

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

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство _____

освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство» _____

на тему: «Дослідження структури та властивостей антифрикційних покриттів на сталевих поверхнях, отриманих методом електроіскрового легування» _____

Здобувача групи _____ МТ.м-31 _____ Кошельник Олександр Олексійович

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

_____ Олександр КОШЕЛЬНИК

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

«___» _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Кошельника Олександра Олексійовича

1. Тема проекту (роботи) «Дослідження структури та властивостей антифрикційних покриттів на сталевих поверхнях, отриманих методом електроіскрового легування» затверджена наказом по університету від №1085-VI від 22.10.2024 року.

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.	06.11.2024	11.12.2024
Економічна частина	Берладір Х. В.	06.11.2024	10.11.2024

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 2024	виконано
2	Загальна методика та основні методи дослідження	Листопад 2024	виконано
3	Експериментальні дослідження та обговорення результатів	Листопад - грудень 2024	виконано
4	Економічна частина	Грудень 2024	виконано
5	Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Грудень 2024	виконано

7. Дата видачі завдання _____

Студент _____

(підпис)

Керівник проекту _____

(підпис)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається з 69 сторінок, які містять 2 таблиці, 8 рисунків, список із 67 використаних джерел на 8 сторінках.

Під час експлуатації машини її деталі, вузли та агрегати так чи інакше піддаються тертю і, надалі, зносу. Це призводить до зменшення ефективності роботи трибосполучень і суттєвих енергетичних втрат під час експлуатації. У сучасній техніці необхідно застосовувати більш прогресивні матеріали під час виготовлення пар, що труться. Це зумовлено зростанням питомих навантажень, яких зазнають вироби, збільшенням швидкостей переміщення трибопар одна відносно одної, необхідністю експлуатації машин в агресивному середовищі та за підвищених температур. У зв'язку з цим досить актуальним є питання збільшення надійності трибопар, підвищення їхньої довговічності та зменшення енерговитрат, що витрачаються на тертя. Втрати на тертя в сучасних машинах і устаткуванні сягають 30 % споживаної ними енергії, а витрати на усунення наслідків їхнього зносу в розвинених промислових країнах становлять до 2 % валового національного продукту.

Для зниження витрат на тертя розроблені та успішно застосовуються різні покриття, починаючи від зносостійких з керамічною основою та закінчуючи композиційними на основі металокераміки. Області їх застосування досить великі, але при контакті в режимі сухого тертя, подібні покриття мають високий коефіцієнт тертя. Це призводить до значних енергетичних витрат та небажаного місцевого нагрівання в області контакту трибосполучення. Крім цього, через високий коефіцієнт тертя у цьому випадку суттєво зростає знос трибопари.

Надійність і довговічність більшості виробів сучасної техніки значною мірою залежить від працездатності та терміну служби численних вузлів тертя (трибосистем) різних систем і механізмів машин та їхніх агрегатів. Процеси руйнування деталей машин у переважній більшості випадків починаються з поверхневих зон. У зв'язку з цим величезну значущість мають роботи з розроблення принципово нових антифрикційних матеріалів, зокрема покриттів

з антифрикційними властивостями, які б забезпечували безперебійну роботу важкоавантажених виробів.

Отже, розробка нових видів антифрикційних матеріалів, у тому числі покриттів, призначених для забезпечення безперебійної роботи важкоавантажених деталей, є вкрай актуальним завданням.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування антифрикційних покриттів на сталій підкладці методом електроіскрового легування, що забезпечують зменшення коефіцієнту тертя в трибопарі.

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

1. Провести аналіз відомих методів поверхневого модифікування залізовуглецевих сплавів, що забезпечують зміну їх структури, забезпечення механічних та триботехнічних властивостей, та визначити напрямок досліджень у роботі.

2. Дослідити мікроструктуру і хімічний склад покриття та електродів залежно від параметрів електроіскрового легування.

3. На основі експериментальних досліджень розробити практичні рекомендації щодо призначення оптимальних технологічних режимів електроіскрового легування, що забезпечують функціональні властивості пар тертя.

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

Об'єкт дослідження – процеси одержання на залізовуглецевих сплавах антифрикційних покриттів.

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

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження можуть бути покладені в основу отримання антифрикційних покриттів поверхонь на залізовуглецевих сплавах, шляхом електроіскрового легування.

Ключові слова: покриття, мікроструктура, сталь, антифрикційні властивості.

ABSTRACT

Koshelnyk Oleksandr. Investigation of the structure and properties of coatings on steel surfaces obtained by 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, 2024.

During the operation of a machine, its parts, components and assemblies are subject to friction and subsequent wear. This leads to a reduction in tribological efficiency and significant energy losses during operation.

To reduce the cost of friction, various coatings have been developed and successfully applied, ranging from wear-resistant ceramic-based coatings to composite coatings based on cermets. They have a wide range of applications, but when in contact in dry friction, such coatings have a high coefficient of friction. This leads to significant energy consumption and unwanted localised heating in the contact area of the tribological joint. In addition, the high coefficient of friction causes a significant increase in tribopair wear.

The development of new types of anti-friction materials, including coatings, to ensure the smooth operation of highly stressed parts is an extremely urgent task.

The aim of the work is to establish the regularities of formation of antifriction layers on a steel substrate by the method of electrospark alloying (ESA), which provide a reduction of the coefficient of friction in a tribopair.

In order to achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. To analyse the known methods of surface modification of iron-carbon alloys, which provide a change in their structure, mechanical and tribotechnical properties, and to determine the direction of research in the work.

2. To study the microstructure and chemical composition of the coating and the electrodes as a function of the parameters of the electrospark alloying.

3. On the basis of experimental studies, develop practical recommendations for the determination of optimal technological modes of electrospark alloying, which provide functional properties of friction pairs.

Research methods: experimental studies of microstructure by optical and electron microscopy, determination of microhardness and obtaining its distribution in modified surfaces.

Subject of research: Processes for obtaining antifriction coatings on iron-carbon alloys.

Practical significance of the results. The results of the study can be used as a basis for obtaining antifriction coatings of surfaces on iron-carbon alloys by electrospark alloying.

Keywords: coating, microstructure, steel, anti-friction properties.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	12
1.1 Антифрикційні покриття.....	12
1.1.1 Вуглецевмісні покриття.....	13
1.1.2 Багатофазні композиційні покриття.....	18
1.1.3 Тверді мастила.....	19
1.1.4 Пластичні метали як тверді мастила.....	21
1.2 Способи створення покриттів з особливими властивостями.....	22
1.2.1 Фізичне газофазне осадження покриттів.....	23
1.2.2 Хімічне газофазне осадження покриттів.....	24
1.2.3 Метод наплавлення електронними пучками.....	25
1.2.4 Плазмова наплавка.....	25
1.2.5 Електроіскрове легування.....	27
1.2.6 Лазерна наплавка.....	27
1.3 Висновки.....	28
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	30
2.1 Вибір матеріалу дослідження.....	30
2.2 Технологія електроіскрового легування залізовуглецевих сплавів.....	30
2.3 Устаткування та методика електроіскрової обробки.....	31
2.4 Металографічний аналіз.....	32
2.5 Електронно-мікроскопічні дослідження.....	34
2.6 Дослідження мікротвердості.....	37
2.7 Висновок.....	40
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	41
3.1 Електроіскрове легування.....	41
3.2 Особливості зміни мікроструктури і фазового складу покриття.....	43

	8
3.3 Висновок	45
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	47
Висновок	51
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	52
5.1 Вимоги охорони праці у процесі дифузійної металізації.....	52
5.2 Вимоги охорони праці у процесі очищення деталей.....	52
5.3 Вимоги охорони праці в процесі термообробки імпульсним індукційним нагріванням	53
5.4 Вимоги охорони праці у процесі лазерної термообробки	54
5.5 Охорона довкілля	56
5.6 Висновок	58
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61

ВСТУП

Актуальність роботи. Під час експлуатації машини її деталі, вузли та агрегати так чи інакше піддаються тертю і, надалі, зносу. Це призводить до зменшення ефективності роботи трибосполучень і суттєвих енергетичних втрат під час експлуатації. У сучасній техніці необхідно застосовувати більш прогресивні матеріали під час виготовлення пар, що труться. Це зумовлено зростанням питомих навантажень, яких зазнають вироби, збільшенням швидкостей переміщення трибопар одна відносно одної, необхідністю експлуатації машин в агресивному середовищі та за підвищених температур.

У зв'язку з цим досить актуальним є питання збільшення надійності трибопар, підвищення їхньої довговічності та зменшення енерговитрат, що витрачаються на тертя. Втрати на тертя в сучасних машинах і устаткуванні сягають 30 % споживаної ними енергії, а витрати на усунення наслідків їхнього зносу в розвинених промислових країнах становлять до 2 % валового національного продукту.

Для зниження витрат на тертя розроблені та успішно застосовуються різні покриття, починаючи від зносостійких з керамічною основою та закінчуючи композиційними на основі металокераміки. Області їх застосування досить великі, але при контакті в режимі сухого тертя, подібні покриття мають високий коефіцієнт тертя. Це призводить до значних енергетичних витрат та небажаного місцевого нагрівання в області контакту трибосполучення. Крім цього, через високий коефіцієнт тертя у цьому випадку суттєво зростає знос трибопари.

Надійність і довговічність більшості виробів сучасної техніки значною мірою залежить від працездатності та терміну служби численних вузлів тертя (трибосистем) різних систем і механізмів машин та їхніх агрегатів. Процеси руйнування деталей машин у переважній більшості випадків починаються з поверхневих зон. У зв'язку з цим величезну значущість мають роботи з розроблення принципово нових антифрикційних матеріалів, зокрема покриттів

з антифрикційними властивостями, які б забезпечували безперебійну роботу важкоавантажених виробів.

Отже, розробка нових видів антифрикційних матеріалів, у тому числі покриттів, призначених для забезпечення безперебійної роботи важкоавантажених деталей, є вкрай актуальним завданням.

Актуальність дослідження визначається необхідністю розробки нових складів для формування зносостійких композиційних покриттів з низьким коефіцієнтом тертя, а також встановлення кореляції між структурою сформованих покриттів та їх властивостями.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування антифрикційних покриттів на сталій підкладці методом електроіскрового легування, що забезпечують зменшення коефіцієнту тертя в трибопарі.

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

1. Провести аналіз відомих методів поверхневого модифікування залізовуглецевих сплавів, що забезпечують зміну їх структури, забезпечення механічних та триботехнічних властивостей, та визначити напрямок досліджень у роботі.

2. Дослідити мікроструктуру і хімічний склад покриття та електродів залежно від параметрів електроіскрового легування.

3. На основі експериментальних досліджень розробити практичні рекомендації щодо призначення оптимальних технологічних режимів електроіскрового легування, що забезпечують функціональні властивості пар тертя.

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

Об'єкт дослідження – процеси одержання на залізовуглецевих сплавах антифрикційних покриттів.

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

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження можуть бути покладені в основу отримання антифрикційних покриттів поверхонь на залізовуглецевих сплавах, шляхом електроіскрового легування.

Ключові слова: покриття, мікроструктура, сталь, антифрикційні властивості.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Антифрикційні покриття

Актуальним завданням на сьогодні є зменшення ступеня зносу виробів при експлуатації. Під час роботи деталей, вузлів і агрегатів машин у досить екстремальних умовах (наприклад, за підвищених або, навпаки, дуже низьких температур, радіаційного випромінювання, неможливості систематичного змащування трибосполучень) застосування рідкого змащення для зменшення коефіцієнта тертя найчастіше вкрай неефективне.

У зв'язку з цим необхідно проводити комплексні дослідження з пошуку нових антифрикційних матеріалів, які покращують експлуатаційні характеристики виробів. Перспективним способом отримання необхідних характеристик деталі, що працює в умовах інтенсивного тертя, є з'єднання різнорідних матеріалів, що відрізняються властивостями, в єдиний виріб, наприклад, шляхом утворення покриття. При цьому основу виробу виготовляють із матеріалу, який підбирають з урахуванням необхідних міцнісних характеристик і вимог до працездатності конструкції загалом, а тонкий поверхневий шар формують з іншого матеріалу, що забезпечує часто унікальні властивості.

Тому в більшості випадків нанесені тонкі покриття забезпечують необхідну сукупність експлуатаційних характеристик виробу. Залежно від мети, модифікування поверхні покриття можуть забезпечити підвищення зносостійкості деталі, збільшення її твердості, створення хімічно стійких шарів, зміни оптичних характеристик і т.п.

Функціональні покриття умовно поділяють на «м'які» та «тверді». До «м'яких» покриттів відносять як твердозмащувальні композиції на полімерній основі, так і «м'які» метали, природні шаруваті матеріали типу графіту та дихалькогеніди перехідних металів, що мають знижений коефіцієнт тертя, але

відносно невисоку зносостійкість. До «твердих» відносяться покриття на основі твердих сплавів, керамік і тугоплавких сполук, які мають високу зносостійкість, але мають відносно великий коефіцієнт тертя.

Використання покриттів у трибосполученнях різних деталей, вузлів та агрегатів машин є одним з перспективних способів зниження коефіцієнта тертя та зменшення зносу виробів. Крім основної мети створення покриттів на деталях – підвищення терміну безаварійної роботи – вироби з покриттями мають інші переваги [1]:

- через збільшення зносостійких властивостей ріжучого інструменту з покриттями спостерігається підвищення швидкості різання і, як наслідок, збільшення продуктивності;

- внаслідок зниження коефіцієнта тертя зменшуються витрати енергії, які необхідні для роботи механізму; також з'являється можливість знизити норму використання (або навіть взагалі відмовитися) мастильно-охолоджуючих рідин;

- при наявності покриттів в трибопарі знижується захоплення контртіл, при обробці різанням знижується налипання матеріалу, що обробляється на поверхню ріжучого інструменту і т.п.

1.1.1 Вуглецевмісні покриття

Як один з компонентів таких покриттів використовується якась із форм вуглецю, найбільш поширеною з яких є графіт. Структура графіту є сукупністю атомних площин, що знаходяться в дуже слабкому хімічному зв'язку між собою, але при цьому атоми вуглецю в рамках однієї атомної площини мають дуже сильний ковалентний зв'язок. Таким чином, через шарувату структуру графіт знаходить застосування як антифрикційний матеріал у різних галузях машинобудування [2].

З усіх антифрикційних матеріалів на основі вуглецю найбільш добре вивчені алмазоподібні вуглецеві покриття (так званих DLC-покриттів) мають різну структуру і мають гарні трибологічні властивості та механічні

характеристики [3-5], що залежать від способу їх отримання, технологічних параметрів та концентрації вуглецевої складової.

