

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і назва галузі знань

Напрямок підготовки (спеціальність): 132 «Матеріалознавство,
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Підвищення зносостійкості лопатей млинових
вентиляторів шляхом наплавлення зносостійких
покривтів»**

Шифр MPTAM 24.23604.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,
група МТВАМ-23-1



Підпис

О. В. Глядик
Ініціали, прізвище

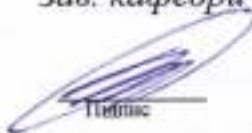
Керівник к.т.н., доц. каф ТАМ.



Підпис

С. Ф. Посонський
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.



Підпис

О. В. Духа
Ініціали, прізвище

11 — 12 — 2024 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, транспорту та архітектури*
Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*

Освітній рівень *магістр*

Спеціальність *132 «Матеріалознавство».*

Спеціалізація *«Відновлення та технічний сервіс автомобілів»*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ

 Диха О.В.

10 жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Глядику Олександрові Віталійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: Підвищення зносостійкості лопатей млинових вентиляторів шляхом наплавлення зносостійких покриттів.

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 26.08.2024р. № 60 (Д 28)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.12.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів, переддипломної практики.*

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

1) Аналіз умов роботи млинових вентиляторів та димососів.

2) Матеріали та методи дослідження.

3) Аналіз результатів досліджень.

4) Оцінка комерційного потенціалу та перспективності проведення наукових досліджень з позиції ресурсоефективності та ресурсозбереження.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 10 жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз умов роботи млинових вентиляторів та димососів	30.10.24	вик
2	Матеріали та методи дослідження	15.11.24	вик
3	Аналіз результатів досліджень	23.11.24	вик
4	Оцінка комерційного потенціалу та перспективності проведення наукових досліджень з позиції ресурсоефективності та ресурсозбереження	4.12.24	вик
5	Оформлення пояснювальної записки	6.12.24	вик
6	Допуск до захисту	12.12.24	вик
7	Захист дипломної роботи	13.12.24	

Студент


Підпис

Глядик О. В.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Посонський С. Ф.
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-23-1 Глядик Олександр Віталійович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Підвищення зносостійкості лопатей млинових вентиляторів шляхом наплавлення зносостійких покриттів» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 27 найменувань, розміщених на 3 сторінках, та 2 додатків розміщених на 15 сторінках. Роботу викладено на 87 сторінках, з них 79 сторінок основного тексту, на яких розміщено 20 рисунків і 11 таблиць.

Під час експлуатації димососів і млинових вентиляторів котельних станцій спостерігається інтенсивне і нерівномірне зношування їхніх робочих елементів, таких як лопаті, диски та стінки камер. Це зношування зумовлене наявністю вугільного пилу та золи, які мають абразивні властивості і діють на деталі обладнання під час роботи.

Через зношування лопатей знижується ефективність роботи вентиляторів і димососів, що безпосередньо впливає на продуктивність системи транспортування палива та відведення димових газів.

Нерівномірне зношування робочих лопатей призводить до дисбалансу роторів. Це спричиняє появу вібрацій, які можуть передаватися на інші частини обладнання, особливо на підшипникові вузли.





Експлуатація димососів і млинових вентиляторів у складних умовах високих температур та наявності твердих домішок вимагає ретельного підбору матеріалів і конструктивних рішень для забезпечення їх довговічності та ефективності. Запровадження заходів для підвищення зносостійкості значно подовжить термін служби цих елементів і зменшить кількість непередбачених простоїв обладнання.

Мета роботи: виконати аналіз зносостійкі наплавлених покриттів лопатей вентиляторів систем Fe-Cr-C-V та Fe-Cr-V-Mo-C, отриманих шляхом наплавленням електродами Т-590 та порошку Пр-Х18ФНМ.

