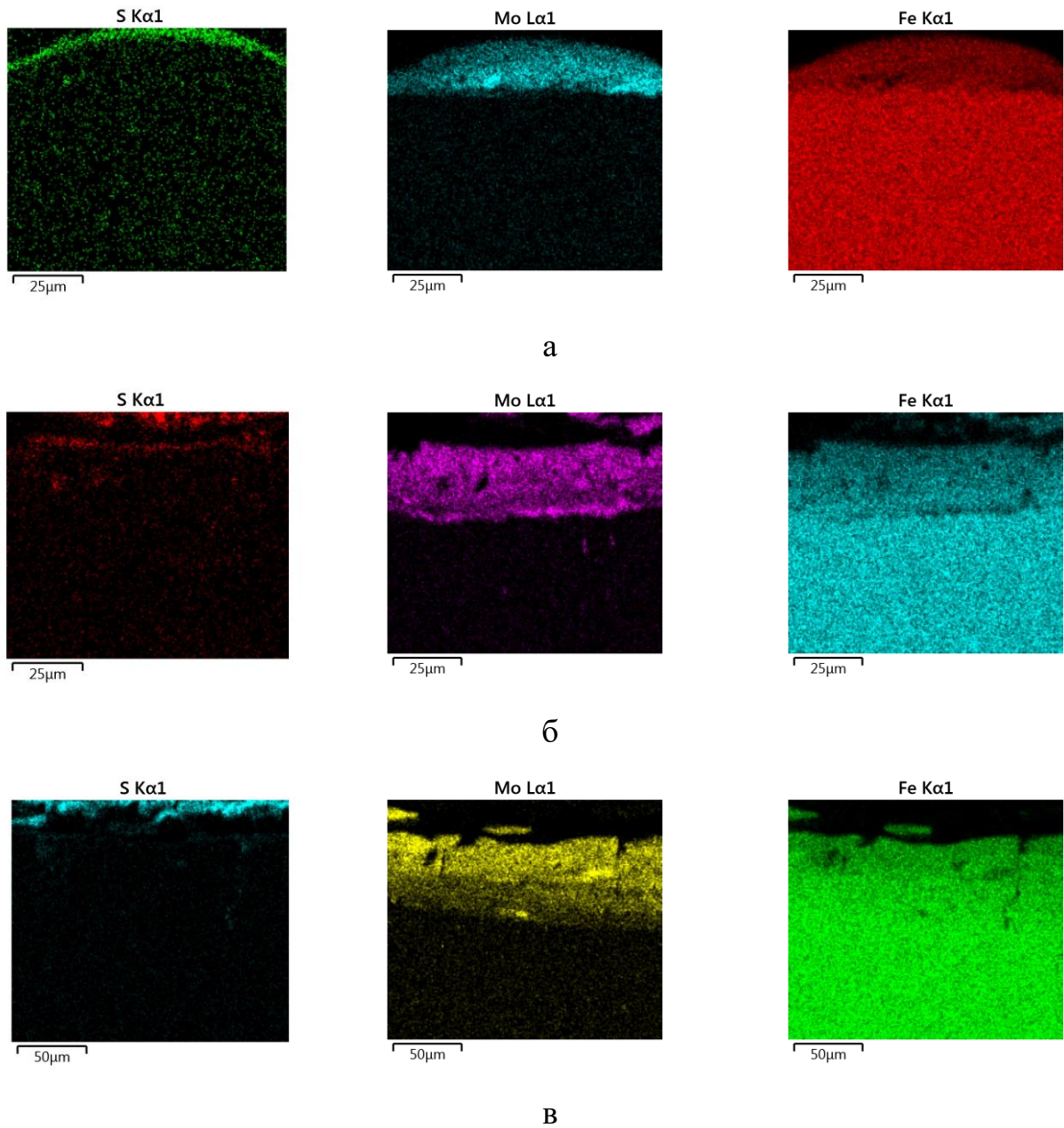
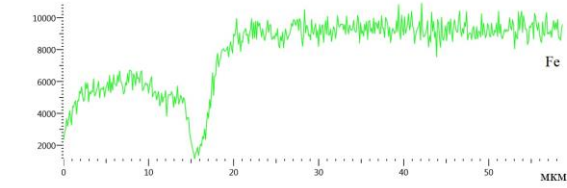
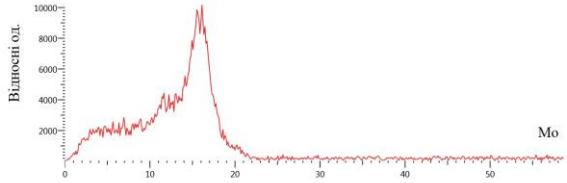
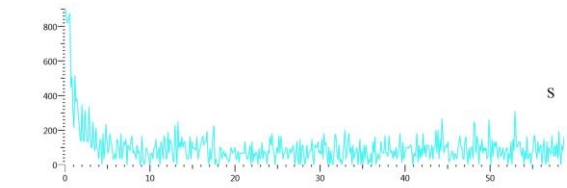
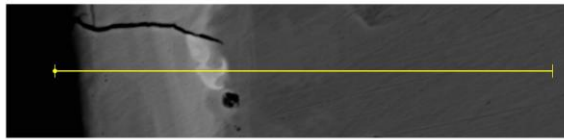
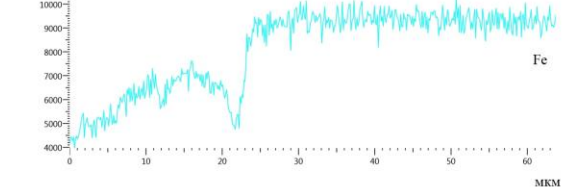
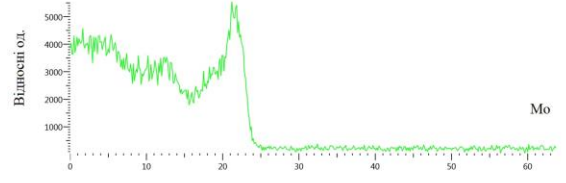
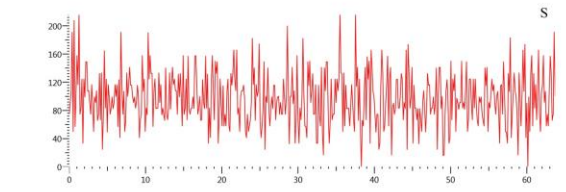
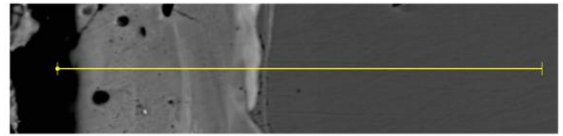


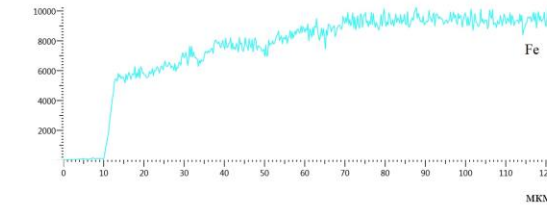
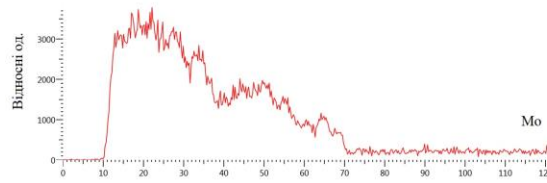
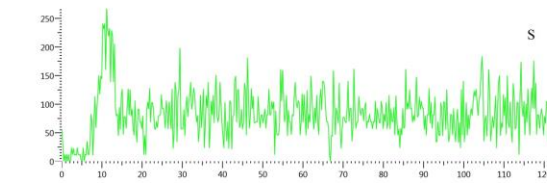
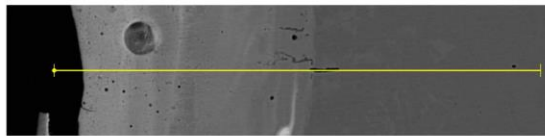
Рисунок 3.4 – Карты розподілу хімічних елементів у покритті після сульфомолібденування методом ЕІЛ з різною енергією розряду: а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж



а



б



в

Рисунок 3.5 – Розподіл елементів в сульфомолібденових покриттях:

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж

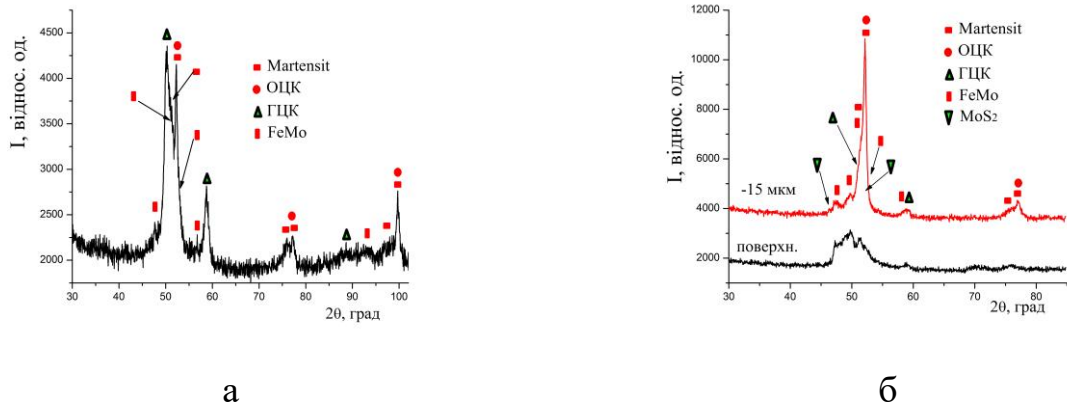


Рисунок 3.6 – Дифрактограми сульфомолібденових покриттів, отриманих методом ЕІЛ; а – $W_p = 0,55$ Дж; б – $W_p = 3,4$ Дж

Таблиця 3.2

Параметри кристалічних ґраток фаз і кількісний фазовий аналіз сульфомолібденових покриттів на сталі 40

Енергія розряду, Дж	Фаза	Період ґраток, a , нм	Вміст фази, % (мас.)
0,55	Твердий розчин ОЦК	2,8720	23,90
	Твердий розчин ГЦК	3,6450	25,38
	Мартенсит	$a = 2,8740$ $c = 2,9200$	10,98
	FeMo (σ -фаза)	$a = 9,1280$ $c = 4,8130$	39,74
3,4	На відстані 15 мкм		
	Твердий розчин ОЦК	2,8720	46,36
	Твердий розчин ГЦК	3,6450	6,10
	Мартенсит	$a = 2,8640$ $c = 2,9200$	30,14
	FeMo (σ -фаза)	$a = 9,1280$ $c = 4,8130$	12,53
	MoS ₂	$a = 3,1212$ $c = 12,2410$	4,87

В умовах високих швидкостей нагрівання і охолодження мікрооб'ємів поверхневого шару, що призводять до формування нерівноважних структур, а також, у результаті перемішування матеріалу основи і легуючого електрода, взаємодії рідкої ванни сплаву при ЕІЛ з міжелектродним простором – повітрям,

інтенсивних ударних хвиль, що виникають при ЕІЛ і призводять до термомеханічного зміцнення та інших процесів, що впливають на фазоутворення, очевидно, в поверхневому шарі при температурі легування (більше 1000°C) утворюється два легованих аустеніту. Один з них, мартенситна точка M_n якого лежить вище кімнатної температури, при охолодженні зазнає мартенситного перетворення, при цьому утворюється мартенсит з параметром ґратки $a = 2,8740\text{ нм}$, $c = 2,9200\text{ нм}$. У зв'язку з тим, що молібден інтенсивно знижує температури мартенситного перетворення, воно не відбувається до кінця, і в покритті залишається не перетвореним залишковий аустеніт – твердий розчин ГЦК. Крім твердих розчинів в поверхневому шарі утворюється до 40% інтерметалідів FeMo , що сприяє помітному збільшенню мікротвердості поверхневого шару після ЕІЛ при $W_p = 0,55\text{ Дж}$ (при $W_p = 0,13\text{ Дж}$ – $H_{\mu} = 5474\text{ МПа}$, при $W_p = 0,55\text{ Дж}$ – $H_{\mu} = 7832\text{ МПа}$, табл. 3.2).

Сульфомолібденування методом ЕІЛ при $W_p = 3,4\text{ Дж}$ сталі 40 призводить до підвищення кількості мартенситної фази до 30%, порівняно з 11% при $W_p = 0,55\text{ Дж}$, зменшення кількості залишкового аустеніту (ГЦК фази) з 25% до 6%, а також до 5% дисульфиду молібдену. Необхідно відзначити, що зі збільшенням енергії розряду збільшується шорсткість поверхні, що призводить до унеможливлення отримання достовірних результатів рентгеноструктурного аналізу. Тому дифрактограми оброблялися з поверхні після її зачищення наждачним папером на 15 мкм. Необхідно відмітити, що дисульфід молібдену утворюється вже при енергії розряду $W_p = 0,55\text{ Дж}$ (3,77%), а при $W_p = 3,4\text{ Дж}$ його виявляється близько 8% на поверхні і близько 5% на глибині до 15 мкм.

3.3 Висновок

Таким чином, досліджено процес сульфомолібденування металевих поверхонь, що полягає в нанесенні консистентної речовини, що містить сірку, і електроіскрове легування молібденовим електродом при енергіях розряду 0,13; 0,55; 3,4 Дж. Металографічні та дюрOMETричні дослідження показали, що

сульфомолібденові покриття складаються з 4-х зон: верхній пухкий шар з мікротвердістю $H_{\mu} = 1112-2040$ МПа, «білий» зміцнений шар з $H_{\mu} = 5147-5474$ МПа для $W_p = 0,13$ Дж і $H_{\mu} = 10596-10731$ МПа для $W_p = 3,4$ Дж, дифузійна зона і основний метал. При заміні підкладки зі сталі 20 на 40 відбувається підвищення мікротвердості, товщини зміцненого шару, а також суцільності.

Електронно-мікроскопічні дослідження отриманих покриттів показали, що отриманий шар має неоднорідний склад з різною концентрацією елементів. Згідно з картами розподілу елементів за площею досліджуваних зразків, на поверхні концентрується сірка, молібден розподіляється більш рівномірно в покритті. Енергодисперсійний аналіз показав, що сірка та молібден концентруються на глибині до 4 і 19 мкм, відповідно, при $W_p = 0,13$ Дж, до 5 і 25 мкм при $W_p = 0,55$ Дж, до 15 і 70 мкм при $W_p = 3,4$ Дж, відповідно.

Рентгеноструктурний аналіз отриманих покриттів підтверджує результати енергодисперсійного аналізу. При невисоких енергіях розряду фазовий склад покриттів на сталі 40 представлений твердим розчином ОЦК, за періодом ґратки близьким до фериту, мартенсит, ГЦК твердий розчин та інтерметалід FeMo (σ -фаза).

Дисульфід молібдену утворюється вже при енергії розряду $W_p = 0,55$ Дж (3,77%), а при $W_p = 3,4$ Дж його виявляється близько 8% на поверхні і близько 5% на глибині до 15 мкм.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Теоретична частина

Оцінка економічної ефективності результатів магістерської роботи проводиться для визначення доцільності їх впровадження. Економічна ефективність визначається різницею між сукупною вартістю вихідного (базового) рівня та рівнем, досягнутим після впровадження результатів досліджень [54].