Наприклад, аморфні вуглецевмісні (а-С) покриття високої якості в даний час часто отримують шляхом вакуумно-дугового випаровування з подальшим осадженням і фільтрацією [6]. Трибологічні властивості таких покриттів здебільшого залежать від характеру зв'язків між атомами вуглецю. Мікротвердість нанесених покриттів лежить в межах від 50 до 60 ГПа, модуль пружності становить від 400 до 600 ГПа, а коефіцієнт тертя сталі в режимі сухого тертя має значення порядку 0,05 – 0,1, і великою мірою залежить від навколишнього газового середовища у процесі випробування [7]. Ефективність використання а-С покриття як матеріала з антифрикційними властивостями помітно зменшується при підвищенні температури експлуатації через перехід sp^3 зв'язків в sp^2 . Такий перехід викликає збільшення коефіцієнта тертя та, як наслідок, зменшення ступеня зносостійкості виробу з покриттям [8].

Відносно нещодавно розроблений і успішно застосовується новий клас вуглецевмісного матеріалу, який не поступається а-С покриттями за своїми антифрикційними та зносостійкими властивостями. Таким класом матеріалів став аморфний нітрид вуглецю (CN_x). Як покриття нітрид вуглецю став широко використовуватися на жорстких дисках пам'яті і практично витіснив а-С покриття з цієї сфери. Авторами роботи [9] також встановлено унікальну еластичність нітриду вуглецю CN_x з фулереноподібною структурою. Спочатку CN_x отримували магнетронним розпорошенням [10]. В отриманому матеріалі було близько 20 атомних % азоту, а самі атоми були пов'язані в основному за типом sp^2 . Структура матеріалу була яскраво вираженою пластинчастою. Мікротвердість знаходилася в межах від 10 до 20 ГПа, а модуль пружності матеріалу становив близько 40-120 ГПа. При випробуваннях на повітрі було визначено коефіцієнт, який становив близько 0,3 [11, 12].

Авторами роботи [13] проведено порівняння а-С покриттів та плівок з нітриду вуглецю, які були отримані вакуумно-дуговим випаром вуглецю у середовищі азоту. Покриття а-С були отримані дуговим способом, при цьому

атоми в покритті були з'єднані в основному типу sp^3 зв'язку. У плівках CN_x , навпаки, встановлено наявність значної кількості sp^2 зв'язків, що сигналізує про знаходження графітової складової в розупорядкованому вигляді. Виходячи з аналізу робіт [14], ця обставина свідчить про утворення своєрідних графітових кластерів нанометрового розміру в аморфній матриці покриття

Визначення антифрикційних і зносостійких властивостей цих покриттів в режимі тертя ковзання сталі показали, що а-С плівки мають відносно низький коефіцієнт тертя (порядку 0,1), тоді як коефіцієнт тертя плівок з нітриду вуглецю має значення порядку 0,3. Дане дослідження показало, що наявність азоту в покритті призводить не просто до зміни типу атомних зв'язків та структури матеріалу, а й значно впливає на антифрикційні характеристики.

Після визначення антифрикційних властивостей а-С покриття на поверхні контртіла (сталеві кульки) встановлено наявність графітоподібної плівки, сформованої найімовірніше з продуктів зносу. Утворення подібної захисної плівки внаслідок ковзання контртіла по а-С покриття підтверджується й іншими дослідниками. Пояснюється цей факт фазовим переходом атомних зв'язків із sp^3 у sp^2 вид [15]. У випадку випробування плівок з нітриду вуглецю явних слідів продуктів зносу на сталевій кульці не зафіксовано, а поверхня контртіла схильна до яскраво вираженого абразивного зносу. При заміні контртіла на кульку з карбїду кремнію у разі випробувань на повітрі трибологічні характеристики покриттів в обох випадках значно не змінилися, але в атмосфері інертного газу дослідники зафіксували значне зменшення коефіцієнта тертя до 0,03 – 0,04 у разі випробувань покриттів з нітриду вуглецю, при цьому покриття з а-С мали коефіцієнт тертя до 0,7. Такий низький коефіцієнт тертя покриттів з нітриду вуглецю в парі з кулькою з карбїду кремнію пояснили присутністю значної кількості графітоподібного вуглецю в аморфному стані як на поверхні кульки, так і в продукті зносу.

Розвитком досліджень покриттів на основі нітриду вуглецю стали багатошарові плівки CN/MeN_x . В даний час розроблені покриття CN/NbN [16], CN/ZrN [17] і CN/TiN [18], напилені магнетронним розпиленням вуглецевої та

металевих (титанової, цирконієвої, ніобієвої) мішеней. Наприклад, авторами роботи [19] проведено трибологічні дослідження плівок CN/ZrN та CN/NbN із застосуванням як контртіла кульки зі сталі та нітриду кремнію. Випробування здійснювали при температурах до 500 °С. У результаті трибологічних досліджень плівки з C-N/N/NbN встановлено, що коефіцієнт тертя становив близько 0,2 та істотно не змінювався як за зміни контртела, так і за зміни. Плівки на основі C-N/ZrN і з C-N/TiN [20] мали коефіцієнт тертя порядку 0,2-0,3.

У роботах [21, 22] встановлено, що додавання вуглецю до складу плівок з Ti-CN, Ti-Al-N, Ti-Al-CN, Ti-Si-C-(N) та Ti-BC позитивно впливають на поліпшення антифрикційних властивостей покриттів. Наприклад, автори [23] проводили дослідження покриттів на основі Ti-CN. Встановлено, що додавання вуглецю до складу плівок з нітриду титану призводить до зниження коефіцієнта тертя зі значень порядку 0,7...0,8 до 0,25. Дослідження антифрикційних властивостей покриттів на основі Ti-CN за допомогою сталеві кульки показали, що зі зростанням температури випробування понад 100°C коефіцієнт тертя збільшується зі значень 0,2 до значень порядку 0,5. Під час аналогічних досліджень цих плівок кулькою з нітриду кремнію встановлено, що при температурі 20 °С коефіцієнт тертя мав значення порядку 0,2; зі збільшенням температури до 200 °С зафіксовано збільшення коефіцієнта тертя до значень порядку 0,5; при збільшенні температури до 400 °С встановлено зменшення коефіцієнта тертя до значень порядку 0,25.

З урахуванням позитивного впливу кремнію на трибологічні характеристики покриття різними авторами здійснювалися дослідження щодо впливу кремнію на антифрикційні характеристики покриттів з Ti-C-(N). Так, автори роботи [24] отримували плівки типу Ti-Si-CN за допомогою осадження газів у реакторі. Встановлено, що зі збільшенням відсоткового змісту Si у складі покриття коефіцієнт тертя сталі знижувався до значень порядку 0,2.

Автори роботи [25] провели порівняльне дослідження антифрикційних характеристик плівок з TiSiN та TiSiCN за різних температур.

Покриття, що мають у своєму складі вуглець, мали значно менший коефіцієнт тертя як при кімнатній температурі (значення коефіцієнта тертя зменшилися з $\sim 0,75$ до $0,35$), так і при підвищеній температурі (коефіцієнт тертя знизився з $0,55$ до $0,3$). Автори пояснили зниження коефіцієнта тертя покриттів Ti-Si-CN перенесенням вуглецю з плівки зразка на поверхню контртіла. Тому покращення антифрикційних характеристик плівки з Ti-Si-CN можна пов'язати з додатковим введенням вуглецю в покриття Ti-Si-N. Через це утворюється аморфний вуглець, який виконує роль твердого мастила у зоні контакту. При цьому, через високі показники твердості плівки на основі Ti-Si-CN зона локального контакту покриття та контртіла при терті дуже незначна. В результаті спільної дії цих двох факторів коефіцієнт тертя знижується.

У разі, якщо під час визначення антифрикційних властивостей збільшувати температуру проведення випробувань, зразки з покриттями обох типів (як Ti-Si-N, так і Ti-Si-CN) демонструють подальше зменшення коефіцієнта тертя. Авторами цієї роботи зроблено припущення, що цей ефект пов'язаний із формуванням додаткової кількості твердого мастила на основі оксидів кремнію в зоні локального контакту.

Плівки на базі Ti-Al-N мають відмінні фізико-механічні властивості, але показують відносно великий коефіцієнт тертя під час випробувань за кімнатної температури. Авторами роботи [26] проведено порівняльні випробування покриттів на базі Ti-Al-N і покриттів на основі Ti-Al-N з додатковим введенням вуглецю до складу плівки. Встановлено, що при додаванні до складу покриття вуглецю коефіцієнт тертя зменшується зі значень $0,75$ до $0,25$. Під час випробування зразків із покриттями Ti-Al-N спочатку в ділянці контакту утворюється трибошар із продуктів зносу контртіла (сталеві кульки). Формування подібного трибошару веде до абразивного зносу контртіла і, в результаті, до великих значень коефіцієнта тертя. Під час випробування покриттів на основі Ti-Al-N, легованих вуглецем, відбувається виключно абразивне зношування матеріалу покриття.

Таким чином, введення до складу покриття вуглецю позитивно впливає

на трибологічні властивості поверхні.

1.1.2 Багатофазні композиційні покриття

У зв'язку з розвитком технологій створення покриттів нині вдається формувати наноконпозиційні покриття, що складаються з кількох компонентів. Так, автори роботи [27] отримали покриття на основі $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Au}/\text{MoS}_2/\text{C}$ за допомогою магнетронного напилення, поєднаного з методом лазерної абляції. Даний тип покриття розроблявся для експлуатації за різних умов, тому покриття випробовувалися за звичайних атмосферних умов, серед азоту, при високій концентрації вологи в повітрі, а також при підвищених температурах. В результаті випробувань встановлено, що для досягнення високих показників антифрикційних властивостей покриття слід використовувати багатофазний склад виду $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.47}(\text{Au})_{0.15}(\text{MoS}_2)_{0.24}\text{C}_{0.12}$. У разі збільшення вмісту в покритті вуглецю або оксиду алюмінію підвищується значення коефіцієнта тертя, але збільшуються зносостійкі характеристики плівки. При цьому, при збільшенні відсоткового вмісту в покритті м'якшого золота зносостійкі властивості напиленого покриття різко знижуються. Додавання до складу покриття дисульфиду молібдену призводить до його виділення в трибошарі під час випробувань. Крім фази MoS_2 у зоні локального контакту формується плівка з вуглецю, внаслідок чого значно змінюється коефіцієнт тертя. Виходячи з вищевикладеного, дисульфід молібдену вуглець і золото значно збільшують антифрикційні властивості зразків з покриттями, а оксид алюмінію надає плівкам необхідної твердості та забезпечує зносостійкість.

Ще однією розробкою багатокомпонентних покриттів є робота [28], автори якої досліджували плівки на основі $\text{Mo}_2\text{N}/\text{MoS}_2/\text{Ag}$, одержані магнетронним напиленням. Трибологічні характеристики покриття визначали при терті з кулькою з нітриду кремнію. Коефіцієнт тертя залишався на рівні (0,4 – 0,6) при випробуваннях в умовах кімнатної температури, проте зменшувався до значень порядку 0,3 зі збільшенням температури випробувань до 350 °C і досягав 0,1 за температури 600 °C. Зниження коефіцієнта тертя

обумовлювалося формуванням фаз молібдату срібла, які мають низький коефіцієнт тертя через відносно слабку міжатомну взаємодію в системі Ag–O, зв'язки в якій руйнуються під час тертя та здійснюється ковзання одних атомних площин по відношенню до інших.

1.1.3 Тверді мастила

Однією з найпоширеніших твердих мастил, що знайшла застосування в промисловості, є мастило на основі дисульфиду молібдену [29, 30]. Через будову своїх кристалічних ґраток у цьому матеріалі легко здійснюється переміщення атомних площин по відношенню один до одного, при цьому, в рамках однієї площини атоми пов'язані сильним ковалентним зв'язком.

Внаслідок багатьох досліджень встановлено, що в області локального контакту відбувається переорієнтування зерен MoS_2 . Плівки дисульфіда молібдену, отримані вакуумним осадженням, мають відносно низьку питому щільність і мають стовпчасту структуру [31]. При цьому орієнтація атомних площин така, що вони, маючи відносно велику поверхневу енергію, в процесі випробування налипають на контртіло [32]. Під час проведення випробування відбувається часткове зношування плівки з дисульфіду молібдену, при цьому, в доріжках зношування утворюється трибошар, який сприяє збереженню низького коефіцієнта тертя навіть у разі повного зношування покриття. Характерний коефіцієнт тертя при випробуванні на повітрі для плівок з дисульфіду молібдену знаходиться в межах 0,15...0,3 і залежить від структури покриття.

В умовах реальної експлуатації на плівку з MoS_2 адсорбуються водяні пари, що призведе до зниження когезійних властивостей покриття та формування оксидних складових, що абразивно руйнують покриття з дисульфіду молібдену. Однак, частки оксидних складових під час трибологічних випробувань, як правило, не налипають на кульку. Для того, щоб зменшити адсорбційні процеси водяної пари, збільшують щільність плівки або знижують вільну поверхневу енергію.

Для зниження коефіцієнта тертя та підвищення зносостійкості виробу до складу покриттів додатково вводять менше 10 ат. % будь-яких металів. Цей ефект пов'язаний (який найбільше виявляється при додаванні нікелю) з підвищенням щільності покриття при одночасному збільшенні його твердості [33]. Крім цього, поліпшення антифрикційних властивостей твердих мастил (наприклад, MoS_2 , WS_2 , MoSe_2 , NbSe_2 та MoTe_2) у разі легування такими металами як золото або свинець пов'язане зі збільшенням міжплощинних відстаней елементарних осередків, внаслідок чого ковзання площин одна щодо одної полегшується.

Крім легування металами до складу твердих мастил додають вуглець, що також підвищує антифрикційні характеристики. Комплексне легування (вуглецем і металами) знижує дифузію всередину покриття, знижуючи тим самим окислювальні процеси в покритті.

Поліпшення трибологічних характеристик покриття можна домогтися також шляхом зміни самої мікроструктури плівки. Наприклад, авторами роботи [34] показано, що під час додавання до складу покриттів з MoS_2 оксиду сурми починає формуватися багат шарова структура, що складається з нанорозмірних шарів дисульфиду молібдену та більш твердих шарів з оксиду сурми Sb_2O_3 . Таким чином, у цьому випадку реалізується ефективний спосіб підвищення антифрикційних характеристик виробу, що полягає в отриманні покриттів із шарами твердих і антифрикційних компонентів, що чергуються.

В даний час розроблено та досліджено покриття на основі Ti-MoS_2 [35], TiN-MoS_2 [36], Ti-SiN-MoS_x [37], $\text{TiB}_2\text{-MoS}_2$ [38] та інші.