Ключові слова: ЛОПАТІ МЛИНОВИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ, ГАЗОАБРАЗИВНЕ ЗНОШУВАННЯ; ПОКРИТТЯ; НАПЛАВЛЕННЯ; ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, МІКРОСТРУКТУРА.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ МЛИНОВИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ ТА ДИМОСОСІВ	9
1.1 Характеристики та призначення вентиляторів і димососів.	9
1.2 Аналіз конструкції млинових вентиляторів і димососів.	10
1.3 Механізм зношування лопатей вентиляторів та димососів.	23
1.4 Матеріали для виготовлення та зміцнення деталей, що працюють в умовах газообразивного зношування.	26
1.5 Поведінка матеріалів при газообразивному зношуванні.	35
2 МАТЕРІАЛІ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	39
2.1 Матеріали для наплавлення.	39
2.2 Обладнання та режими для наплавлення.	43
2.3 Приготування шліфів зразків.	50
2.4 Методи та обладнання для випробування покриттів на зносостійкість.	55
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	60
3.1 Структура матеріалу після наплавлення.	60
3.2 Результати лабораторних випробувань на зношування отриманих покриттів.	62
3.3 Аналіз структури матеріалу після лабораторних випробувань на зношування зразків покриттів.	64

МРТАМ 24.23604.000 ПЗ				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Глядик		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Підвищення зносостійкості лопатей млинових вентиляторів шляхом наплавлення зносостійких покриттів				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		4	87	
ХНУ МТВАм-23-1				

4 ОЦІНКА КОМЕРЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТА ПЕРСПЕКТИВНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ПОЗИЦІЇ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОСТІ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ	73
4.1 Потенційні споживачі результатів дослідження.	73
4.1.1 FAST – аналіз.	73
4.1.2 SWOT – аналіз.	77
4.2 Оцінка готовності проекту до комерціалізації.	80
ВИСНОВКИ	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84
ДОДАТКИ	87

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Млинові вентилятори є важливим елементом систем пилоприготування в котельних установках, що працюють на твердому паливі (зокрема на вугіллі), оскільки вони забезпечують ефективне транспортування палива та стабільний процес згорання. Ці вентилятори використовуються для пневматичного транспортування вугільного пилу та створення необхідного потоку повітря для подачі палива в топку парогенераторів. Вентилятори регулюють кількість і швидкість транспортування палива залежно від потреб парогенератора, забезпечуючи стабільний процес горіння. Рівномірний потік вугільного пилу та повітря сприяє ефективнішому згорянню палива, що підвищує загальну продуктивність котельного обладнання, зниженню шкідливих викидів в атмосферу та безперервну роботу котла, що є критично важливим для стабільної роботи котельної установки.

Робота димососів та млинових вентиляторів у котельних системах, що працюють на твердому паливі, пов'язана з кількома важливими особливостями, які впливають на їх експлуатаційні характеристики.

1. Температура робочого середовища:

- Димососи працюють при високих температурах, які можуть досягати до 180 °С. Це пов'язано з необхідністю видалення димових газів, що утворюються під час згорання палива. Підвищена температура створює додаткові вимоги до матеріалів і конструкцій димососів, оскільки вони повинні витримувати нагрівання і температурні коливання.

- Млинові вентилятори працюють у середовищі з температурою до 50 °С або вище. Вони транспортують вугільний пил і підтримують процес пилоприготування, де температури менш екстремальні порівняно з димососами, але все одно вимагають стійкості обладнання до підвищених температур.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

2. Насиченість твердими домішками:

- Млинові вентилятори транспортують повітря, насичене вугільним пилом, що утворюється в процесі подрібнення вугілля. Вугільний пил є абразивним матеріалом, що може призводити до зносу робочих частин вентиляторів, таких як лопатки та корпус.

- Димососи працюють із димовими газами, які містять тверді частки, зокрема золу, що утворюється під час згоряння вугілля. Ця зола також є абразивною і може спричиняти знос компонентів димососів, таких як крильчатки та внутрішні поверхні корпусу.

Під час експлуатації димососів і млинових вентиляторів котельних станцій спостерігається інтенсивне і нерівномірне зношування їхніх робочих елементів, таких як лопаті, диски та стінки камер. Це зношування зумовлене наявністю вугільного пилу та золи, які мають абразивні властивості і діють на деталі обладнання під час роботи.

Через зношування лопатей знижується ефективність роботи вентиляторів і димососів, що безпосередньо впливає на продуктивність системи транспортування палива та відведення димових газів.

Нерівномірне зношування робочих лопатей призводить до дисбалансу роторів. Це спричиняє появу вібрацій, які можуть передаватися на інші частини обладнання, особливо на підшипникові вузли.

Вібрація роторів через розбалансування швидко впливає на стан підшипників. Підшипникові вузли піддаються додатковим навантаженням, що може призвести до їх передчасного виходу з ладу.