За основу для порівняння обрано:

- при визначенні економічної ефективності науково-дослідної роботи (НДР), тим самим створюючи новий технологічний процес або техніку, які раніше ніде не використовувалися вищий технічний рівень (технологія), впроваджений, спроектований або при стадіях завершеного наукового дослідження;

- при визначенні економічної ефективності робіт, спрямованих на удосконалення діючої техніки і технології, рівень наявної техніки і технології, який буде досягнутий на момент впровадження цієї НДР у виробництво.

Для аналізу ефективності процесу запропонованої технології обробки розглядається деталь – штамп для пресування порошків, масою 0,15 кг.

Розрахунки виконано як для базового, так і для запропонованого варіанту обробки.

4.2 Визначення технологічної собівартості

Для визначення технологічної собівартості проводимо розрахунок окремих елементів витрат.

Вартість матеріалу виробу:

$$B_m = (Q \cdot C_m) \cdot a, \quad (4.1)$$

де Q – норма витрати матеріалу (маса заготовки), кг;

C_m – ціна матеріалу (заготовки), грн.

a – коефіцієнт, що враховує витрати на термообробку (умовно приймаємо 1,4).

$$B_m = (0,15 \cdot 120) \cdot 1,4 = 25,20$$

Основна і додаткова зарплата виробничого робітника з відрахуваннями на соціальне страхування та до інших фондів (за виконувану операцію):

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

де $C_{\text{ч}}$ – годинна тарифна ставка відповідного розряду, грн.;

K_1 - коефіцієнт, що враховує додаткову зарплату (приймаємо: для базової технології $K_1 = 1,5$; запропонованої $K_1 = 1,3$);

K_2 - коефіцієнт, що враховує багатостанковне обслуговування (приймається $K_2 = 1,375$);

$t_{\text{шт}}$ - штучний час на операцію, хв.;

$K_{\text{мн}}$ - коефіцієнт, що враховує обслуговування кількома одиницями обладнання; приймається $K_{\text{мн}} = 1$;

n - кількість одиниць обладнання на даній операції, шт.

Для базової технології:

$$Z_p = 54,8 \cdot 1,5 \cdot 1,375 \cdot \frac{600}{60} \cdot 1 \cdot 2 = 2260,5 \text{ грн}$$

Нової технології:

$$Z_p = 54,8 \cdot 1,3 \cdot 1,375 \cdot \frac{10}{60} \cdot 1 \cdot 2 = 32,6 \text{ грн}$$

Амортизаційні відрахування по обладнанню, віднесені на дану операцію:

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

де S_0 – вартість одиниці обладнання, грн.;

K – коефіцієнт, що враховує витрати на транспортування і монтаж устаткування; приймаємо: для базової технології $K = 1,15$, нової $= 1,1$;

a - норма амортизаційних відрахувань (10% від вартості обладнання);

n - кількість одиниць обладнання на даній операції, шт.;

$N_{\text{річ}}$ - річна програма деталей, шт.

Для базової технології:

$$A_0 = \frac{1720000 \cdot 1,15 \cdot 17200 \cdot 1}{2000 \cdot 100} = 170108 \text{ грн}$$

Нової технології:

$$A_0 = \frac{50000 \cdot 1,1 \cdot 5000 \cdot 1}{2000 \cdot 100} = 1375 \text{ грн}$$

Витрати на ремонт обладнання приймаємо укрупнено пропорційно величині амортизаційних відрахувань:

$$B = A_0 \cdot K, \quad (4.4)$$

де K - коефіцієнт, що встановлює залежність величини витрати на ремонт від величини амортизаційних відрахувань; приймаємо: базовий варіант 180%, проектувальний 160%.

Для базової технології:

$$B = 170108 \cdot 180 = 306194,40$$

Нової технології:

$$B = 1375 \cdot 160 = 2200$$

Витрати на силову електроенергію з даної операції:

$$B = [K_1 \cdot N_y \cdot (t_{шт} - t_{маш}) + K_2 \cdot N_y \cdot t_{маш}] \cdot \frac{S_3}{60}, \quad (4.5)$$

де N_y – сумарна встановлена потужність електродвигунів одиниць обладнання, кВт;

$t_{маш}$ – машинний час, хв;

K_1 – коефіцієнт, що враховує використання встановленої потужності, що витрачається при небажаній роботі обладнання; приймається $K_1 = 0,25$;

K_2 – коефіцієнт використання встановленої потужності устаткування в процесі термообробки, приймаємо: базовий варіант 0,8, проектувальний 0,5;

S_3 – вартість одного кВт/год. електроенергії, грн.;

Для базової технології:

$$B = (0,25 \cdot 11 \cdot (600 - 450) + 0,8 \cdot 11 \cdot 450) \cdot \frac{4,3}{60} = 313,4$$

Нової технології:

$$B = (0,25 \cdot 11 \cdot (10 - 5) + 0,5 \cdot 11 \cdot 5) \cdot \frac{4,3}{60} = 100,5$$

Витрати на допоміжні матеріали, віднесені на операцію укрупнено приймаємо:

$$B_m = \frac{M \cdot n}{N_{\text{річ}}}, \quad (4.6)$$

де M – річні витрати на допоміжні матеріали; приймається 50 грн./рік на одиницю обладнання;

n - кількість одиниць обладнання, шт.;

$N_{\text{річ}}$ - річна програма деталей, шт.

$$B_m = \frac{50 \cdot 1}{2000} = 0,025 \cdot$$

Витрати на утримання виробничої площі, віднесені на операцію:

$$Z_{\text{П}} = \frac{S_{\text{пл}} \cdot K \cdot n \cdot P}{N_{\text{річ}}}, \quad (4.7)$$

де $S_{\text{пл}}$ - площа, яку займає одиниця обладнання, м²;

K - коефіцієнт, що враховує додаткову площу під проходи і проїзди;

n - кількість одиниць обладнання, шт.;

P - річна норма витрат за змістом одного метра квадратного виробничої площі, грн.; приймаємо: базовий варіант 120 грн., проектувальний 100 грн.

Для базової технології:

$$Z_n = \frac{3 \cdot 1,3 \cdot 1 \cdot 120}{2000} = 0,234$$

Нової технології:

$$Z_n = \frac{1 \cdot 1,3 \cdot 1 \cdot 100}{2000} = 0,065$$

Зведемо раніше обраховані результати в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

Технологічна собівартість одиниці виробу, грн.