З двошарових покриттів слід відмітити системи WSe_x/TiC , $\text{WSe}_x/\text{Ti-CN}$ та $\text{WSe}_x/\text{Ti-Si-N}$. У цих покриттях верхній шар є нанорозмірними фазами nc-WSe_2 і $\text{nc-W}_3\text{O}$, які відносно рівномірно розподілені по аморфній матриці з a-WSe_x [39]. Трибологічні характеристики покриттів відрізняє низький коефіцієнт тертя, значення якого на рівні 0,015...0,07. При цьому, на відміну від плівок з дисульфиду молібдену, двошарові нанорозмірні покриття не вимагають припрацювання трисполучень через стабільність коефіцієнта тертя вже на

цьому етапі.

Серед багатошарових антифрикційних покриттів також слід відзначити композиційні наночарові покриття на основі TiCrBN/WSe_x з кількістю фази WSe_x , що варіюється, [40]. Ці плівки за незначного вмісту WSe_x (близько 5%) мали структуру, схожу з морфологією покриттів на основі Ti-Cr-B-N , а в разі збільшення відсоткового вмісту м'якої фази WSe_x до 10% структура зазнає значних змін: зерна подрібнюються, ймовірно, через зростання об'ємної частки аморфної фази. Коефіцієнт тертя плівок на основі Ti-Cr-BN/WSe_x зменшувався зі збільшенням вмісту у складі покриття вольфраму і селену. Так, при додаванні до покриття 10 ат% WSe_x коефіцієнт тертя має значення порядку 0,2, що у 2,5 рази менше, ніж у вихідного покриття на основі Ti-Cr-BN . Зносостійкі властивості покриттів обох складів (Ti-Cr-BN та Ti-Cr-BN/WSe_x) залишалися приблизно на одному рівні.

1.1.4 Пластичні метали як тверді мастила

Найбільш комплексно досліджено застосування як антифрикційних матеріалів використання срібла та золота. Насамперед це пов'язано з практично повним збереженням фізико-механічних властивостей цих металів незалежно від довкілля та діючих температур. Як тонкі плівки на поверхні виробу ці метали знайшли застосування в рентгенівських трубках і в вузлах апаратів аерокосмічної техніки, оскільки можуть експлуатуватися довгі роки в глибокому вакуумі без втрати своїх антифрикційних властивостей.

Авторами роботи [41] встановлено, що плівки з м'яких металів, таких як золото і срібло, нанесені поверх відносно твердих матеріалів, призводять до зниження зсувних навантажень у процесі тертя, у той час як матеріал основи добре сприймає нормальні навантаження грає роль демпфера. Таким чином, ці покриття, що поєднують у собі м'які та тверді шари, мають значно нижчий коефіцієнт тертя, ніж тверді одношарові покриття [42]. При цьому дослідники встановили оптимальну товщину м'якого шару, який необхідно нанести на тверде покриття. Товщина шару м'якого металу залежить від вихідної

шорсткості підкладки і становить близько 300...1000 нм. У разі збільшення м'якого шару понад 1000 нм нормальна складова навантаження розподілялася поверхнею з м'якого металу, внаслідок чого м'які шари покриття вдавлювалися. У разі витримування оптимальної товщини м'якої плівки коефіцієнт тертя мав значення порядку 0,2...0,4.

При формуванні антифрикційних покриттів на основі срібла ще однією перевагою є той факт, що через нерозчинність Ag у решітках нітридів і карбідів металів відбувається подрібнення мікроструктури покриття, що напилюється, внаслідок чого покращуються його механічні характеристики. Автори робіт [43, 44] досліджували механізми формування трибошару у плівках складу CrN – 22 % Ag, напилюваних способом магнетронного розпилення. Визначення антифрикційних характеристик покриттів за схемою «диск – колодка» з контртілом з оксиду алюмінію показало кореляцію коефіцієнта тертя від температури основи під час відпалу після напилення та від температури безпосередньо випробування. Якщо різниці цих температур вистачає для дифундування срібла до поверхні покриття, то через утворення трибошару зі срібла в процесі випробування значення коефіцієнта тертя знижуються до величин до 0,16...0,24.

У роботі [45] досліджували можливість застосування золота як складової до створення покриттів з антифрикційними властивостями. Плівки з урахуванням системи «алюміній-золото» отримували магнетронним осадженням. В результаті трибологічних випробувань при використанні контртела кульки з оксиду алюмінію встановлено, що коефіцієнт тертя таких покриттів досягає значень порядку 0,4 – 0,5.

1.2 Способи створення покриттів з особливими властивостями

Для нанесення покриттів з антифрикційними властивостями, а також додаткового введення в них будь-яких елементів в даний час використовуються наступні способи.

1.2.1 Фізичне газофазне осадження покриттів

Фізичне газофазне осадження (physical vapor deposition, PVD) є сукупністю способів формування плівок у вакуумі, в яких вони наносяться в результаті конденсації з газу, одержуваного при випаровуванні або розпиленні матеріалу мішені. PVD-методи засновані на фізичному ефекті випаровування або розпилення матеріалу катода у вакуумну камеру з подальшою подачею будь-якого реакційного газу (азоту, кисню, CN_4 та ін) в неї. Завдяки плазмохімічній взаємодії реакційного газу та іонізованого потоку плазми на підкладці відбувається конденсація покриття.

Серед методів найбільшого поширення набули: вакуумно-дугова конденсація матеріалу з іонним бомбардуванням, магнетронне розпилення та іонне плакування (нанесення шару термомеханічним способом).

Відносно висока швидкість осадження і можливість широкого варіювання складів матеріалу, що напильється, поєднуються в методиці PVD з відносно простою конструкцією і легкістю в застосуванні магнетронних систем, що і обумовлює широке поширення цих методів при отриманні покриттів [46].

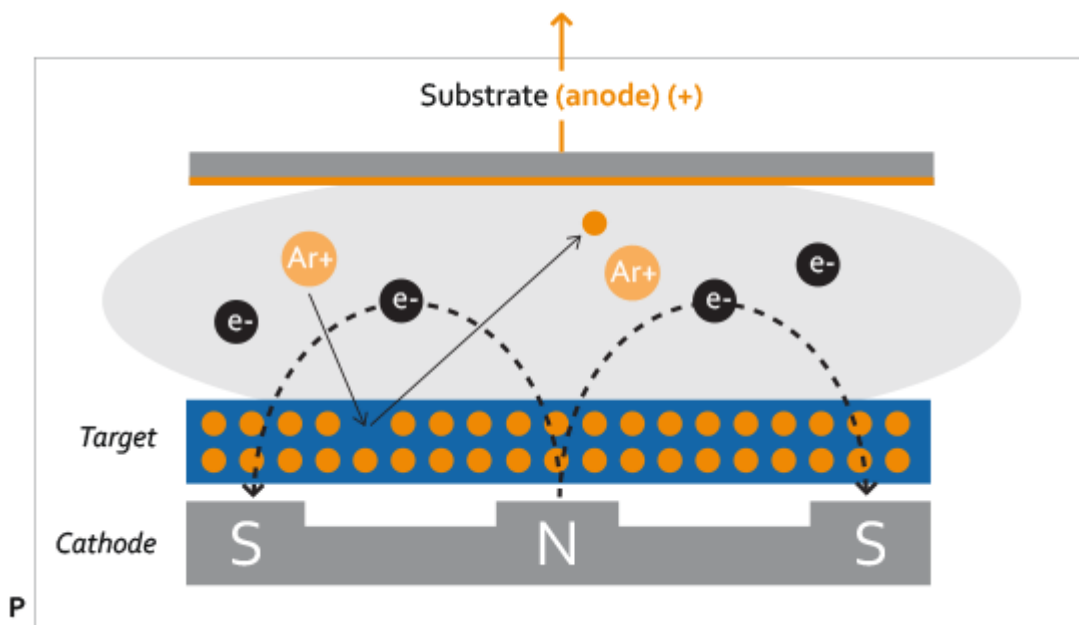


Рисунок 1.1 – Схема магнетронного напилення [47]

Магнетрон являє собою пристрій з катодом, що розпилюється, в якому використовується розряд у схрещених електричному і магнітному полях

(рис.1.1). Як джерело атомів вуглецю при отриманні алмазоподібних покриттів використовуються, як правило, графітові катоди. Комбінація електромагнітних полів дозволяє утримувати електрони, утворюючи електростатичні пастки, за рахунок чого досягається замкнутість траєкторій їх руху, завдяки чому збільшується щільність плазмового розряду та досягається безперервний режим роботи напилювального обладнання з плоскопаралельними електродами. Це дозволяє досягати високих швидкостей розпилення покриттів (десятки мкм/год) за досить невеликих показників тиску робочих газів (близько 0,1 Па). При цьому швидкість напилення при магнетронному розпиленні в 50...100 разів більша в порівнянні з діодним напиленням або розпиленням іонного пучком. Така швидкість досягається за рахунок більш високої щільності іонного струму, що досягається завдяки локалізації плазми поверхневих шарів мішені за допомогою сильного магнітного поля [48].

1.2.2 Хімічне газофазне осадження покриттів

Процес хімічного газофазного осадження (chemical vapour deposition, CVD) складається з хімічної реакції в газовій фазі, що протікає над поверхнею виробу, і завдяки якій на підкладку осаджується кінцевий продукт реакції.

Усі CVD-методи створення алмазоподібних плівок вимагають застосування плазмово-асистованої активації вихідного вуглецевмісного матеріалу. До них можна віднести термічний метод (наприклад, за допомогою гарячої дротяної ниткою), плазмовий спосіб (за допомогою плазми тліючого розряду, НВЧ-плазми або високочастотної плазми), використання плазмового горіння (плазмові пальники) [49].

При нанесенні алмазоподібних покриттів, як правило, температура підкладки підтримується в діапазоні 1000...1400 К. Покриття, що утворюються, виявляють полікристалічну структуру, що змінюється в залежності від конкретних умов отримання. Швидкість напилення та приросту товщини покриття змінюється в залежності від способу осадження, при цьому збільшення швидкості напилення може бути одержане виключно внаслідок

втрати якості покриття. Способи напилення алмазних та алмазоподібних плівок внаслідок спалювання вуглеводнів відносно нетривалі та призводять до швидкого зростання товщини покриття (порядку 100–1000 мкм/год), проте покриття у цих випадках збільшується у будь-яких локальних зонах, що веде до формування покриття низької якості.

1.2.3 Метод наплавлення електронними пучками

За допомогою наплавлення електронним променем (НЛП) на поршні вдається сформувати рівномірні по товщині шари наплавленого металу, при цьому основний метал піддається мінімальному проплавленню покриттів. Адгезійні властивості наплавлених за допомогою електронного променя покриттів перебувають на рівні металевих зв'язків, у зв'язку з цим, випадки їхнього відшаровування або розтріскування під впливом інтенсивних навантажень досить рідкісні [50].

У разі використання електронних пучків досить низьких енергій (порядку 5 кеВ), через поєднання переваг вакуумного захисту ванни розплавленого металу та застосування порошкових матеріалів, метод дозволяє отримувати зміцнені шари (на поверхнях різних деталей дизелів) з високим рівнем фізико-механічних властивостей [51].

Також перевагою методу електроннопроменевого наплавлення є можливість багаторазового наплавлення після перешліфування вже раніше відновлених деталей.

Серед недоліків цієї технології можна відзначити необхідність застосування електронно-променевих камер. Це спричиняє вимогу ретельної підготовки деталей перед наплавленням, наприклад, їх очищення від забруднень. При цьому, необхідність створення вакууму суттєво зменшує продуктивність процесу електроннопроменевої наплавки.

1.2.4 Плазмова наплавка

Технологія нанесення покриття плазмовим наплавленням, заснована на

нанесенні наплавного шару на основний метал за допомогою плазмового пальника, обладнання для підведення плазмоутворюючого газу, захисного газу та охолоджувальної води. Плазмоутворюючими газами можуть бути аргон, азот, кисень. Як захисний газ, що сприяє поліпшенню формування наплавленого металу та зменшенню розбризкування, може використовуватися аргон, азот, вуглекислий газ або повітря. Для наплавлення застосовують матеріали – порошки крем'янисті, марганцеві, керамічні, присадочні дроти з кольорових та чорних металів [52]. Плазмовий пальник складається з корпусу та сопла. У верхній частині пальника знаходиться електрод. На початку процесу напруга подається на електрод, запалюється чергова дуга, яка відключається при запалюванні дуги між електродом і виробом. На електрод подається «мінус», на виріб «плюс». Чергова дуга створює іонізацію плазмоутворювального газу.

Процеси плазмового наплавлення, які переважно застосовуються при ремонті, можна розбити на дві основні групи, які розглядають способи введення наплавного матеріалу. Перша група – це способи, що ґрунтуються на застосуванні присадкового матеріалу у вигляді порошку, які можуть здійснюватися за трьома типами: по шару крупнозернистого порошку, попередньо насипаного на поверхню, що наплавляється, а плазмова дуга прямої дії розплавляє його; з подачею порошку у зварювальну ванну; вдуванням порошку в дугу з плавленням його в цій дузі та перенесенням на поверхню деталі, заздалегідь підігріту та оплавлену дугою прямої дії. Подача порошку здійснюється транспортуючим газом під тиском, який потім бере участь у плазмовому процесі. До другої можна віднести способи, засновані на застосуванні розплавлення присадним дротом, що переходить на поверхню, що наплавляється виробу у вигляді крапель, а в разі необхідності використання великих струмах - у вигляді струменя. У цьому випадку поверхню підкладки необхідно нагрівати до температури, порівнянної з температурою плавлення використовуваного присадного матеріалу [53].

Тим не менш, при наплавленні масивних деталей теплоти, що

переноситься на поверхню підкладки рідким присадковим матеріалом, не завжди достатньо.

1.2.5 Електроіскрове легування

Технологія електроіскрового легування (ЕІЛ), заснована на явищі полярного перенесення матеріалу анода (електроду) на виріб (катод) у результаті імпульсного перебігу розрядів у газовому середовищі. Особливостями процесу є можливість формування шарів із великим діапазоном фізико-хімічних властивостей, варіюючи електричними режимами. У тому числі матеріалами електродів можна змінювати структуру і фазовий склад шарів, що формуються. Для шару легування застосовують ванадій, цирконій, алюміній, карбід молібдену та вольфраму. ЕІЛ створює підвищення твердості, корозійної стійкості, триботехнічних характеристик. Недоліком є висока шорсткість нанесеного шару, яка при самих «м'яких» режимах досягає 3,2 Ra. Також нестаціонарні процеси нагрівання в зоні імпульсного розряду є причиною появи в шарах залишкових напружень, що тягне за собою зниження втомної міцності.

1.2.6 Лазерна наплавка

Технологія нанесення покриття лазерним наплавленням заснована на розпилюванні наплавного матеріалу на основний метал із застосуванням лазерного променя – висококонцентрованого джерела нагріву. Необхідність такої технології виникає при наплавленні різнорідних металів. З цього погляду перспективним є застосування лазерного променя, який дає змогу забезпечити точне дозування енергії, що вводиться в метал, роздільно регулювати нагрів і плавлення основного і присадного матеріалів, а також звести до мінімуму перемішування [54].

Процеси лазерного наплавлення покриттів можна розділити на дві основні групи, які розглядають способи введення наплавного матеріалу в зону впливу випромінювання. Перша група – це способи, засновані на плавленні

попередньо розміщеного наплавного матеріалу на поверхні виробу, що обробляється. Як наплавний матеріал застосовують прутки, стрічки. До другої можна віднести способи, при яких наплавний матеріал подається до зони впливу випромінювання безпосередньо в процесі обробки.

Однак застосування такої технології потребує дорогого обладнання. Покриття створюють підвищення корозійної стійкості та триботехнічних характеристик. У випадках при застосуванні відповідних матеріалів, що наплавляються, незначно підвищується втомну міцність

1.3 Висновки

З проведеного огляду можна зробити такі висновки.

В даний час розроблені та успішно застосовуються антифрикційні покриття, що мають у своєму складі різні компоненти. Більшість дослідників для зниження коефіцієнта тертя вводять у покриття вуглець у якійсь із його форм.

Для створення сучасних антифрикційних покриттів можливе застосування нових матеріалів – наноструктурованих порошків та рівномірно розподілені в металевій матриці ультрадисперсні частинки. Особливе положення як функціональна фаза в композиті займають вуглецеві структури, такі як графени, оніони, нанотрубки, наноалмази і фулерени C₆₀. Зважаючи на їх малі розміри, ці частки мають високі показники міцності та інших властивостей, а використання їх як зміцнюючої фази дозволить створити композиційні матеріали, що мають унікальний комплекс фізико-механічних властивостей.

Покриття, що підвищують трибологічні властивості виробів, можна отримати різними методами. Для вирішення задачі підвищення антифрикційних властивостей робочих поверхонь пропонується застосувати спосіб електроіскрового легування. Такі покриття, що набули широкого поширення в машинобудуванні, відрізняються від покриттів, отриманих іншими способами, насамперед якістю: високою твердістю, зносо-, жаро- та

ерозійною стійкістю, що визначає їхню перспективність застосування на відповідальних деталях машин.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування антифрикційних покриттів на сталій підкладці методом електроіскрового легування, що забезпечують зменшення коефіцієнту тертя в трибопарі.

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

1. Провести аналіз відомих методів поверхневого модифікування залізвуглецевих сплавів, що забезпечують зміну їх структури, забезпечення механічних та триботехнічних властивостей, та визначити напрямок досліджень у роботі.

2. Дослідити мікроструктуру і хімічний склад покриття та електродів залежно від параметрів електроіскрового легування.

3. На основі експериментальних досліджень розробити практичні рекомендації щодо призначення оптимальних технологічних режимів електроіскрового легування, що забезпечують функціональні властивості пар тертя.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір матеріалу дослідження

Проблема раціонального вибору матеріалів в умовах розширення обсягів їх використання не втрачає своєї актуальності. Раціональний вибір матеріалів дає змогу не тільки знизити собівартість виробів, а й підвищити надійність, продуктивність і конкурентоспроможність машин і механізмів, які випускаються, за умови зменшення їхньої маси та габаритів.

Сучасний стан промисловості вимагає комплексного рішення при виборі матеріалу і способів його обробки. Нині рівень розвитку техніки призводить до того, що відпадає потреба у виробках з високим ресурсом роботи з огляду на їхнє моральне зношування. Однак необхідно мати надійні в усіх відношеннях вироби, здатні гарантовано відпрацювати заданий ресурс за оптимальних витрат.

Загальновідомо, що надійність деталей визначається поєднанням двох груп факторів і може бути виражена добутком надійності конструкції та надійності матеріалу.

У наш час сталь, завдяки таким якостям, як твердість, міцність та ін., є найважливішим матеріалом, який широко використовують у машинобудуванні, автомобілебудуванні, будівництві та багатьох інших галузях промисловості.

2.2 Технологія електроіскрового легування залізвуглецевих сплавів

Експлуатаційні характеристики (зносостійкість, корозійна стійкість, опір втоми) деталей машин і механізмів залежать від структури поверхневих шарів, яка визначається технологією формування, природою використовуваного матеріалу. Виходячи з наявних у літературі даних, встановлено досить тісну кореляцію між якістю поверхневого шару та експлуатаційними характеристиками виробів, що застосовуються в машинобудуванні та інших галузях техніки. Показано, що оптимальні за якістю поверхневі шари виробів

повинні мати високу твердість, дрібнодисперсну структуру, низькі значення шорсткості з великою площею опорної поверхні. Формування даних поверхневих шарів з необхідними технічними характеристиками для деталей різного призначення, які експлуатуються у важко навантажених умовах за високих ударних навантажень, корозійно-механічного зношування досягається шляхом застосування методів легування та модифікування поверхневих шарів.

Одним з ефективних методів збільшення експлуатаційного ресурсу деталей машин і механізмів є застосування методів електрофізичного впливу на оброблювану поверхню. Одним із таких методів є електроіскрове легування (ЕІЛ) струмопровідних матеріалів, створене в СРСР у 40-х роках минулого століття Б. Р. Лазаренком і М. І. Лазаренком. ЕІЛ ґрунтується на явищі електричної ерозії та перенесення матеріалу анода на поверхню катода-деталі під час протікання імпульсних (іскрових) розрядів у газовому середовищі (повітрі, аргоні, азоті та ін.) [55].

2.3 Устаткування та методика електроіскрової обробки

Електроіскрова обробка виконувалася на установці моделі Елітрон-52А (рис. 2.1). До таблиці 2.1 занесені режими роботи цієї установки.

Як оброблювальні електроди використовували стрижні діаметром 4 мм з молібдену. Перед ЕІЛ на поверхню наносили сірковмісну пасту.



Рисунок 2.1 – «Елітрон-52А» для ЕІЛ

Таблиця 2.1

Режими роботи установки моделі «Елітрон-52А»

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

В якості підкладки використовувалися зразки із вуглецевої сталі з вмістом 0,2 і 0,4 % С.

Покриття наносилося смугами. Обробний електрод переміщався вручну круговими рухами з перекриттям попередніх шарів на 0,25 величини смуги.

2.4 Металографічний аналіз

Оптичний метод визначення якостей металу називається металографією. Для цього використовується мікроскоп, який оснащений функцією значного збільшення [56]. Нині металографія займається вивченням розташування, складу, форми, характеристик металу. Також предметом вивчення виступають мікрокомпоненти і макрокомпоненти, які складають його структуру. У металографії часто застосовується вивчення зразків досліджуваного матеріалу візуальним способом. Але необхідною умовою є мікроскоп зі збільшенням.

За допомогою металографічного аналізу можна з'ясувати всі властивості металу. Також він дозволяє дати опис його характеристик: твердості, міцності,

пластичності, стійкості до корозії та інших. Сьогодні металографія може надати всі перераховані вище параметри завдяки вивченню зразків металу після їхнього полірування. Такі дослідження проводяться прямо на деталі під час неруйнівного контролю. Для цього застосовується оптичне обладнання портативного типу. Під час виконання руйнівного контролю з частини деталі або заготовки отримують зразки шляхом вирізання. З них роблять шліфи. Вони являють собою тонкі пластинки, які якісно відполіровані.

Зазвичай металографію використовують, коли необхідно провести дослідження сталевих або чавунних зразків. Це пояснюється особливостями структури цих матеріалів. Також металографія широко застосовується ще в одній галузі. Йдеться про аналіз сплавів з різноманітних кольорових металів. Без металографічного дослідження неможливо обійтися при проведенні експертизи трубопроводів, на яких виявлено пошкодження після катастроф або аварійних ситуацій. Також воно потрібне для вивчення металоконструкцій.

Вивчення структури і складу металу в комплексі виконується в особливих лабораторіях. Існує величезна різноманітність методик, за допомогою яких вивчаються різні метали, а також їхні сплави [57]. Незважаючи на це, всі металографічні дослідження проводяться поетапно. Спочатку готуються тонкі поліровані пластинки металу - металографічні шліфи. Потім вивчаються різновиди їхньої обробки. Під мікроскопом вивчається структура зразка. Аналізуються зображення і готується опис підсумків аналізу. Вид аналізу в металографії підбирається залежно від фізичних і хімічних характеристик матеріалу. Найважливішими з них є ступінь контрастності зерен металу та їхні розміри.

Зразки для дослідження готуються на лабораторному обладнанні. Воно створюється для шліфування зразків, їх полірування, а також подальшого травлення. Верстати для обробки зразків оснащуються круглим столом, який обертається. На ньому закріплюється папір з абразивним шаром. Замість паперу може використовуватися нетканий матеріал, який попередньо просочують шліфувальною суспензією.

Для кріплення шліфів застосовуються термореактивні полімери. Також може використовуватися епоксидна смола. Електроніка здійснює контроль точності їхнього притискання до шліфувального круга. Завдяки такій обробці структуру зразка можна побачити навіть без мікроскопа. Під оптичним мікроскопом її можна добре розглянути.

Для досліджень у металографії застосовується різне обладнання. Це світлові оптичні мікроскопи, які оснащені підсвічуванням, електронні мікроскопи для сканування і просто електронні мікроскопи.

Оцінка геометричних параметрів, а також розташування кристалічних елементів і домішок у просторі проводиться за допомогою кількісної металографії. Для цього використовуються методи математичного моделювання, наприклад, інтерполяції або побудова стереометричних моделей. Стереологічні методи дають змогу отримувати кількісні відомості про тривимірний об'єкт. Вони виконують обробку даних після отримання геометричних характеристик зрізів.

В обов'язковому порядку металографічний контроль проводять для обладнання, в якому метал зазнає впливу великих температур, високого тиску й агресивних середовищ. Це трубопроводи, різні ємності, апарати, які застосовуються в хімічній, атомній, нафтовій, газовій промисловості, енергетиці.

2.5 Електронно-мікроскопічні дослідження

Метод скануючої електронної мікроскопії є електронно-оптичним методом спостереження (візуалізації) і дослідження зображень поверхні, а також одержання інформації про склад і деякі інші властивості випробовуваних зразків речовин.

Порівняно з традиційною оптичною (світловою) мікроскопією, скануюча електронна мікроскопія дає змогу досліджувати випробовувані зразки за вищих збільшень, наприклад, $250000 \times$ порівняно зі збільшенням $1000 \times$ в оптичній мікроскопії, з великою роздільною здатністю за площиною (наприклад, 3 нм

або більше порівняно із приблизно 200 нм в оптичній мікроскопії), а також із більшою глибиною різкості. Для дослідження деталей випробовуваного зразка розміром до 10 нм можуть бути застосовані найпростіші системи скануючої електронної мікроскопії [58].

Спільне використання скануючої електронної мікроскопії та елементного рентгенівського мікроаналізу дає змогу одержувати дані про елементний склад випробовуваного зразка і здійснювати його елементне картування.

Електронний мікроскоп – незамінний інструмент при проведенні аналізу в кожній з областей дослідження в матеріалознавстві. Він дає змогу вирішувати багато повсякденних завдань: гранулометричний аналіз порошків різних речовин (металевих, діелектричних тощо), металографічний аналіз сталей і сплавів, фрактографічний аналіз зламів сталей і сплавів, дослідження морфології різних об'єктів.

Для отримання збільшених зображень у методі скануючої електронної мікроскопії використовують точно сфокусований пучок прискорених електронів замість джерела світла, як в оптичній мікроскопії. Збільшення роздільної здатності реалізується за рахунок того, що довжина хвилі електронного пучка втричі менша за довжину хвилі видимого світла. Сфокусований пучок електронів сканує (раструє) поверхню випробовуваного зразка із застосуванням різних типів детекторів, внаслідок чого генеруються різні типи сигналів, які використовуються для отримання відповідної інформації про випробовуваний зразок.

Електрони, що перебувають у скануючому електронному пучку, звані первинними (прискореними, бомбардувальними, падаючими), не тільки взаємодіють із поверхнею зразка, а й проникають із поверхні зразка на глибину до кількох десятків мікрометрів. Взаємодія, розсіювання, поглинання електронів відбувається на ділянці випробовуваного зразка трохи нижче його поверхні, відомій як об'єм взаємодії, що має краплеподібну форму, представленою на рис. 2.2.

Глибина проникнення первинних електронів залежить від елементного складу зразка, густини зразка, кута нахилу зразка та енергії падаючого променя, що визначається прискорювальною напругою. Глибина, на яку проникає пучок первинних електронів, прямо пропорційна енергії пучка і обернено пропорційна середньому атомному номеру складових елементів зразка. Електронний пучок високої енергії проникає на більшу глибину зразка, ніж електронний пучок низької енергії. Електронний пучок проникає набагато глибше у випробовуваний зразок, що містить легкі елементи, ніж у зразок, багатий важкими елементами.

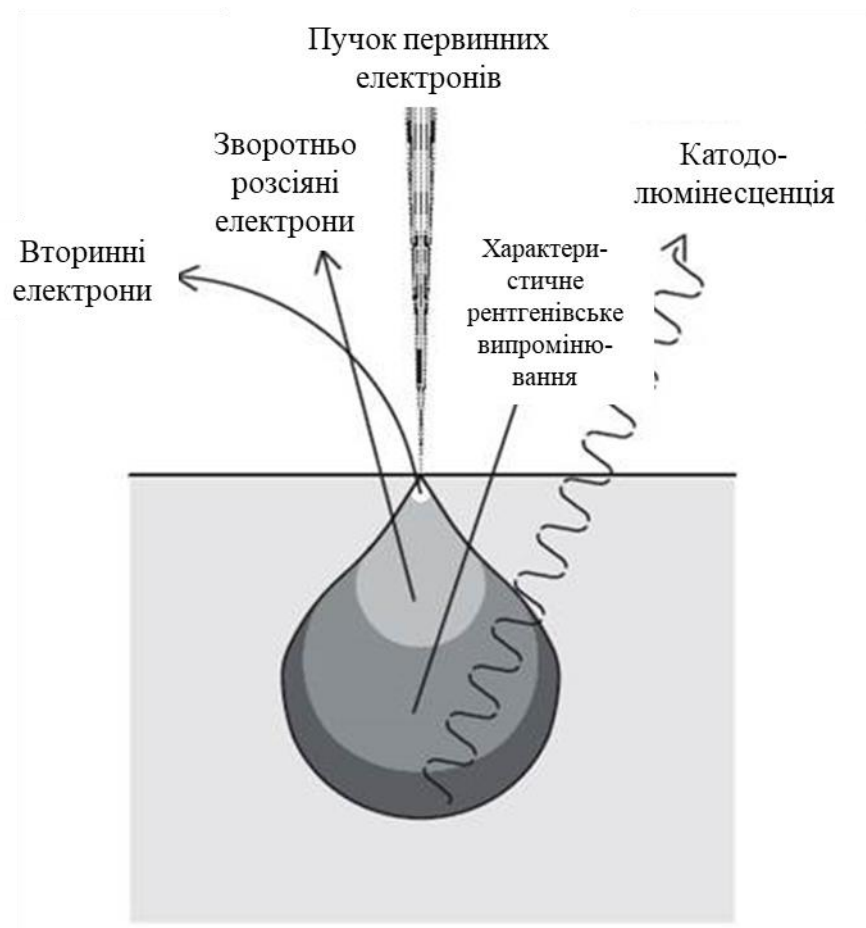


Рисунок 2.2 – Взаємодія, розсіювання, поглинання електронів при дослідженні об'єктів на сканувальному мікроскопі

У результаті взаємодії пучка прискорених первинних електронів із випробовуваним зразком відбувається низка різноманітних процесів, які

призводять до виходу з випробовуваного зразка електронів або квантів електромагнітного випромінювання, які реєструють як сигнали, що випромінюються, які використовують для побудови зображень та, в певних випадках, для отримання інформації про елементний склад зразка. Основні типи сигналів, які реєструють під час використання методу скануючої електронної мікроскопії, показано на рис. 2.2.