Найменування елементів витрат	Для базової технології	Нової технології
Основна та додаткова зарплата	2260,5	32,6
Амортизаційні відрахування	170108	1375
Витрати на ремонт устаткування	306194,4	2200
Витрати на силову електроенергію	313,4	100,5
Витрати на утримання виробничої площі	0,234	0,065
Разом	308768,5	3708

4.3 Розрахунок накладних витрат

Загальновиробничі витрати:

$$B_{\text{заг}} = \left(\frac{z_p}{K_1 \cdot K_2} \right) \cdot 1,2, \quad (4.8)$$

де K_1 - коефіцієнт, що враховує додаткову зарплату (приймаємо: для базової технології $K_1 = 1,5$; нової технології $K_1 = 1,3$);

K_2 - коефіцієнт, що враховує багатостанковне обслуговування (приймається $K_2 = 1,375$);

Для базової технології:

$$B_{\text{заг}} = \frac{2260,5}{1,5 \cdot 1,375} \cdot 1,2 = 1315,2$$

Нової технології:

$$B_{\text{заг}} = \frac{32,6}{1,3 \cdot 1,375} \cdot 1,2 = 21,9$$

Виробнича собівартість:

$$C_{\text{вир}} = C_m + z_p + A_0 + P + \Xi + B_m + z_n + C_{\text{заг}}, \quad (4.9)$$

Для базової технології:

$$C_{\text{вир}} = 1500 + 2260,5 + 170108 + 0,025 + 0,234 + 120 + 313,4 = 174302,2$$

Нової технології:

$$C_{\text{вир}} = 1500 + 32,6 + 1375 + 0,025 + 0,065 + 100 + 100,5 = 3108,2$$

Позавиробничі витрати:

$$C_{\text{в}} = C_{\text{вир}} \cdot 0,03, \quad (4.10)$$

Для базової технології:

$$C_{\text{в}} = 174302,2 \cdot 0,03 = 5229,0$$

Нової технології:

$$C_{\text{в}} = 3108,2 \cdot 0,03 = 93,2$$

Повна собівартість:

$$C_{\text{п}} = C_{\text{вир}} + C_{\text{в}}, \quad (4.11)$$

Для базової технології:

$$C_{\text{п}} = 174302,2 + 5229 = 179531,2$$

Нової технології:

$$C_{\text{п}} = 3108,2 + 93,2 = 4040,2$$

Прибуток:

$$PP = 0,3 \cdot C_{\text{п}}, \quad (4.12)$$

Для базової технології:

$$PP = 0,3 \cdot 179531,2 = 53859,36$$

Нової технології:

$$PP = 0,3 \cdot 4040,2 = 1212,06$$

Оптова ціна:

$$Ц_{\text{оп}} = C_{\text{п}} + PP, \quad (4.13)$$

Для базової технології:

$$Ц_{\text{оп}} = 179531,2 + 53859,36 = 184920,56$$

Нової технології:

$$Ц_{\text{оп}} = 4040,2 + 1212,06 = 5252,26$$

Роздрібна ціна:

$$Ц_{\text{р}} = 1,2 \cdot Ц_{\text{оп}}, \quad (4.14)$$

Для базової

$$Ц_p = 1,2 \cdot 184920,56 = 221904,7 \text{ технології:}$$

Нової технології:

$$Ц_p = 1,2 \cdot 5252,26 = 6302,7$$

На підставі отриманих даних можна зробити відповідні висновки.

Економічний ефект склав:

C_n (базового варіанту) – C_n (пропонованого варіанту) = (грн.) - для одного виробу.

$$179531,2 - 4040,2 = 175491 \text{ грн}$$

Річний економічний ефект складає:

Економічний ефект · Програма випуску на рік = (грн.)

$$175491 \cdot 2000 = 350982000 \text{ грн}$$

Таким чином, у пропонованому варіанті при фіксованому значенні обсягу виробництва ми домоглися мінімізації витрат у порівнянні з базовим.

Таблиця 4.2

Економічна ефективність пропонованого процесу в порівнянні з базовим, грн.

Показник	Для базової технології	Нової технології
1. Технологічна собівартість одиниці виробу		
1.1 Основна і додаткова заробітна плата робітника	2260,5	32,6
1.2 Амортизаційні відрахування по обладнанню	170108	1375
1.3 Витрати на ремонт обладнання	306194,4	2200
1.4 Витрати на силову електроенергію	313,4	100,5
1.5 Витрати на утримання виробничої площі	0,234	0,065
2. Повна собівартість	179531,2	4040,2
3. Ціна виробу	22190	6302,7
4. Програма випуску за рік, шт	2000	2000

5. Річний економічний ефект	35098200
-----------------------------	----------

4.4 Висновок

Підготовка виробництва вимагає ресурсів у вигляді операційних витрат і капітальних вкладень. Перший включає витрати, пов'язані з технологією, дизайном, матеріалами та виробничою документацією. Готуються попередні кошториси для розробки нової продукції, створення виробничих процесів, розробки технічного оснащення, розрахунку та узгодження нормативів витрат, а також формування цінових пропозицій на продукцію, пов'язану з придбанням або модернізацією обладнання. Ці витрати пов'язані з розробкою та впровадженням нових продуктів і визначаються різницею між плановою собівартістю та фактичною собівартістю продукту, запущеного в процес реалізації. Також включає витрати на креслення, офісні витрати та витрати на друк. Включає питомі витрати на будівництво нових підприємств і комплексів обладнання в рамках затверджених кошторисів на освоєння нових видів продукції та технологічних процесів з урахуванням розбіжностей особливих вимог замовника в узгоджених тимчасових цінових рамках. За розрахунковими даними, що діють на момент написання магістерської роботи, проводяться амортизаційні відрахування на обладнання (основне, допоміжне) та інші витрати та розраховуються загальні витрати в рамках мінімізації собівартості продукції. Річний господарський прибуток становить 35 098 200грн.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1 Шкідливі фактори при проведенні ремонтних робіт

Ремонтне зварювання і наплавлення деталей машин і механізмів на сьогоднішній день є одними з основних технологічних методів відновлення експлуатаційних властивостей деталей і зміцнення їхніх поверхонь.

Згідно з [55] газозварювальне обладнання є вибухонебезпечним і вимагає суворого дотримання заходів безпеки. Устаткування для газополум'яної обробки металів повинно відповідати вимогам відповідно до стандартів.

Для проведення зварювальних робіт на підприємствах застосовують MIG/MAG зварювання - дугове зварювання металевим електродом (дротом), що плавиться, в середовищі інертного/активного захисного газу з автоматичною подачею присадного дроту. Застосування цього зварювання супроводжується низкою екологічних проблем.

Проблема фотохімічних реакцій у повітрі. Основним джерелом небезпечних і шкідливих факторів зварювання в захисних газах є світлове випромінювання іонізованого в дузі аргону. Це випромінювання характерне для Сонця у відкритому космосі. До поверхні Землі від Сонця доходять тільки промені довжиною 290 нм, коротші гальмуються атмосферою [56]. Під час гальмування короткого ультрафіолету, випромінюваного аргоном, відбуваються фотохімічні реакції з молекулярним киснем і азотом з утворенням озону й оксиду азоту. Озон - O_3 , алотропна форма кисню, є потужним окислювачем. Завдяки своїй хімічній активності озон має дуже низьку гранично допустиму концентрацію в повітрі (порівнянну з ГДК бойових отруйних речовин) 5-10-8 % або $0,1 \text{ мг/м}^3$, що в 10 разів більше за нюховий поріг для людини. Озон подразнює слизову оболонку очей і дихальних шляхів, пошкоджує тканини легень, викликає кашель і запаморочення. Окис азоту (NO) на повітрі швидко окислюється в двоокис азоту - NO_2 , який і відіграє основну роль під час отруєння оксидами. Оксиди азоту спричиняють ураження

глибоких відділів повітроносних шляхів і набряк легенів. Отруєння озоном і оксидами азоту може призвести до летального результату внаслідок паралічу дихання [57].

Проблема утворення біологічно активних речовин. У зону дуги при струменевому захисті сумішшю аргону і вуглекислого газу потрапляє близько 3-6% атмосферного повітря. У неї ж виділяються розчинені в металі гази. Дослідженнями [58] визначено, що в зоні дуги можливий синтез біологічно активних речовин (БАР) - CN, HCN, NO₂, N₂O, CO, які надходять у повітря робочої зони. Найменша концентрація БАР утворюється під час зварювання в чистому аргоні та під час зварювання в суміші Ar+5% O₂. Найбільша - під час зварювання в суміші Ar+CO₂.