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), рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Мікроскоп SEO-SEM Inspect S50-B

2.6 Дослідження мікротвердості

Метод визначення мікротвердості призначений для оцінки твердості дуже малих (мікроскопічних) об'ємів матеріалів. Його застосовують для вимірювання твердості дрібних деталей, тонкого дроту або стрічки, тонких поверхневих шарів, покриттів тощо. Головне призначення - оцінка твердості окремих фаз або структурних складових сплавів, а також різниці в твердості окремих ділянок цих складових.

Метод стандартизований [59]. Як індентор під час вимірювання мікротвердості найчастіше, як і в разі визначення твердості за Віккерсом,

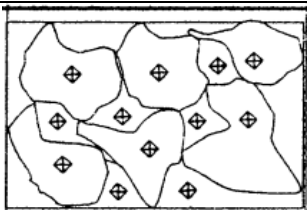
використовують правильну чотиригранну алмазну піраміду з кутом при вершині 136° . Ця піраміда плавно вдавлюється в зразок за навантажень 0,05-5 Н. Число мікротвердості H_μ , МПа, визначається за формулою $H_\mu = 1,854 \cdot 10^5 F/d^2$, де F – навантаження, Н; d – діагональ відбитка, зазвичай 7-50 мкм; $d^2/1,854$ – площа бічної поверхні отриманого пірамідального відбитка. За ГОСТом число мікротвердості у МПа, записують без одиниці виміру, наприклад, $H_\mu=1050$.

Мікротвердість масивних зразків вимірюють на металографічних шліфах, приготованих спеціальним чином. Глибина вдавлення індентора під час визначення мікротвердості ($d/7$) становить кілька мікрометрів і порівнянна з глибиною одержуваного в результаті механічного шліфування та полірування наклепаного поверхневого шару. Тому методика видалення цього шару особливо важлива.

Як уже зазначалося, головна цінність методу мікротвердості – це можливість оцінювання твердості окремих фаз і структурних складових, що дуже важливо під час розв'язання багатьох металознавчих задач і чого не можна зробити іншими методами. Деякі сфери застосування методу мікротвердості представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Деякі сфери застосування методу мікротвердості (діюраметрії)

№	Область застосування	Схема вимірювань	Коротка методика
1	Оцінка мікротвердості окремих структурних складових сплаву (наприклад, сталі з ферито-перлітною структурою)		Використовується металографічний шліф із виявленою травленням структурою. Відбитки наносяться на окремі структурні складові сплаву з подальшим їх вимірюванням і визначенням мікротвердості

№	Область застосування	Схема вимірювань	Коротка методика
2	Оцінка градієнта мікротвердості за товщиною поверхневого шару (зокрема після поверхневого зміцнення) зокрема, після поверхневого зміцнення)		Використовується поперечний або косий металографічний шліф. Відбитки наносяться від поверхні вглиб через певні інтервали з подальшим їхнім вимірюванням і визначенням мікро-твердості за товщиною поверхневого шару.
3	Оцінка розкиду значень мікротвердості в металі або сплаві (слугує непрямою оцінкою) і міцнісної мікронеоднорідності матеріалу)		На досліджуваній поверхні металографічного шліфа наносять довільно щонайменше 20 відбитків із подальшим їхнім вимірюванням, визначенням мікро-твердості та статистичним опрацюванням отриманих результатів.
4	Оцінка анізотропії міцнісних властивостей монокристала		Під час нанесення кожного відбитка індентор повертається на певний кут. Анізотропія властивостей оцінюється за відношенням діагоналей отриманих відбитків.
5	Оцінка мікронеоднорідності пластичної деформації за локальними об'ємами металу або сплаву.		Уздовж твірної циліндричного зразка для випробувань на розтяг через рівні інтервали наносять щонайменше 100 відбитків мікротвердості (реперних точок) при малому навантаженні на індентор (0,0196-0,049Н), вимірюють відстані між ними після деформації зразка з наступним статистичним опрацюванням отриманих даних.

Для вимірювання мікротвердості використовуючи твердомір ПМТ-3 [59].



Рисунок 2.4 – Твердомір ПМТ-3

2.7 Висновок

У розділі була розглянута методика та матеріали для дослідження.

Метод електроіскрового легування – ефективний, економічний спосіб модифікації поверхні сталевих виробів, який дає змогу одержувати покриття з різних матеріалів у доволі простий спосіб, як у технологічному відношенні, так і в апаратному оформленні, що є його великою перевагою.

В розділі запропоновано у якості підкладки використовувати вуглецеві сталі з вмістом вуглецю 0,2 і 0,4%, електроіскрову установку, режими обробки, технологію проведення ЕІЛ у ручному режимі. У якості методів дослідження представлений опис методик металографічного аналізу, електронно-мікроскопічних досліджень, визначення мікротвердості.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Електроіскрове легування

Перспективним методом формування унікальних структур у металевій матриці є електроіскрове легування (ЕІЛ). Цю технологію модифікування провідних поверхневих шарів твердих тіл запропонували відомі вчені Б. Р. Лазаренко та М. І. Лазаренко. Ними було розроблено теоретичні засади формування надтвердих ЕІЛ покриттів, створено наукові школи, які активно займаються удосконаленням і розробкою нових технологічних підходів при створенні електроіскрових покриттів.

Цей метод має економічні переваги порівняно з наявними методами модифікування поверхневих шарів металів та їхніх сплавів. Технологічна простота електроіскрового легування (ЕІЛ) є однією з основних переваг під час розв'язання проблем збільшення експлуатаційних характеристик різних виробів і конструкцій апаратів і машин. Технологія формування електроіскрових покриттів і нині має інноваційну складову, що полягає у створенні покриттів з високою адгезійною міцністю, що дає змогу формувати покриття за невеликих температур нагріву модифікованого виробу, має низьку енергоємність процесу, відповідає сучасним екологічним вимогам.

Перспективним напрямком є застосування методу ЕІЛ для модифікування металообробного та деревообробного інструменту. Цей інструмент здебільшого застосовують за підвищених температур, корозійного середовища, що призводить до досить швидкого зношування. Використовуючи різні види електродів, що відрізняються хімічним складом, які застосовують під час ЕІЛ, можна істотно змінювати триботехнічні, адгезійні, термічні, механічні та інші характеристики експлуатаційних поверхонь виробів і деталей. Основними перевагами ЕІЛ є: отримання високої адгезійної здатності порівняно, наприклад, з газотермічним нанесенням покриттів, можливість отримання

модифікованих поверхневих шарів і покриттів на підкладці без попередньої підготовки, відсутність об'ємного розігріву виробу, можливість не проводити фінішну механічну обробку модифікованого виробу, використання методу в кисневмісному середовищі.

Проведені в Україні і за кордоном дослідження показують, що їхні основні тенденції пов'язані з розв'язанням таких проблем: визначенням взаємозв'язку структурних трансформацій із технологічними параметрами електроіскрового легування, умовами виникнення та перебігу електроіскрового процесу в кисневмісному середовищі. У низці робіт [55, 60, 61] показано, що залишкові напруження, шорсткість мікрокельєфу поверхневих шарів, дефекти структури мають істотний вплив на якість формованих зміцнених шарів металевго субстрату. Показано, що автоматизація установок електроіскрового легування суттєво впливає на стабільність перебігу процесів електроіскрового легування. Формовані покриття виявляють структурну чутливість до таких технологічних параметрів процесу ЕІЛ: газовий склад середовища, температура, режим роботи генератора, сила притиснення анода до катода, взаємне розташування електродів у просторі. Вивчення цих факторів і процесів дасть змогу ретельніше проводити контроль формованих покриттів і захисних шарів, а також прогнозувати експлуатаційні та технологічні характеристики одержуваних покриттів.

Основними напрямками застосування електроіскрового легування є такі [55]:

- збільшення корозійної стійкості, твердості, зносостійкості, стійкості до впливу підвищених температур,
- відновлення геометричних параметрів обробного інструменту, механізмів і деталей машин,
- зниження здатності до взаємодії поверхонь, що труться, з утворенням адгезійних містків,
- зміна електричних характеристик матеріалів і емісійних здібностей поверхневих шарів,

- створення заданих хімічних сполук шляхом проведення на оброблюваній поверхні субстрату мікрометалургійних процесів,
- створення шорсткості з певними параметрами мікрогеометрії на робочій поверхні виробів,
- нанесення радіоактивних ізотопів,
- застосування в мистецтві при виготовленні різних виробів з металу.

Електроіскрове легування металевих поверхонь ґрунтується на явищі електричної ерозії та полярного перенесення матеріалу анода на катод (субстрат) під час протікання імпульсних розрядів у газовому середовищі.

Найхарактернішими схемами, що пояснюють метод ЕІЛ, є ті, що наведені на малюнках 3.1а, 3.1б.

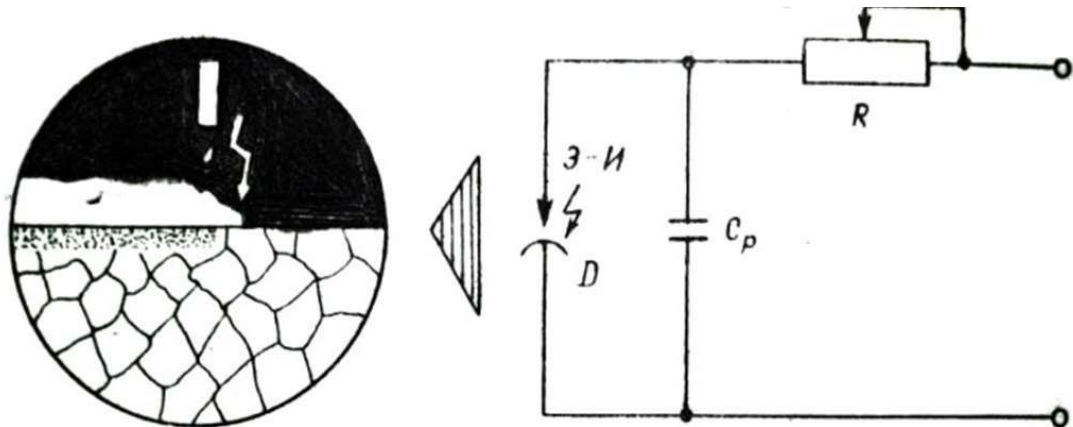


Рисунок 3.1 – Процес електроіскрового легування (а)

і принципова електрична схема релаксаційного (RC) генератора, призначеного для формування імпульсних розрядів (б)

3.2 Особливості зміни мікроструктури і фазового складу покриття

Згідно з сучасними уявленнями показано, що в процесі електричної ерозії на електродах з'являються нові фази і різко змінюються початкові фізико-хімічні та механічні властивості поверхневих шарів. При ЕІЛ кількісні співвідношення між цими перетвореннями в поверхневому шарі залежать від низки чинників, і насамперед від матеріалу електродів.

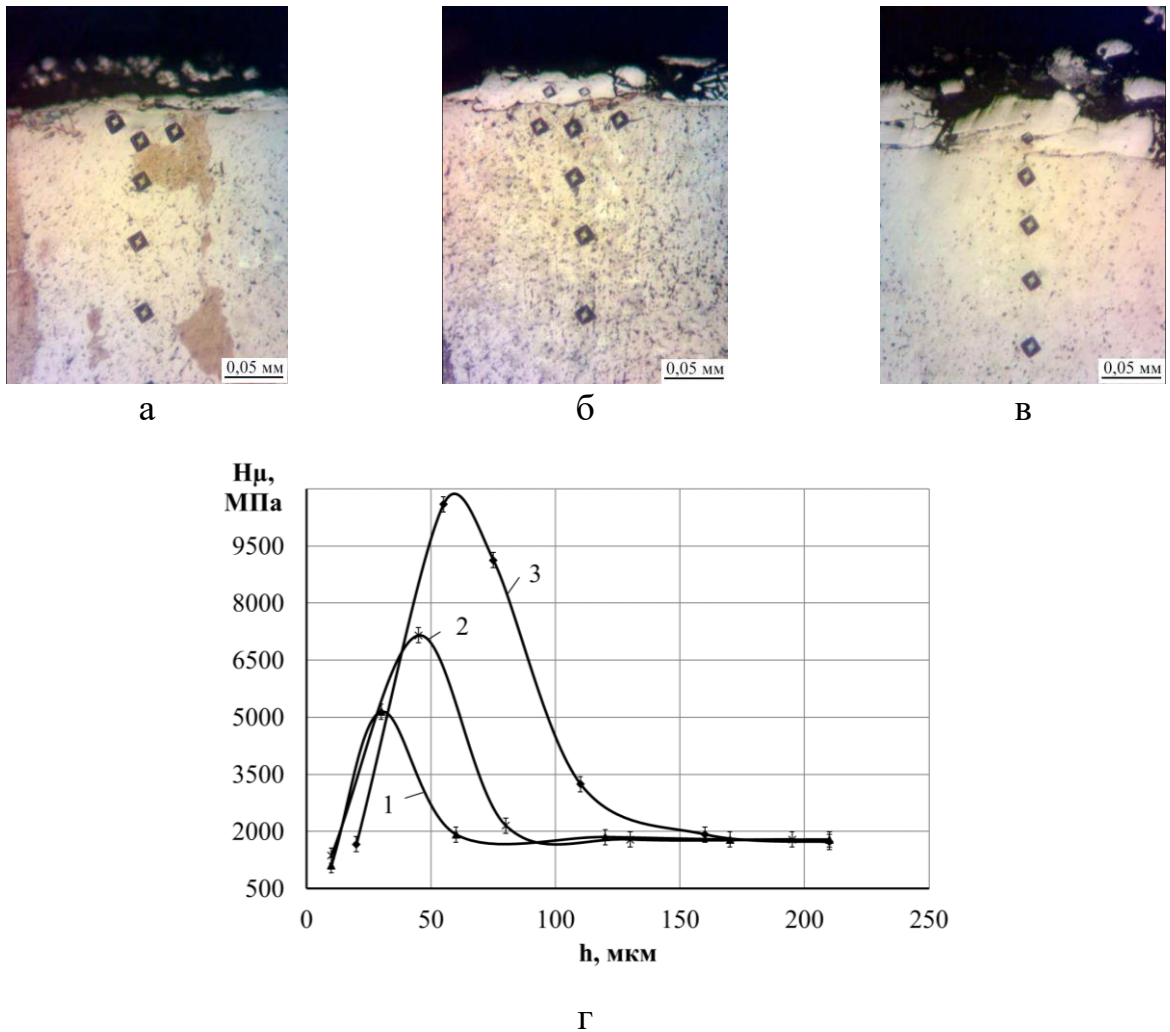


Рисунок 3.2 – Результати металографічних та дюрOMETричних досліджень антифрикційних покриттів на сталі 20 після ЕІЛ. Використовувана енергія розряду: а – 0,13 Дж; б – 0,55 Дж; в – 3,4 Дж; г – на рисунку г) залежності мікротвердості від енергії обробки: 1 – 0,13 Дж, 2 – 0,55 Дж, 3 – 3,4 Дж

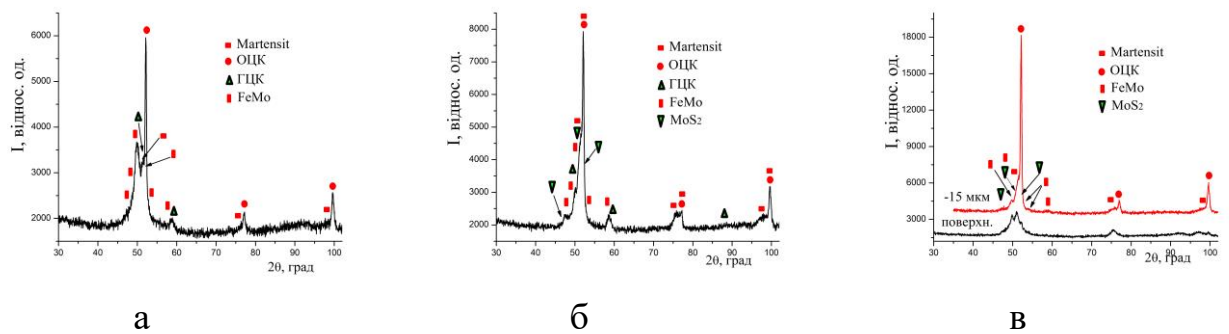


Рисунок 3.3 – Фазовий склад антифрикційних покриттів на сталі 20 після обробки за енергії, Дж: а – 0,13, б – 0,55, в – 3,4

Досліджена мікроструктура і фазовий склад отриманих покриттів (рис. 3.2 і 3.3).

Під час формування покриттів із молебдену спостерігається протікання складних структурних і фазових перетворень. Відбувається формування трьох зон: білої зони та зон дифузійного і термічного впливу. Необхідно також відмітити, що на поверхні формується додатково пористий шар, який, відповідно до результатів дюрOMETричного аналізу, має низьку твердість близько 1100-1600 МПа. Перша зона, біла зона, з мікротвердістю 5000-10000 МПа (залежно від енергетичних параметрів обробки) складається з легованих твердих розчинів, і залежно від енергетичних параметрів обробки, може містити невелику кількість сформованого в результаті ЕІЛ двусірчистого молібдену (рис. 3.3).

Друга є зоною термічного (дифузійного) впливу, в якій виділяється ділянка неповної фазової кристалізації. Ця ділянка охоплює метал, нагрітий від температури, за якої під час нагрівання починаються алотропічні перетворення ($\sim 720^{\circ}\text{C}$), до температури близько 880°C . Метал на цій ділянці піддається тільки частковій перекристалізації. Тому тут поряд із зернами основного металу, що не змінилися в процесі обробки, присутні зерна, що утворилися під час перекристалізації. В цій зоні також відбуваються дифузійні процеси, тому елементи електродного матеріалу дифундують у глиб основи. Мікротвердість цієї зони близько 2000-3500 МПа (рис. 3.2, г). Дослідження розподілу молібдену в поверхневому шарі показало, що максимальний його вміст у найвищій зоні, далі за глибиною його вміст зменшується в дифузійній зоні.

3.3 Висновок

Досліджено перспективний метод формування унікальних структур у металевій матриці - електроіскрове легування (ЕІЛ). Цей метод має економічні переваги порівняно з наявними методами модифікування поверхневих шарів металів та їхніх сплавів. Електроіскрове легування металевих поверхонь

ґрунтується на явищі електричної ерозії та полярного перенесення матеріалу анода на катод (субстрат) під час протікання імпульсних розрядів у газовому середовищі.

Досліджена мікроструктура і фазовий склад отриманих покриттів Мо електродом. Під час формування покриттів із молебдену спостерігається протікання складних структурних і фазових перетворень. Відбувається формування трьох зон: білої зони та зон дифузійного і термічного впливу. На поверхні формується додатково пористий шар, який, відповідно до результатів дюрOMETричного аналізу, має низьку твердість близько 1100-1600 МПа. Біла зона, з мікротвердістю 5000-10000 МПа (залежно від енергетичних параметрів обробки) складається з легованих твердих розчинів, і залежно від енергетичних параметрів обробки, може містити невелику кількість сформованого в результаті ЕІЛ двусірчистого молібдену. Наступною є зона термічного (дифузійного) впливу, в якій виділяється ділянка неповної фазової кристалізації. Мікротвердість цієї зони близько 2000-3500 МПа. Дослідження розподілу молібдену в поверхневому шарі показало, що максимальний його вміст у найвищій зоні, далі за глибиною його вміст зменшується в дифузійній зоні.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Організація наукових досліджень

Наукові дослідження і розробки - творча діяльність, що здійснюється на систематичній основі з метою збільшення суми наукових знань, у тому числі про людину, природу і суспільство, а також пошуку нових галузей застосування цих знань.

Діяльність, що класифікується як наукові дослідження і розробки, включає [62, 63]:

– фундаментальні наукові дослідження - експериментальна або теоретична діяльність, спрямована на здобуття нових знань про основні закономірності будови, функціонування і розвитку людини, суспільства, навколишнього природного середовища;

– прикладні наукові дослідження - дослідження, спрямовані переважно на застосування нових знань для досягнення практичних цілей і розв'язання конкретних завдань;

– розробки - діяльність, що ґрунтується на знаннях, набутих у результаті проведення наукових досліджень або на основі практичного досвіду, і спрямована на збереження життя і здоров'я людини, створення нових матеріалів, продуктів, процесів, пристроїв, послуг, систем або методів та їх подальше вдосконалення.

До наукових досліджень і розробок не включаються такі види діяльності:

– освіта та підготовка кадрів;

– послуги, пов'язані з дослідженням кон'юнктури ринку;

– збиранням і обробленням даних загального призначення (якщо це не належить до конкретних дослідницьких робіт), випробуванням і аналізом у наукових галузях, передпроектними роботами, спеціалізованим медичним обслуговуванням; адаптацією, підтримкою та супроводом наявного програмного забезпечення;

- виробнича діяльність із впровадження нововведень;
- управління та інша допоміжна діяльність (державне управління науковими дослідженнями і розробками, їх фінансування тощо).

Організації, що виконують наукові дослідження та розробки, класифікуються за такими секторами діяльності: державний, підприємницький, вищої професійної освіти, некомерційних організацій.

До складу державного сектору входять: організації міністерств і відомств, які забезпечують управління державою та задоволення потреб суспільства загалом; некомерційні організації, які повністю або здебільшого фінансуються і контролюються урядом.

Підприємницький сектор охоплює: всі організації, чия основна діяльність пов'язана з виробництвом продукції або послуг з метою продажу, зокрема ті, що перебувають у власності держави; приватні некомерційні організації, які обслуговують вищеназвані організації.

До сектору вищої професійної освіти входять: університети та інші освітні установи вищої професійної освіти, незалежно від джерел фінансування та правового статусу, а також науково-дослідні інститути, експериментальні станції, клініки, які перебувають під їхнім контролем або асоційовані з ними, та науково-дослідні інститути, експериментальні станції, клініки, які перебувають під їхнім контролем або є асоційованими з ними.

Сектор некомерційних організацій складається з приватних організацій, які не ставлять собі за мету отримання прибутку (професійні товариства, громадські організації, установи, автономні некомерційні організації, фонди тощо), і приватних індивідуальних організацій.

Витрати на наукові дослідження і розробки - фактичні витрати в грошовій формі на виконання наукових досліджень і розробок. Розрізняють внутрішні та зовнішні витрати на наукові дослідження і розробки.

Внутрішні витрати на наукові дослідження і розробки - виражені в грошовій формі фактичні витрати на виконання наукових досліджень і розробок власними силами підприємства на території країни (включно з тими,

що фінансуються з-за кордону, але за виключенням виплат, зроблених за кордоном).

Зовнішні витрати - вартість наукових досліджень і розробок, виконаних сторонніми організаціями за договорами з організацією, що звітує.

Технологічна інновація - кінцевий результат інноваційної діяльності, що дістав втілення у вигляді нового або вдосконаленого продукту чи послуги, впроваджених на ринку, нового або вдосконаленого процесу чи способу виробництва (передання) послуг, які використовуються в практичній діяльності. Інновація вважається здійсненою в тому разі, якщо її впроваджено на ринку або у виробничому процесі.

Витрати на технологічні інновації - виражені в грошовій формі фактичні витрати, пов'язані зі здійсненням різних видів інноваційної діяльності, що виконується в масштабі організації (галузі, регіону, країни).

Персонал, зайнятий дослідженнями і розробками - сукупність осіб, чия творча діяльність, здійснювана на систематичній основі, спрямована на збільшення та пошук нових областей застосування знань, а також зайнятих наданням прямих послуг, пов'язаних із виконанням досліджень і розробок. У статистиці персонал, зайнятий дослідженнями і розробками, обліковується як списковий склад працівників організацій (відповідних підрозділів освітніх установ вищої професійної освіти, промислових організацій тощо), що виконують дослідження і розробки, станом на кінець року.

У складі персоналу, зайнятого дослідженнями і розробками, виокремлюють чотири категорії: дослідники, техніки, допоміжний та інший персонал.

Дослідники - працівники, які професійно займаються дослідженнями і розробками та безпосередньо здійснюють створення нових знань, продуктів, методів і систем, а також управління зазначеними видами діяльності.

Техніки - працівники, які беруть участь у дослідженнях і розробках і виконують технічні функції, як правило, під керівництвом дослідників.

Допоміжний персонал - працівники, які виконують допоміжні функції, пов'язані з проведенням досліджень і розробок: працівники планово-економічних, фінансових підрозділів, патентних служб, підрозділів науково-технічної інформації, науково-технічних бібліотек; робітники, які здійснюють монтаж, налагодження, обслуговування та ремонт наукового устаткування і приладів; робітники дослідних (експериментальних) виробництв; лаборанти, які не мають вищої та середньої професійної освіти.

Інший персонал - працівники з господарського обслуговування, а також ті, що виконують функції загального характеру, пов'язані з діяльністю організації загалом (працівники бухгалтерії, кадрової служби, канцелярії, підрозділів матеріально-технічного забезпечення тощо).

Витрати за науково-дослідні роботи

До витрат за науково-дослідними, дослідно-конструкторськими та технологічними роботами належать усі фактичні витрати, пов'язані з виконанням зазначених робіт, у тому числі:

- вартість матеріально-виробничих запасів і послуг сторонніх організацій та осіб, що використовуються при виконанні зазначених робіт;
- витрати на заробітну плату та інші виплати працівникам, безпосередньо зайнятим при виконанні зазначених робіт за трудовим договором;
- відрахування на соціальні потреби;
- вартість спецобладнання та спеціального оснащення, призначених для використання як об'єктів випробувань і досліджень;
- амортизація об'єктів основних засобів і нематеріальних активів, що використовуються при виконанні зазначених робіт;
- витрати на утримання та експлуатацію науково-дослідного обладнання, установок і споруд, інших об'єктів основних засобів та іншого майна;
- загальногосподарські витрати, у разі якщо вони безпосередньо пов'язані з виконанням цих робіт;

– інші витрати, безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних, дослідно-конструкторських і технологічних робіт, включно з витратами на проведення випробувань.

Висновок

Наукові дослідження і розробки - творча діяльність, що здійснюється на систематичній основі з метою збільшення суми наукових знань, у тому числі про людину, природу і суспільство, а також пошуку нових галузей застосування цих знань. Діяльність, що класифікується як наукові дослідження і розробки, включає: фундаментальні наукові дослідження, прикладні наукові дослідження розробки.

До витрат за науково-дослідними, дослідно-конструкторськими та технологічними роботами належать усі фактичні витрати, пов'язані з виконанням зазначених робіт, у тому числі: вартість матеріально-виробничих запасів і послуг сторонніх організацій та осіб, що використовуються при виконанні зазначених робіт; витрати на заробітну плату; відрахування на соціальні потреби; вартість спецобладнання; амортизація; витрати на утримання та експлуатацію науково-дослідного обладнання; загальногосподарські витрати; інші витрати, безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних, дослідно-конструкторських і технологічних робіт, включно з витратами на проведення випробувань.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1 Вимоги охорони праці у процесі дифузійної металізації

Вимоги охорони праці у процесі дифузійної металізації [64-66]:

1. При роботі з порошкоподібними металами необхідно стежити за концентрацією металевого пилу в робочій зоні, який не повинен перевищувати значень гранично допустимих концентрацій.

2. Відкриття металевої тари з порошками (алюмінієм, цинком) слід здійснювати за допомогою спеціального інструменту та пристроїв, що не викликають іскроутворення. Роботу рекомендується виконувати у спеціальному приміщенні.

5.2 Вимоги охорони праці у процесі очищення деталей

Вимоги охорони праці у процесі очищення деталей [64-66]:

1. Очищення металевих деталей від окалини та іржі проводиться механічним або хімічним способом.