Проблема утворення аерозолів неокислених металів (діаметр частинок аерозолів металу становить 0,1-0,5 мкм, а агломератів - 5-10 мкм) у струмені захисного газу має важливе значення як для забезпечення безпеки робіт, так і для розв'язання екологічної безпеки зварювання завдяки утилізації високодисперсних аерозолів металів, що утворилися. Усі неокислені метали горючі [59].

Наплавлення - це нанесення шару металу на поверхню заготовки або виробу за допомогою зварювання плавленням [60]. У разі застосування для цієї мети зварювання тиском вживається термін наварка (плакування). Відновлювальне наплавлення (наварювання) застосовується для відновлення початкових розмірів зношених або пошкоджених деталей. У цьому разі наплавлений метал за складом і властивостями може бути близьким до основного (відновлювальне розмірне наплавлення) або відрізнятися від нього (відновлювальне зносостійке наплавлення) [58].

Під час виконання зварювання на працівників можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори. До шкідливих виробничих факторів належать [61]:

- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- підвищений рівень ультрафіолетової та інфрачервоної радіації;

- підвищена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- недостатня освітленість робочої зони;
- небезпека ураження електричним струмом;
- іскри, бризки, викид розплавленого металу і шлаку.

Під час зварювання в зону дихання працівників можуть надходити зварювальні аерозолі, що містять у складі твердої фази оксиди різних матеріалів та інші сполуки, а також токсичні гази. Вплив на організм шкідливих речовин, що виділяються, може стати причиною гострих і професійних хронічних захворювань та отруєнь [62].

На ділянках зварювання склад і маса речовин, що виділяються, залежить від властивостей застосовуваних зварювальних і зварювальних матеріалів. Найбільші виділення шкідливих речовин характерні для ручного електродугового зварювання покритими електродами. При витраті 1,0 кг електродів утворюється до 40 г пилу, 2 г фтору і 16 мг водню, 1,5 г оксидів вуглецю й азоту. При напівавтоматичному й автоматичному зварюванні загальна маса шкідливих речовин, що виділяються, менша в 1,5-2,0 раза. Зварювальний пил на 99% складається з частинок розміром від 10-3 до 1,0 мкм, близько 1% пилу має розмір частинок 1-5 мкм, частинки розміром понад 5 мкм становлять десяті частки відсотка [63].

5.2 Причини виникнення шкідливих та небезпечних факторів під час зварювальних робіт

Зварне виробництво включає велику групу техпроцесів з'єднання, роз'єднання (різання), наплавлення, зварювання, напилення, спікання, локальної обробки матеріалів тощо. Ці процеси здійснюються за допомогою теплової, термомеханічної або електричної енергії на місці обробки.

Гігієна та умови праці при зварювальних роботах визначаються насамперед особливостями технологічного процесу, що здійснюється з використанням різних джерел енергії.

Всі відомі способи зварювання істотно відрізняються за гігієнічними характеристиками. Найбільш несприятливі санітарно-гігієнічні умови характерні для теплотехнологічних процесів, що здійснюються на повітрі безпосередньо в зоні дихання працівника, тобто переважно для ручного електродугового зварювання.

Причиною появи шкідливих факторів є те, що значна частина енергії зварювальної дуги проникає в навколишнє середовище, створюючи певну загрозу здоров'ю людини. Струм у самому зварювальному контурі, як джерело енергії, також може бути небезпечним для зварника [63]. Оскільки на нього також впливають шкідливі фактори виробничого середовища, характеристики робочого обладнання та зварювального устаткування, а також фізіологічні та психологічні фактори в організації праці, то отримуємо повний набір шкідливих і небезпечних виробничих факторів.

В деяких випадках вплив шкідливих факторів виробничого середовища призводить до виникнення виробничих захворювань.

5.3 Шкідливі речовини, що утворюються під час зварювання

Сучасні технології використовують багато речовин, які можуть потрапляти в повітря, де перебувають люди, і загрожувати їх здоров'ю [64]. Щоб визначити ступінь небезпеки, лікарі вивчають вплив цих речовин на організм людини та встановлюють безпечні концентрації та дози, які різними шляхами можуть потрапити в організм людини. На машинобудівних підприємствах повітря робочої зони може бути забруднене токсичними речовинами, що утворюються в результаті технологічних процесів при виробництві виробів, обладнання, конструкцій і вузлів, різних деталей машин (зварювання, термообробка заготовок, фарбування тощо) і містяться в металі, з якого виготовлені ці вироби [64-66].

Шкідливі речовини, що утворюються під час зварювання та спричиняють забруднення повітря, знаходяться в повітрі у вигляді аерозолів, широко відомих як зварювальні аерозолі (ЗВ) та газів [65]. Основні фізико-хімічні властивості

пилу (аерозолі): хімічний склад, дисперсність (ступінь подрібнення), структура частинок, розчинність, щільність, питома поверхня, граничні нижня і верхня концентрації вибуховості суміші з повітрям, електричні властивості, і так далі. Значення всіх цих показників дозволяють оцінити рівень небезпеки та шкідливого впливу пилу та пожежі [63].

За токсичною дією шкідливі речовини поділяють на [65]:

- токсини крові, які взаємодіють з гемоглобіном і пригнічують здатність поповнювати кисень (чадний газ);
- нейротоксини, що збуджують нервову систему, виснажують нервову систему, руйнують нервову тканину (ліки - ацетилен, спирт, сірководень та ін.
- токсини, що призводять до подразнення шкіри та слизових оболонок (сірчана та соляна кислоти, луги);
- канцерогени, що викликають утворення злоякісних пухлин (шестивалентний хром у вигляді зварювальних аерозолів, кам'яновугільна смола).

5.4 Організація вентиляції при зварювальних роботах

Для видалення шкідливих речовин з робочого місця зварника застосовується система вентиляції. Проводиться встановлення місцевої та загальнообмінної витяжної вентиляції (рис. 1) [67].

Місцеві витяжні системи повинні встановлюватися до кожного обладнання та робочого місця, де є виділення шкідливих речовин. Так само необхідно обладнати витяжну систему вентиляції фільтрами для очищення повітря від зварювальних аерозолів. Обсяг свіжого повітря, яке подається повинен бути не менше 30 м³/год. Без вентиляції зварювання всередині замкнених просторів не дозволяється. Викид повітря проводиться або в цех або в атмосферу, подачу ж припливного повітря необхідно здійснювати наступним чином: розосереджено – при зварюванні в середовищі захисних газів; зосереджено – у верхню зону приміщення у всіх інших випадках.



а

б

Рисунок 5.1 – Промислова вентиляція: а – місцева; б – загально обмінна

Якщо проводиться робота з газоплазменною обробкою металів зрідженими газами, то $2/3$ об'єму повітря видаляється з нижньої зони приміщення, $1/3$ – з верхньої. Повітря зі зварювальних цехів дозволяється викидати в атмосферу за умови, що концентрація забруднень в атмосфері населених пунктів не перевищить гранично допустимих концентрацій

При проектуванні вентиляції необхідно дотримуватися таких вимог:

Вентиляція повинна забезпечувати необхідну чистоту повітря та параметри мікроклімату виробничого приміщення в відповідності з [63]. Загальнообмінна вентиляція повинна забезпечувати ефективний баланс між об'ємами повітря, що надходять в приміщення та видаляються з нього. Вентиляційне обладнання не повинно заважати рухові внутрішньоцехового транспорту, знижувати продуктивність праці, впливати на якість зварювання. Вентиляція повинна забезпечувати економічність та надійність при експлуатації.

Види систем вентиляції. Системи вентиляції можна умовно класифікувати за такими основними ознаками [64]:

- спосіб організації повітрообміну (природна, механічна та змішана (застосовується і природна, і механічна вентиляція));

- спосіб подачі та видалення повітря (припливна, витяжна та припливновитяжна).

5.5 Дія на організм електромагнітних полів та безпека в зварювальному виробництві

Не дивлячись на досягнення у вирішенні проблеми дії ЕМП на організм людини при зварюванні, вона все ще не має достатнього рішення. Ця проблема є предметом суспільної дискусії тривалий час і залишається невирішеною, дослідження продовжуються [66].

Вплив ЕМП на організм працюючих викликає зміни у функціональному стані нервової і серцево-судинної систем, що проявляються в збільшенні часу реакції на зовнішні подразники, зниження артеріального тиску, які залежать від напруженості даного фактора і тривалості опромінення. Результати фізіологічних досліджень були підтверджені при поліклінічному обстеженні зварників [65].

Вимоги до персоналу, що виконує зварювальні роботи.

До виконання електрошлакового зварювання допускаються зварники і помічники зварників, які пройшли додаткове навчання технології електрошлакового зварювання і перевірку знань вимог безпеки. Помічник зварника до самостійного виконання електрошлакового зварювання не допускається [65].

Зварювання виробів середніх і малих розмірів в стаціонарних умовах слід виконувати в спеціально обладнаних кабінах. Кабіна повинна мати відкритий верх та виготовлятися з негорючих матеріалів. Між стіною та підлогою кабіни необхідно залишати зазор, висота якого визначається видом зварювання. Площа кабіни повинна бути достатньою для розміщення зварювального устаткування, стола, пристрою місцевої витяжної вентиляції, зварювального виробу та інструменту.

5.6 Екологічна безпека під час проведення відновлюваних робіт

Серед питань, що потребують уваги, є питання безпеки людини в навколишньому середовищі, оскільки загальна ситуація екологічної безпеки у світі і особливо в Україні є складною. Це пояснюється такими характеристиками сучасності [68]:

- Глобальне забруднення біосфери.
- Численні промислові та транспортні аварії.
- Високий рівень нещасних випадків на виробництві та в побуті.
- Смертність - Поширення інфекційних захворювань.
- Загрозливий масштаб соціально-політичних небезпек - тероризм, захоплення заручників тощо.

Вплинути на зменшення таких явищ можна, змінивши уявлення та відповідальність людей у повсякденному та виробничому житті.

Підвищення рівня безпеки є однією з найважливіших екологічних проблем, вирішення якої вимагає значної уваги та зусиль на місцевому, регіональному та національному рівнях. Ця проблема вирішується різними шляхами: організаційна, науково-технічна діяльність, діяльність органів управління, використання засобів масової інформації, освітня діяльність молоді, населення, кадровий потенціал підприємств тощо.

Питання безпеки життєдіяльності та здоров'я людини тісно пов'язані з процесом сталого людського розвитку. Це питання сьогодні вважається пріоритетним в умовах глобалізації всіх сфер людської діяльності. Експерти Організації Об'єднаних Націй розробили стратегічну концепцію сталого розвитку, так звану Порядок денний XXI століття. Він включає ідею безпеки життя людини, яка базується на передумові, що глобальні людські проблеми (голод, бідність, безробіття, хвороби, різні війни, інфекційні хвороби) можуть бути вирішені шляхом організованої взаємодії громадян.

Метою концепції ООН є створення умов для безпечного існування людей для нинішніх і майбутніх поколінь. Це своєрідне продовження ноосферної концепції, сформульованої В. Вернадським у першій половині XX ст. Його суть

полягає в прогресі суспільства, який визначається потребами кожної людини, координації економічного, екологічного та людського розвитку таким чином, щоб якість і безпека людського життя та стан навколишнього середовища не погіршувалися з поколіннями.

5.7 Висновок

Ремонтне зварювання і наплавлення деталей машин і механізмів на сьогоднішній день є одними з основних технологічних методів відновлення експлуатаційних властивостей деталей і зміцнення їхніх поверхонь.

Зварювання, наплавлення може створити середовище з високим вмістом шкідливих речовин, які можуть негативно вплинути на здоров'я людини, виникають також електромагнітні випромінювання, можливе ураження електричним струмом тощо. Одним із способів захисту від небезпеки забруднення повітря шкідливими речовинами є використання відповідного захисного обладнання. Робітники, які працюють у зоні зварювання, повинні носити спеціальні захисні маски (респіратори), які можуть фільтрувати аерозолі та гази, що знаходяться під час зварювання. Крім того, захисні окуляри та одяг, що відповідає вимогам безпеки, також повинні використовуватися для захисту очей та тіла від можливого бризку розплавленого металу чи іскору. Усі ці заходи повинні бути вжиті разом для забезпечення найвищого рівня захисту робітників, які займаються зварюванням. Правильний вибір та використання захисного обладнання, розумне планування робочого простору та дотримання норм безпеки є ключовими елементами забезпечення безпеки під час зварювання.

Підвищення рівня безпеки є однією з найважливіших екологічних проблем, вирішення якої вимагає значної уваги та зусиль на місцевому, регіональному та національному рівнях. Ця проблема вирішується різними шляхами: організаційна, науково-технічна діяльність, діяльність органів управління, використання засобів масової інформації, освітня діяльність молоді, населення, кадровий потенціал підприємств тощо.

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 якісна сталь 40Х, яка застосовується для виготовлення валів, осей, плунжерів, вал-шестірень, штоків, шпинделів та інших виробів. Представлений аналіз впливу легувальних елементів на властивості сталі. Основними легувальними елементами є вуглець і хром.

3. Розглянуті устаткування для електроіскрового легування, режими роботи установки, основні методи дослідження – металографічний аналіз (оптична та електронна мікроскопія), рентгеноструктурний та локальний рентгеноспектральний аналізи, визначення мікротвердості.

4. Досліджено процес сульфомолібденування металевих поверхонь, що полягає в нанесенні пасти, що містить сірку, і електроіскрове легування молібденовим електродом. Мікроструктурний аналіз покриттів показав, що поверхневий шар складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ. Електронно-мікроскопічні дослідження отриманих покриттів показали, що отриманий шар має неоднорідний склад з різною концентрацією елементів. Згідно з картами розподілу елементів за площею досліджуваних зразків, на поверхні концентрується сірка, молібден розподіляється більш рівномірно в покритті. Рентгеноструктурний аналіз отриманих покриттів показав, що при невисоких енергіях розряду фазовий склад покриттів представлений твердим розчином

ОЦК, за періодом гратки близьким до фериту, мартенсит, ГЦК твердий розчин та інтерметалід FeMo (σ -фаза). Дисульфід молібдену утворюється вже при енергії розряду $W_p = 0,55$ Дж (3,77%), а при $W_p = 3,4$ Дж його виявляється близько 8% на поверхні і близько 5% на глибині до 15 мкм.

5. Підготовка виробництва вимагає ресурсів у вигляді операційних витрат і капітальних вкладень. За розрахунковими даними, що діють на момент написання магістерської роботи, проводяться амортизаційні відрахування на обладнання (основне, допоміжне) та інші витрати та розраховуються загальні витрати в рамках мінімізації собівартості продукції. Річний господарський прибуток становить 35 098 200грн.