2. Механічна очистка проводиться у мийних машинах, у яких застосовується розчин лугу з вмістом до 10% кальцинованої соди за температури до 90 °С, або в установках для гідроочищення та гідропіскоочищення, у дробометних та дробометно- дробоструминних установках, а також на агрегатах ультразвукового чищення або вручну за допомогою абразивного інструменту. Застосування піскоструминних апаратів для сухого піскоочищення деталей забороняється.

3. Камери (установки) для гідроочищення та гідропіскоочищення не повинні виділяти пари та пил у приміщення цеху. При застосуванні гідропіскоструминного очищення деталей не слід допускати вміст піску у воді понад 50 % за вагою. Дисперсність піску, що подається в гідропіскоструминні установки, не повинна містити фракції менше 100 мікрон.

4. Дробометні та дробометно-дробеструйні установки повинні розміщуватися в приміщенні, обладнаному припливно-витяжною вентиляцією. Конструкція цих установок повинна передбачати повне укриття робочої зони (кількість повітря, що відсмоктується, має бути встановлено нормативно-технічною документацією на кожен модель обладнання виходячи з числа установок та їх продуктивності).

5. При роботі всередині гідроочисних та гідропіскоочисних камер (під час їх огляду чи ремонту) використання для освітлення напруги понад 12 В забороняється.

6. Очищення резервуарів та відстійників від опадів шламу має бути механізовано.

7. Стаціонарні верстати для обробки абразивним інструментом мають бути обладнані індивідуальними аспіраційними установками або підключені до місцевої витяжної вентиляції.

8. Ділянки обдирання (зачищення) деталей ручними машинками з абразивним інструментом повинні бути обладнані місцевою витяжною вентиляцією з видаленням пилу через бічні пилеприймачі, ґрати в підлозі або верстаті.

9. Ручний електрифікований інструмент, що застосовується на очисних ділянках, повинен мати напругу не більше 42 В.

10. Ручне очищення деталей повинно проводитися за температури деталей не вище 40 °С.

5.3 Вимоги охорони праці в процесі термообробки імпульсним індукційним нагріванням

Вимоги охорони праці в процесі термообробки імпульсним індукційним нагріванням [64-66]:

1. Установки імпульсного індукційного нагріву мають бути обладнані місцевою витяжною вентиляцією. За її відсутності робота повинна проводитися

у витяжній шафі, оскільки обробка металів супроводжується вибуховим викидом дисперсійних частинок з утворенням пари та газів.

2. Установки імпульсного індукційного нагрівання обладнуються блокованими огорожами, сигналізацією.

3. Огляд внутрішніх частин установок, що знаходяться під напругою, слід проводити лише після зняття напруги.

4. Конденсаторні батареї можуть розташовуватися в одному приміщенні з пультом керування при загальній енергії повного припустимого заряду, що не перевищує 15000 Дж. Батареї більшої ємності повинні розташовуватися поза приміщенням у спеціальній сталевій шафі або в окремому приміщенні з дверима, обладнаними блокувальними пристроями.

5. На ділянці імпульсного індукційного нагріву рекомендується вивішувати плакати, що містять вказівки та застереження щодо специфіки імпульсної термообробки.

5.4 Вимоги охорони праці у процесі лазерної термообробки

Вимоги охорони праці у процесі лазерної термообробки [64-66]:

1. Ділянка лазерної обробки металів має розташовуватися в ізольованому приміщенні. Стіни приміщення, де розміщені лазерні установки, мають бути з матеріалу, непроникного лазерного випромінювання. Внутрішні поверхні приміщення повинні фарбуватися в матовий колір, що має мінімальний коефіцієнт відбиття, що забезпечує максимальне розсіювання світла по довжині хвилі лазерного випромінювання.

2. На ділянці лазерної обробки металів мають бути:

- 1) інструмент із ізольованими рукоятками;
- 2) діелектричні рукавички та килимки;
- 3) розрядні штанги;
- 4) екрани непрозорі, що не дають відображення лазерного випромінювання;
- 5) засоби захисту очей;

- б) засоби захисту органу слуху;
- 7) інструкція з охорони праці;
- 8) інструкція з експлуатації;
- 9) план розміщення установок із зазначенням лазерної небезпечної зони.

зони.

3. У зонах із підвищеною інтенсивністю лазерного випромінювання мають бути вивішені попереджувальні знаки з написом «Обережно! Лазерне випромінювання».

4. Процеси лазерної обробки металів, які вимагають присутності обслуговуючого персоналу біля устаткування, повинні проводитися у спеціальному ізольованому приміщенні. Управління процесом у разі проводиться з окремо розташованого пульта. Видалення шкідливих та небезпечних речовин із повітряного середовища (або зниження їх до рівня ГДК) повинно здійснюватися загальнообмінною вентиляцією. Для видалення великої кількості небезпечних та шкідливих речовин, крім загальнообмінної вентиляції, повинні застосовуватись місцеві відсмоктувачі.

5. При проведенні процесів, що вимагають присутності персоналу біля лазерної установки або поблизу зони впливу лазерного випромінювання на деталі, видалення шкідливих та небезпечних речовин із зони їх утворення повинно проводитись за допомогою місцевих відсмоктувачів.

6. При суміщенні системи спостереження з оптичною системою лазерної установки необхідно застосовувати автоматичні затвори або світлофільтри, що захищають очі оператора в момент створення випромінювання. Забороняється під час генерації випромінювання здійснювати візуальний контроль проникнення в деталь без застосування відповідних засобів захисту, а також направляти промінь лазера в очі людини та на інші частини тіла.

7. При використанні лазерних установок відкритого типу для запобігання опроміненню працівників повинні використовуватися огороження, маркування лазерної небезпечної зони, екранування відкритого променя лазера, винесення пульта управління з небезпечної зони.

5.5 Охорона довкілля

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

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

Проблеми охорони навколишнього середовища в цій області виробництва пов'язані з наступним [65]:

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

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

У процесі плавлення форма і хімічний склад твердих викидів у вигляді пилу, частинок металу і парів оксидів металу можуть змінюватися залежно від типу печі, палива, оплавленого металу чи сплаву, режимів плавки. Як правило, вагранки під час роботи виробляють велику кількість твердих частинок (наприклад, кокс, летюча зола, кремнезем, іржа та вапняк). Електродугові печі (ЕДП) також є джерелом великих кількостей твердих частинок, як при завантаженні, а також під час плавки, подачі кисню і на стадії зневуглицьовування. Інші типи плавильних печей забезпечують більш низький процент викидів, особливо індукційні електричні печі [66].

Для запобігання значних викидів твердих частинок потрібно:

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

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

Хлориди і фториди присутні в невеликих кількостях у відпрацьованих газах з плавильних печей і утворюються з флюсових речовин. Запобігання і зниження викидів цих утворених газів слід проводити на стадії сухого видалення пилу, а також в процесі використання технологій скрубєрів мокрого очищення, що встановлюються в печах для зменшення викидів твердих частинок і при плавці сталі оксидів сірки [67].

Процес термічної або хіміко-термічної обробки вимагає великої кількості енергії, при цьому в печі утворюється значна кількість CO_2 і це веде до збільшення забрудненості повітря діоксидом вуглецю (CO_2). Цей оксид, як відомо, утворюється під час спалювання палива. Рекомендуються наступні методи запобігання викидам CO_2 [67]:

- впровадження у виробництво провідних технологій спалювання (наприклад, збагачення киснем повітря, що використовується при продувці, попередніє підігрівання ресурсів при завантаженні, управління параметрами спалювання);
- виконання необхідного регламенту експлуатації та техобслуговування устаткування та недопущення часткового завантаження термічного обладнання;
- Вибір палива з низьким хімічним вмістом вуглецю до теплотворної здатності (наприклад, метану CH_4). Викиди оксиду вуглецю CO_2 при

спалюванні метану десь на 60% менше, порівняно з викидами під час спалювання кам'яного вугілля або нафтового коксу.

Під час ТО та ХТО утворюються різноманітні джерела шуму, включаючи навантаження/розвантаження деталей, а також системи транспортування та вентиляції. Рекомендовані методи боротьби з шумом включають наступне [67]:

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

5.6 Висновок

В даному розділі було розглянуто охорону праці в термічних цехах. Представлені правила по охороні праці при обробці металів, обов'язки роботодавця у забезпеченні належних умов праці, вимоги охорони праці у процесі гартування, у процесі поверхневої обробки, а саме під час дифузійної металізації, термообробки імпульсним індукційним нагріванням, лазерної термообробки, вимоги охорони праці в процесі термообробки магнієвих та алюмінієвих сплавів, титану та його сплавів.

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

ВИСНОВКИ

1. Проведений літературний огляд з методів формування антифрикційних покриттів на залізовуглецевих сплавах. В даний час розроблені та успішно застосовуються антифрикційні покриття, що мають у своєму складі різні компоненти. Більшість дослідників для зниження коефіцієнта тертя вводять у покриття вуглець у якійсь із його форм. Для створення сучасних антифрикційних покриттів можливе застосування нових матеріалів – наноструктурованих порошків та рівномірно розподілені в металевій матриці ультрадисперсні частинки. Покриття, що підвищують трибологічні властивості виробів, можна отримати різними методами. Для вирішення задачі підвищення антифрикційних властивостей робочих поверхонь пропонується застосувати спосіб електроіскрового легування. Такі покриття, що набули широкого поширення в машинобудуванні, відрізняються від покриттів, отриманих іншими способами, насамперед якістю: високою твердістю, зносо-, жаро- та ерозійною стійкістю, що визначає їхню перспективність застосування на відповідальних деталях машин.

2. Запропоновано у якості підкладки використовувати вуглецеві сталі з вмістом вуглецю 0,2 і 0,4%, електроіскрову установку, режими обробки, технологію проведення ЕІЛ у ручному режимі. У якості методів дослідження представлений опис методик металографічного аналізу, електронно-мікроскопічних досліджень, визначення мікротвердості.

3. Досліджено перспективний метод формування унікальних структур у металевій матриці - електроіскрове легування (ЕІЛ). Цей метод має економічні переваги порівняно з наявними методами модифікування поверхневих шарів металів та їхніх сплавів. Електроіскрове легування металевих поверхонь ґрунтується на явищі електричної ерозії та полярного перенесення матеріалу анода на катод (субстрат) під час протікання імпульсних розрядів у газовому середовищі. Досліджена мікроструктура і фазовий склад отриманих покриттів Мо електродом. Під час формування покриттів із

молебдену спостерігається протікання складних структурних і фазових перетворень. Відбувається формування трьох зон: білої зони та зон дифузійного і термічного впливу. На поверхні формується додатково пористий шар, який, відповідно до результатів дюрOMETричного аналізу, має низьку твердість близько 1100-1600 МПа. Біла зона, з мікротвердістю 5000-10000 МПа (залежно від енергетичних параметрів обробки) складається з легованих твердих розчинів, і залежно від енергетичних параметрів обробки, може містити невелику кількість сформованого в результаті ЕІЛ двусірчистого молібдену. Наступною є зона термічного (дифузійного) впливу, в якій виділяється ділянка неповної фазової кристалізації. Мікротвердість цієї зони близько 2000-3500 МПа. Дослідження розподілу молібдену в поверхневому шарі показало, що максимальний його вміст у найвищій зоні, далі за глибиною його вміст зменшується в дифузійній зоні.

4. Розглянуті види витрат на проведення наукових досліджень. До витрат за науково-дослідними, дослідно-конструкторськими та технологічними роботами належать усі фактичні витрати, пов'язані з виконанням зазначених робіт, у тому числі: вартість матеріально-виробничих запасів і послуг сторонніх організацій та осіб, що використовуються при виконанні зазначених робіт; витрати на заробітну плату; відрахування на соціальні потреби; вартість спецобладнання; амортизація; витрати на утримання та експлуатацію науково-дослідного обладнання; загальногосподарські витрати; інші витрати, безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних, дослідно-конструкторських і технологічних робіт, включно з витратами на проведення випробувань.

5. Розглянуто охорону праці в термічних цехах. Представлені правила по охороні праці при обробці металів, обов'язки роботодавця у забезпеченні належних умов праці, вимоги охорони праці у процесі гартування, у процесі поверхневої обробки, а саме під час дифузійної металізації, термообробки імпульсним індукційним нагріванням, лазерної термообробки. Проаналізовані засоби протидії шкідливим факторам під час роботи в термічних дільницях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hogmark, S. Design and evaluation of tribological coatings [Text] / S.Hogmark, S. Jacobson, M. Larsson // *Wear.* – 2000. – V. 246. – P. 20–33.
2. Jafarova A. A. Modern trends in the creation of materials for anti-friction units [Електронний ресурс] / А. А. Jafarova // *Литво. Металургія. 2024 : матеріали 20-ї, 13-ї Ювілейної Міжнар. наук.-практ. конф., 28-30 травня 2024 р. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.] ; заг. ред. О. І. Пономаренко. – Електрон. текст. дані. – Харків ; Київ, 2024. – С. 519-523*
3. Robertson, J. Properties of diamond-like carbon [Text] / J. Robertson // *Surface and Coatings Technology* – 1992. – Vol. 50. –P. 185 – 203.
4. Grill, A. Tribology of diamond-like carbon and related materials: an updated review [Text] / A. Grill // *Surface and Coatings Technology.* – 1997. – Vol. 94 – 95. – P. 507 – 513.
5. Donnet, C. Recent progress on the tribology of doped diamond-like and carbon alloy coatings: a review [Text] / C. Donnet // *Surface and Coatings Technology.* – 1998. – Vol. 100 – 101. – P. 180 – 186.
6. Aksenov, I. I. Vacuum-arc discharge as an instrument for PVD process of DLC films deposition [Text] / I. I. Aksenov, V. E. Strel'nitskij // *Proceedings of ISDF – 5. – Kharkov. – 2002. – P. 39 – 64.*
7. Aksenov, I. I. Tribological behavior of diamond-like carbon coating at high rate of sliding [Text] / I. I. Aksenov, M. G. Maksimov, Yu. Ya. Palij, V. E. Strel'nitskij // *Diamond and Related Materials.* – 1999. – Vol. 2. – P. 866 – 870.
8. Krumpiegl, T. Amorphous carbon coatings and their tribological behaviour at high temperatures and in high vacuum [Text] / T. Krumpiegl, H. Meerkamm, W. Fruth, C. Schaufler, G. Erkens, H. Bohner // *Surface and Coatings Technology.* – 1999. – Vol. 120-121. – P. 550 – 560.
9. Wu, W., Umehara, N., Tokoroyama, T., Murashima, M., Zhang, R. (2024). Development of Low-Friction Technology for Treating Nitrogen-Containing Diamond-Like Carbon Coatings in Ambient Air Using Dielectric Barrier Discharge.