6. Розглянуті шкідливі фактори при зварювальних роботах. Зварювання, напалення може створити середовище з високим вмістом шкідливих речовин, які можуть негативно вплинути на здоров'я людини, виникають також електромагнітні випромінювання, можливе ураження електричним струмом тощо. Одним із способів захисту від небезпеки забруднення повітря шкідливими речовинами є використання відповідного захисного обладнання. Робітники, які працюють у зоні зварювання, повинні носити респіратори, які можуть фільтрувати аерозолі та гази, що знаходяться під час зварювання. Крім того, захисні окуляри та одяг, що відповідає вимогам безпеки, також повинні використовуватися для захисту очей та тіла від можливого бризку розплавленого металу чи іскору. Усі ці заходи повинні бути вжиті разом для забезпечення найвищого рівня захисту робітників, які займаються зварюванням. Правильний вибір та використання захисного обладнання, розумне планування робочого простору та дотримання норм безпеки є ключовими елементами забезпечення безпеки під час зварювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В. І. Савуляк В. Й. Шенфельд М. С. Дмитрієв Модифікування робочих поверхонь сталевих деталей з формуванням високовуглецевих структур // Вісник машинобудування та транспорту №1(9), 2019. – р. 115-122.
2. Тарельник В. Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозионным легированием. Сумы : Изд-во «МакДен», 2002. 323 с.
3. Гитлевич, А. Е. Электроискровое легирование металлических поверхностей [Текст] / А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревуцкий – Кишинев: Издательство «Штиинца», 1985. – 196 с.
4. Фотеев, Н. К. Технология электроэрозионной обработки [Текст] / Н. К. Фотеев – М.: Машиностроение. 1980. – 184 с. ил.
5. Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості : колективна монографія / В. С. Марцинковський та ін. ; за ред. В. Б. Тарельника, Є. В. Коноплянченка. Суми : ФОП Литовченко Є. Б., 2020. 410 с.
6. Современные энергоэффективные технологии реализации инженерных задач динамического оборудования : монография / под ред. В. А. Марцинковского, В. С. Марцинковского, В. Б. Тарельника и др. Сумы : Тритория, 2017. 292 с.
7. Полянчиков, Ю. Н. / Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении [Текст]: учеб. пособие. / Ю. Н. Полянчиков, А. Г. Схиртладзе, А. Н. Воронцова, М. Ю. Полянчикова, М. А. Тибиркова, Ю. И. Сидякин, А. А. Кожевникова. – ВолгГТУ, Волгоград, 2015. – 240 с.
8. Иванов Г. П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин [Текст] / Г. П. Иванов – М. : Машиностроение. 1961. – 303 с.
9. Забезпечення захисту поверхонь торцевих імпульсних ущільнень

турбомашин шляхом формування зносостійких наноструктур: монографія / за заг. ред.. В. Б. Тарельника / В.Б. Тарельник, Є.В. Коноплянченко, О.П. Гапонова, Н.В. Тарельник. Суми: Видавництво "Університетська книга". 2022. 252 с.

10. Кириленко С.М. Електродні матеріали на основі заліза для електроіскрового відновлення деталей / Кириленко С.М., Паустовський О.В. // Порошковая металлургия. – 2009. – № 5/6. – С. 69–73.

11. Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів / М.С. Стороженко, О.П. Уманський, В.Є. Шелудько, Ю.В. Губін, Т.В. Курінна. Автоматичне зварювання, №10, 2020. С. 21-25. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.10.04>

12. Розроблення електроіскрових покриттів на основі карбідосталей NbC-сталь Гадфільда / П. М. Присяжнюк, Я. А. Криль // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. - 2013. - № 2. - С. 155-164.

13. Electrospark alloying of titanium and its alloys: The physical, technological, and practical aspects. Part I. The peculiarities of the mass transfer and the structural and phase transformations in the surface layers and their wear and heat resistance / V. V. Mikhailov, A. E. Gitlevich, A. D. Verkhoturov et al. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2013, Vol. 49(5):373-395. DOI:10.3103/S1068375513050074

14. Mulin, Ju. I. Formation of thick-layer coating by electrospark alloying method [Text] / Ju. I. Mulin, V.D. Vlasenko // Modern materials and Technologies. – 2013. – №1. – P. 181-184.

15. Тарельник В. Б., Гапонова О. П. Підвищення експлуатаційних характеристик і екологічної безпеки деталей машин та інструменту електроіскровим легуванням. Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2019. № 1 (55). С. 2–7.

16. Гадалов, В. Н. Зміцнення швидкорізальних сталей [Текст] / В. Н.

Гадалов, Р. Є. Абашкін // У збірнику: Сучасні інструментальні системи, інформаційні технології та інновації / матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції: у двох частинах. - 2011. - С. 119-124.

17. Верхотуров, А. Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей [Текст] / А. Д. Верхотуров, И. М. Муха – Киев: Техника. 1982. – 184 с.

18. [Cementation of steel details by electrospark alloying](#) / V. B. [Tarelnyk](#), O. P. [Gaponova](#), G. V. [Kirik](#) et al. Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2020. Vol. 42 (5). P. 655–667.

19. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт: пат. 151426 України на корисну модель, МПК (2006), F16D 3/56 (2006.01), C10M 103/02 (2006.01), C10M 111/00 /Марцинковський В. С.; Думанчук М. Ю.; Тарельник Н. В.; Пирогов В.О.; Лазаренко А. Д., заявл. 25.01.2022; опубл. 21.07.2022, Бюл. № 29.

20. Спосіб нітроцементації поверхонь сталевих деталей методом електроискрового легування (ЕІЛ): пат. 150385 України на корисну модель, МПК (2006), B23H 1/00, B23H 5/00, B23H 9/00, C23C 8/20 (2006.01), C23C 8/22 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В.; Саржанов О.А.; Тарельник Н. В.; Мікуліна М. О., Лазаренко А. Д.; Поливаний А.Д., заявл. 30.08.2021; опубл. 10.02.2022, Бюл. № 6.

21. Спосіб обробки бронзових вкладишів підшипників ковзання (варіанти): пат. 126517 України на винахід, МПК (2006), B23H 1/06 (2006.01), B23H 5/02 (2006.01), F16C 33/04 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Богдан, Роп`як Л. Я., Саржанов О.А., Тарельник Н. В., Мікуліна М. О., Пирогов В. О., Лазаренко А. Д., Поливаний А. Д., заявл. 22.03.2021; опубл. 19.10.2022, Бюл. № 42.

22. Johnson, R N, and Sheldon, G L. Advances in the electrospark deposition coating process. Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films, 1986. Vol. 4, Issue 6, P. 2740 – 2746. doi:10.1116/1.573672.

23. Wang, J.; Zhang, M.; Dai, S.; Zhu, L. Research Progress in Electrospark

Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings* 2023, 13, 1473. <https://doi.org/10.3390/coatings13081473>

24. Парканский Н.Я. Исследование факторов, влияющих на процесс электроискрового легирования порошковыми материалами. «Электронная обработка материалов. 1996, №6. С. 23–25.

25. Lešnjak, A.; Tušek, J. Processes and properties of deposits in electrospark deposition. *Sci. Technol. Weld. Join.* 2002, 7, 391–396.

26. Технологічні методи забезпечення якості комбінованих електроерозійних покриттів [Електронний ресурс] / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, Є. В. Коноплянченко, В. П. Яременко // [Вісник Сумського національного аграрного університету. Сер. : Механізація та автоматизація виробничих процесів.](#) - 2012. - Вип. 6. - С. 27-32.

27. Підвищення якості робочих поверхонь деталей з аустенітних хромонікелевих сталей методом електроискрового легування [Електронний ресурс] / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, О. М. Мисливченко, Н. Р. Голуб, І. О. Мельник // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.* - 2019. - Вип. 205. - С. 320-329.

28. Левашов Є.О. та ін Особливості впливу нанокристалічних порошків на структуру та властивості сплаву $TiC-Ti_3AlC_2$, отриманого методом СВС. *Фізика металів та металознавство*, том 95, 2003 № 6, С. 58-64.

29. Nanostructured Materials for Electrospark Deposition and Disperse-Strengthening by Nanoparticles Diamond Tools / Levashov, E A; Kudryashov, A E; Zamulaeva, E I; Kurbatkina, V V; Andreev, V A; et al. *Journal of Physics: Conference Series; Bristol* Vol. 416, Iss. 1, (Mar 2013). DOI:10.1088/1742-6596/416/1/012004

30. Nanoparticle dispersion-strengthened coatings and electrode materials for electrospark deposition / E.A. Levashov, P.V. Vakaev, E.I. Zamulaeva , ; et al. *Thin Solid Films*, Vol. 515, Issue 3, 23 2006, P. 1161-1165

31. ГОСТ 4543 – 71 Прокат із леговоаної конструкційної сталі. Технічні умови.

32. Фізичні методи вивчення властивостей матеріалів : підручник / Е.К. Посвятенко, Р.В. Будяк, О.В. Мельник, В.Г. Нікітін. – К. : НТУ, 2019. – 184 с.
33. Методи та засоби мікроскопії: моногр. / В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, Ю.Ю. Бондаренко та ін. - К.: НТУУ "КПІ", 2013. - 336 с.
34. Haronova O.P., Tarel'nyk V.B., Tarel'nyk N.V., Myslyvchenko M., Nanostructuring of Metallic Surfaces by Electrospark Alloying Method, The Journal of The Minerals, DOI:10.1007/s11837-023-05940-1, pp.1-13, 2023.
35. 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.
36. 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 Є.Б., 2020. — 410 с.
37. Забезпечення захисту поверхонь торцевих імпульсних ущільнень турбомашин шляхом формування зносостійких наноструктур : монографія / В. Б. Тарельник, Е. В. Коноплянченко, О. П. Гапонова [та ін.] ; за заг. ред. В. Б. Тарельника. – Суми : Університетська книга, 2022. – 252 с.
38. Gordon N. J. Essentials of Polygraph and Polygraph Testing. CRC Press, 2016. 304 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315438641>
39. Novitni kompozytsiini materialy detalei tertia polihrafichnykh mashyn / Kyrychok P. O., Roik T. A., Havrysh A. P., Shevchuk A. V., Vitsiuk Yu. Yu. Kyiv: NTUU KPI, 2015. 428 p.
40. Sviridenok A. I., Myshkin N. K., Kovaleva I. N. Latest developments in tribology in the journal Friction and Wear // Journal of Friction and Wear. 2015. Vol. 36, Issue 6. P. 449–453. doi: <https://doi.org/10.3103/s106836661506015x>
41. Material properties of graphene/aluminum metal matrix composites

fabricated by friction stir processing / Jeon C.-H., Jeong Y.-H., Seo J.-J., Tien H. N., Hong S.-T., Yum Y.-J. et. al. // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2014. Vol. 15, Issue 6. P. 1235–1239. doi: <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0462-2>

42. Effect of Secondary Structures on the Functional Properties of HighSpeed Sintered Bearings for Printing Machines / Roik T. A., Gavrish A. P., Kirichok P. A., Vitsyuk Y. Y. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2015. Vol. 54, Issue 1-2. P. 119–127. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9688-5>

43. New Copper-Based Composites for Heavy-Loaded Friction Units / Roik T. A., Gavrysh O. A., Vitsiuk I. I., Khmiliarchuk O. I. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2018. Vol. 56, Issue 9-10. P. 516–522. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9924-x>

44. Kostornov A. G., Fushchich O. I. Sintered antifriction materials // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2007. Vol. 46, Issue 9-10. P. 503–512. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-007-0078-5>

45. Gaponova, O.P.; Antoszewski, B.; Tarelnyk, V.B.; Kurp, P.; Myslyvchenko, O.M.; Tarelnyk, N.V. Analysis of the Quality of Sulfomolybdenum Coatings Obtained by Electrospark Alloying Methods. Materials 2021, 14, 6332. <https://doi.org/10.3390/ma14216332>

46. H. Presting and U. König, Materials Science and Engineering C, 23, Iss. 6—8: 737 (2003).

47. S. M. Hsu, Tribology International, 37, No. 7: 553 (2004).

48. T.B. Massalski Binary alloy phase diagrams/ T.B. Massalski, H. Okamoto. – Ohio: ASM International.-1990. - 370 p.

49. Гнездилова Ю.П. Упрочнение сульфоцианированием электроосажденных железо-молибденовых покрытий для восстановления деталей машин [Текст] / Ю.П. Гнездилова, В.В.Серебровский - Курск: Изд-во КГСХА. - 2008. -143 с.

50. Думанчук М.Ю. Новый способ повышения стойкости против фреттинг-коррозии пакетов гибких элементов упругих муфт / М.Ю.Думанчук //

Компрессорное и энергетическое машиностроение. - №1 (55) – 2019. – С. 24-27.

51. С.С. Тимофеев С.С. Нанесення антифрикційного покриття що містить дисульфід молібдену/ С.С. Тимофеев // Збірник наукових праць УкрДУЗТ, 2015, вип.153. - С. 207-210.

52. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка сталей и сплавов. Монография. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1965. - 493 с.

53. Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Martsynkovskyy V., Dovzhyk M., Dumanchuk M., Goncharenko M., Antoszewski B., Gaponova O. Investigation of Qualitative Parameters of Surface Layers Formed By Stepwise Carburizing and Sulfo-Carburizing of Steel Parts With The Use of Electroerosion Alloying Method. 8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2018. 2018. P. 03TFNMC26. <https://doi.org/10.1109/NAP.2018.8915035>

54. Талах Т.А. Оцінка економічної ефективності функціонування підприємств промисловості України. Економічний форум, 2021, 1(4), 101-108. <https://doi.org/10.36910/6775-2308-8559-2021-4-14>

55. Економіка праці : навчальний посібник [електронний ресурс] / за заг. ред. Г. В. Назарової. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2019. – 330 с.

56. Другов Ю.С., Березкин В.Г. Газохроматографический анализ загрязнённого воздуха. М.: Химия, 1981. 256 с.

57. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс] : підручник для студентів, які навчаються за спеціальностями галузей знань «Автоматизація та приладобудування» / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний, Ю. О. Полукаров, О. В. Землянська ; за ред. О. Г. Левченка. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 420 с.

58. Лупачева Е.А. Труды 1-й Международной научнопрактической конференции. Защита окружающей среды, здоровье. Безопасность в сварочном производстве. 11–14 сентября 2002 г. Одесса. С. 456–466.

59. Левченко О.Г., Лукьяненко А.О., Полукаров Ю.О. Автоматическая сварка. 2011, 1(693), 37–40.

60. ГОСТ 2601-84 Зварювання металів. Терміни та визначення основних понять.
61. ГОСТ 12.0.003-74 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація/
62. Лук'яненко Г.О. Проблеми охорони праці в Україні. 2015, (30), 81–90.
63. Брауде М.З. Охрана труда при сварке в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. 144 с.
64. Третьяков О. В., Зацарний В. В., Безсонний В. Л. Охорона праці : навчальний посібник з тестовим комплексом на CD / за ред. К. Н. Ткачука. — К. : Знання, 2010. — 167 с.
65. Левченко А. Г., Полукаров А. І. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. - К.: Основа, 2014 р. - 352 с.
66. Левченко А. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. - К.: Основа, 2010. - 240 с.
67. Технологічні способи мінімізації шкідливих виділень при зварюванні. О. Г. Левченко. *Інформа-ційний бюлетень з охорони праці*. Київ, ННДІОП, 2007. №1. С. 25–41.
68. Екологічна безпека і контроль: навч. посіб. / С.В. Станкевич, Л.В. Головань, М.Ю. Станкевич; Харків. нац. аграр. ун-т ім. В. В. Докучаєва. – Харків: Видавництво Іванченка І.С., 2022. – 133 с