In: Ciulli, E., Ruggiero, A. (eds) Proceedings of ITS-IFTtoMM 2024. ITS-IFTtoMM 2024. Mechanisms and Machine Science, vol 160. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62616-6_10

10. Sjostrom, H. Superhard and elastic carbon nitride thin films having fullerene-like microstructure [Text] / H. Sjostrom, S. Stafstrom, M. Boman, J.-E. Sundgren // Physical Review Letters.– 1995. – Vol. 75. – P. 1336 – 1339.

11. Gao, Q.; Liu, S.; Hou, K.; Li, Z.; Wang, J. Graphene-Based Nanomaterials as Lubricant Additives: A Review. Lubricants, 2022, 10, 273. <https://doi.org/10.3390/lubricants10100273>

12. Broitman, E. Mechanical and tribological properties of CN_x films deposited by reactive magnetron sputtering [Text] / E. Broitman, N. Hellgren, O. Wanstrand, M. P. Johansson, T. Berlind, H. Sjostrom, J.-E. Sundgren, M. Larsson, L. Hultman // Wear. – 2001. – Vol. 248. – P. 55 – 64.

13. Li, Y.; Zhou, Z.; He, Y. Solid Lubrication System and Its Plasma Surface Engineering: A Review. // Lubricants, 2023, 11, 473. <https://doi.org/10.3390/lubricants11110473>

14. Ferrari, A. C. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon [Text] / A. C. Ferrari, J. Robertson // Physical Review B. – 2000. – Vol. 61. – P. 1409 – 1410

15. Chhowalla, M. Evolution of sp² bonding with deposition temperature in tetrahedral amorphous carbon studied by Raman spectroscopy [Text] / M. Chhowalla, A. C. Ferrari, J. Robertson, G. A. J. Amaratunga // Applied Physics Letters. – 2000. – Vol. 76. – P. 1419 – 1421.

16. Sobota, J. C-N/MeN nanocomposite coatings, deposition and testing of performance [Text] / J. Sobota, G. Sorensen, H. Jensen, Z. Bochnicek, V. Holy // Surface and Coatings Technology. – 2001. – Vol. 142 – 144. – P. 590 – 595.

17. Silva, E. Structure-property relations in ZrCN coatings for tribological applications [Text] / E. Silva, M. Rebelo de Figueiredo, R. Franz, R. Escobar Galindo, C. Palacio, A. Espinosa, S. V. Calderon, C. Mitterer, S. Carvalho // Surface and Coatings Technology. – 2010. – Vol. 205. – P. 2134 – 2141.

18. Sobota, J. Friction and wear properties of C-N/MeN_x nanolayer composites [Text] / J. Sobota, Z. Bochnicek, V. Holy // *Thin Solid Films*. – 2003. – Vol. 433. - P. 155 – 159.
19. Sobota, J. C-N/MeN nanocomposite coatings, deposition and testing of performance [Text] / J. Sobota, G. Sorensen, H. Jensen, Z. Bochnicek, V. Holy // *Surface and Coatings Technology*. – 2001. – Vol. 142 – 144. – P. 590 – 595.
20. Voevodin, A. A. Growth and structure of fullerene-like CN_x thin films produced by pulsed laser ablation of graphite in nitrogen [Text] / A. A. Voevodin, J. G. Jones, J. S. Zabinski, Zs. Czigany, L. Hultman // *Journal of Applied Physics*. – 2002. – Vol. 92. – P. 4980 – 4988
21. Polcar, T. The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures [Text] / T. Polcar, R. Novák, P. Široký // *Wear*. – 2006. – Vol. 260. – P. 40 – 49.
22. Lackner, J. M. Room temperature deposition of (Ti,Al)N and (Ti,Al)(C,N)coatings by pulsed laser deposition for tribological applications [Text] / J.M. Lackner, W. Waldhauser, R. Ebner, J. Keckés, T. Schöberl // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – Vol. 177 –178. – P. 447 – 452.
23. Polcar, T. The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures [Text] / T. Polcar, R. Novák, P. Široký // *Wear*. – 2006. – Vol. 260. – P. 40 – 49.
24. Abraham, S. Microstructure and mechanical properties of Ti-Si-C-N films synthesized by plasma-enhanced chemical vapor deposition [Text] / S.Abraham, E. Y. Choi, N. Kang, K. H. Kim // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – Vol. 202. – P. 915 – 919.
25. Ma, S. L. Synthesis and characterization of super hard, self-lubricating Ti-Si-C-N nanocomposite coatings [Text] / S. L. Ma, D. Y. Ma, Y. Guo, B.Xu, G. Z. Wu, K. W. Xu, P. K. Chu // *Acta Materialia*. – 2007. – Vol. 55. – P. 6350 – 6355.
26. Lackner, J. M. Room temperature deposition of (Ti,Al)N and (Ti,Al)(C,N)coatings by pulsed laser deposition for tribological applications [Text] / J.M. Lackner, W. Waldhauser, R. Ebner, J. Keckés, T. Schöberl // *Surface and*

Coatings Technology. – 2004. – Vol. 177–178. – P. 447–452.

27. Hu, J. J. Silver diffusion and high-temperature lubrication mechanisms of YSZ–Ag–Mo based nanocomposite coatings [Text] / J. J. Hu, C. Muratore, A. A. Voevodin // *Composites Science and Technology*. – 2007. – Vol. 67. – P. 336–347.

28. Aouadi, S. M. Tribological investigation of adaptive Mo₂N/MoS₂/Ag coatings with high sulfur content [Text] / S. M. Aouadi, Y. Paudel, W. J. Simonson, Q. Ge, P. Kohli, C. Muratore, A. A. Voevodin // *Surface and Coatings Technology*. – 2009. – Vol. 203. – P. 1304–1309.

29. Haponova, O.; Tarellyk, V.; Mościcki, T.; Tarellyk, N.; Półrolniczak, J.; Myslyvchenko, O.; Adamczyk-Cieślak, B.; Sulej-Chojnacka, J. Investigation of the Structure and Properties of MoS₂ Coatings Obtained by Electrospark Alloying. // *Coatings*, 2024, 14, 563. <https://doi.org/10.3390/coatings14050563>

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

31. Dachun, L.; Xiumin, C.; Dianjun, L.; Fei, W.; Xiaogang, L.; Bin, Y. Simulation of MoS₂ crystal structure and the experimental study of thermal decomposition. // *J. Mol. Struct.*, 2010, 980, 66–71.

32. Spirko, J. A. Electronic structure and reactivity of defect MoS₂: Relative stabilities of clusters and edges, and electronic surface states [Text] / J. A. Spirko, M. L. Neiman, A. M. Oelker, K. Klier // *Surface Science*. – 2003. – V. 542. – P. 192–204.

33. Stupp, B. C. Synergistic effects of metals co-sputtered with MoS₂ [Text] / B. C. Stupp // *Thin Solid Films*. – 1981. – V. 84. – P. 257–266.

34. Zabinski, J. S. Multi-environmental lubrication performance and lubrication mechanism of MoS₂/Sb₂O₃/C composite films [Text] / J. S. Zabinski, J. E. Bultman, J. H. Sanders, J. J. Hu // *Tribology Letters*. – 2006. – V. 23. – P. 55–63.

35. Teer, D. G. New solid lubricant coatings [Text] / D. G. Teer // *Wear*. – 2001. – V. 251. – P. 1068–1074.

36. Savan, A. Use of nanoscaled multilayer and compound films to realize a soft lubrication phase within a hard, wear-resistant matrix [Text] / A. Savan, E. Pfluger, R. Goller, W. Gissler // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – V. 126. – P. 159 – 165.

37. Ding, X. Unbalanced magnetron sputtered Ti–Si–N: MoS_x composite coatings for improvement of tribological properties [Text] / X. Ding, T. Zeng // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – V. 198. – P. 432 – 436.

38. Faruk Bidev, Özlem Baran, Ersin Arslan, Yasar Totik, İhsan Efeoğlu, Adhesion and fatigue properties of Ti/TiB₂/MoS₂ graded-composite coatings deposited by closed-field unbalanced magnetron sputtering, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 215, 2013, P. 266-271, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.091>.

39. Shtansky, D. V. Structure and tribological properties of WSex, WSex/TiN, WSex/TiCN and WSex/TiSiN coatings [Text] / D. V. Shtansky, T. A. Lobova, V. Yu. Fominski, S. A. Kulinich, I. V. Lyasotsky, M. I. Petrzhyk, E. A. Levashov, J. J. Moore // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – V. 183. – P. 328 – 336.

40. Shtansky, D. V. Structure and properties of multi-component and multilayer TiCrBN/WSex coatings deposited by sputtering of TiCrB and WSe₂ targets [Text] / D. V. Shtansky, A. N. Sheveyko, D. I. Sorokin, L. C. Lev, B. N. Mavrin, Ph. V. Kiryukhantsev-Korneev // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – V. 202. – P. 5953 – 5961.

41. Bowden, F. P. *The Friction and Lubrication of Solids* [Text] / F. P. Bowden, D. Tabor. – New York : Oxford University Press, 2001. – P. 424.

42. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. I. Melnyk, N. V. Tarelnyk, V. M. Zubko, V. M. Vlasovets, Ie. V. Konoplianchenko, S. G. Bondarev, O. V. Radionov, M. M. Mayfat, V. O. Okhrimenko, and A. V. Tkachenko, *The Surfaces Properties of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90% BK6 + 10% 1M Composition Applied by the Method of Electrospark Alloying with the Use of Special Technological Environments. Pt. 1. The Strengthened-Surfaces'*

- Structural State Features, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 5: 663—686 (2023)
43. Mulligan, C. P. CrN–Ag nanocomposite coatings: Tribology at room temperature and during a temperature ramp [Text] / C. P. Mulligan, T. A. Blanchet, D. Gall // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 204. – P. 1388 – 1394.
44. Mulligan, C. P. CrN–Ag nanocomposite coatings: High-temperature tribological response [Text] / C. P. Mulligan, T. A. Blanchet, D. Gall // *Wear*. – 2010. – Vol. 269. – P. 125 – 131.
45. Mitterer, C. Sputter-deposited Al–Au coatings [Text] / C. Mitterer, H. Lenhart, P. H. Mayrhofer, M. Kathrein // *Intermetallics*. – 2004. – Vol. 12. – P. 579 – 587.
46. Sérgio, S. Advanced Nanostructured Coatings Deposited by Magnetron Sputtering: Innovations, Applications, and Future Prospects. *Coatings* **2024**, *14*, 1041. <https://doi.org/10.3390/coatings14081041>
47. Discovery. Magnetron sputtering URL: <https://www.dentonvacuum.com/products/discovery/> (дата звернення 09.11.2024)
48. Psiuk, R., Chrzanowska-Giżyńska, J., Denis, P. *et al.* Microstructural and properties investigations of tantalum-doped tungsten diboride ceramic coatings via HiPIMS and RF magnetron sputtering. *Arch. Civ. Mech. Eng.* **24**, 239 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43452-024-01050-0>
49. Alix Gicquel, Khaled Hassouni, François Silva, Jocelyn Achard, CVD diamond films: from growth to applications, *Current Applied Physics*, Volume 1, Issue 6, 2001, Pages 479-496, [https://doi.org/10.1016/S1567-1739\(01\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S1567-1739(01)00061-X).
50. Zaguliaev, D., Konovalov, S., Ivanov, Y., Abaturova, A., Leonov, A. Microstructure and Microhardness of Piston Alloy Al-10Si-2Cu Irradiated by Pulsed Electron Beam. *Archives of Foundry Engineering*, 2020, Vol. 20(3), pp. 92-98, DOI: 10.24425/afe.2020.133336
51. Panin, V. E., Belyuk, S. I., Durakov, V. G., Pribytkov, G. A., & Rempe, N. G. (2000). Electron beam vacuum surfacing: Equipment, technology and properties of coatings. *Welding International*, *14*(7), 580–584. <https://doi.org/10.1080/09507110009549234>

52. Ryabtsev, I., Fomichov, S., Kuznetsov, V., Chvertko, Y., Banin, A. (2023). Plasma Surfacing. In: Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34390-2_3
53. Sidorov, S.A., Khoroshenkov, V.K., Lobachevskii, Y.P. *et al.* Improving Wear Resistance of Agricultural Machine Components by Applying Hard-Alloy Thick-Layer Coatings Using Plasma Surfacing. *Metallurgist* **60**, 1290–1294 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0443-7>
54. Nick A. Shepelin, Zahra P. Tehrani, Natacha Ohannessian Christof W. Schneider, Daniele Pergolesi, Thomas Lippert. A practical guide to pulsed laser deposition. *Chem. Soc. Rev.*, 2023, 52, 2294-2321. DOI: 10.1039/D2CS00938B
55. Тарельник В.Б., Коноплянченко Є.В., Гапонова О.П., Тарельник Н.В. Забезпечення захисту поверхонь торцевих імпульсних ущільнень турбомашин шляхом формування зносостійких наноструктур: монографія / під загальн. ред. В.Б. Тарельника. Суми: Університетська книга. 2022. 252 с.
56. Методи та засоби мікроскопії: моногр. / В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, Ю.Ю. Бондаренко та ін. К.: НТУУ "КПІ", 2013. 336 с.
57. Бялік О. М., Кіндрачук М. В., Кондратюк С. Є., Черненко В. С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія. Київ : Політехніка, 2006. 328 с.
58. Скануюча електронна мікроскопія. URL: (дата звернення 21.10.2024)
59. 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.
60. Тарельник В.Б., Коноплянченко Є.В., Гапонова О.П., Тарельник Н.В. Забезпечення захисту поверхонь торцевих імпульсних ущільнень турбомашин шляхом формування зносостійких наноструктур: монографія / під загальн. ред. В.Б. Тарельника. Суми: Університетська книга. 2022. 252 с.

61. Analysis of the structural condition of a surface coating after electroerosive alloying. I. Features of formation of electroerosive coatings on steel 45 / V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, N. S. Evtushenko, V. A. Herasymenko. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, 2018. Vol. 40, № 2. P. 235–253. DOI: 10.15407/mfint.40.02.0235
62. Економіка виробничого підприємства: Навчальний посібник / За ред. І. М. Петровича. К.: Знання 2001. 405 с.
63. Атамас П.Й. Управлінський облік: [навчальний посібник] / П.Й. Атамас. – К.: Центр навчальної літератури, 2006. – 440 с.
64. Ресурс НПАОП 28.5-1.02-07 Правила охорони праці при термічній обробці металів <https://pro-oboi.com.ua/doc/15180/>
65. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. К.: Основа, 2006. 448 с.
66. Крюковська О.А., Левчук К.О. Охорона праці в галузі (для хімічних спеціальностей) під редакцією к.т.н., доцента Толока А.О.: Навч. посібник. – 2011. – 230 с.
67. Зеркалов Д.В. Екологізація енергоспоживання: Монографія. К.: ТОВ Міжнар. фін. агенція, 1998. 271 с.