За відсутності спеціальних заходів щодо підвищення зносостійкості деталей, час безперервної роботи димососів може бути обмеженим до двох-трьох тижнів, після чого обладнання потребує ремонту або заміни зношених елементів.

Експлуатація димососів і млинових вентиляторів у складних умовах високих температур та наявності твердих домішок вимагає ретельного

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підбору матеріалів і конструктивних рішень для забезпечення їх довговічності та ефективності. Запровадження заходів для підвищення зносостійкості значно подовжить термін служби цих елементів і зменшить кількість непередбачених простоїв обладнання.

Мета роботи: виконати аналіз зносостійкі наплавлених покриттів лопатей вентиляторів систем Fe-Cr-C-V та Fe-Cr-V-Mo-C, отриманих шляхом наплавленням електродами Т-590 та порошку Пр-Х18ФНМ.

Завдання роботи:

1. Порівняти зносостійкі властивості покриттів, отриманих різними методами наплавлення:

- Наплавлення електродами Т-590 (система Fe-Cr-C-V).

- Наплавлення порошком Пр-Х18ФНМ (система Fe-Cr-V-Mo-C).

2. Дослідити механізми зношування наплавлених покриттів в умовах експлуатації вентиляторів, що працюють у середовищі з вугільним пилом та золою.

3. Визначити оптимальні умови для покращення зносостійкості лопатей вентиляторів котелень за допомогою наплавленням матеріалів із систем Fe-Cr-C-V та Fe-Cr-V-Mo-C.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ МЛИНОВИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ ТА ДИМОСОСІВ

1.1 Характеристики та призначення вентиляторів і димососів.

Млинові вентилятори та димососи є важливими елементами промислових вентиляційних та аспіраційних систем, які використовуються в різних галузях промисловості для забезпечення подачі повітря або відведення відпрацьованих газів.

Млинові вентилятори використовуються в системах подачі повітря або інших газів для забезпечення технологічних процесів, таких як подрібнення матеріалів у млинах (наприклад, в цементних чи вугільних млинах).

Основні характеристики:

- Принцип роботи: Млинові вентилятори використовуються для транспортування порошкових матеріалів у потоці повітря. Це забезпечує ефективне подрібнення матеріалів і видалення продуктів подрібнення.

- Конструкція: Вентилятори можуть мати осьову або радіальну конструкцію залежно від вимог технологічного процесу.

- Продуктивність: Вони забезпечують високу продуктивність і низький рівень енерговитрат.

- Застосування: Млинові вентилятори використовуються у гірничій промисловості, цементних заводах, металургії, енергетиці, де потрібен постійний потік повітря для подрібнення та транспортування матеріалів.

Димососи призначені для видалення димових газів із промислових котлів, печей та інших агрегатів. Вони забезпечують відведення продуктів згоряння через димові труби.

Основні характеристики [1]:

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Принцип роботи: Димососи створюють необхідний вакуум у димовій трубі або каналі, що дозволяє забезпечити витягування газів. Вони працюють у складних умовах високих температур і агресивних середовищ.

- Конструкція: Найчастіше використовуються радіальні вентилятори з підвищеною термічною стійкістю.

- Продуктивність: Забезпечують велику витрату газів і розраховані на роботу в умовах підвищених температур.

- Застосування: Димососи використовуються в енергетиці, котельнях, металургії, на підприємствах з виробництва цементу, вугілля, хімічних речовин. Вони забезпечують ефективне видалення шкідливих викидів в атмосферу.

Основні відмінності:

- Призначення: Млинові вентилятори служать для транспортування матеріалів і подачі повітря для подрібнення, тоді як димососи призначені для видалення димових газів.

- Конструкція: Димососи здатні працювати в умовах високих температур та агресивних середовищ, тоді як млинові вентилятори більш орієнтовані на роботу з повітрям і матеріалами.

- Стійкість: Димососи виготовляються з матеріалів, стійких до високих температур і корозії, що не завжди є критичним для млинових вентиляторів.

1.2 Аналіз конструкції млинових вентиляторів і димососів.

Млиновий вентилятор (рис. 1.1) має зварне робоче колесо (крильчатка) одностороннього всмоктування, приклепане до литої маточини. Ступиця робочого колеса посаджена на кінець валу на шпонці.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

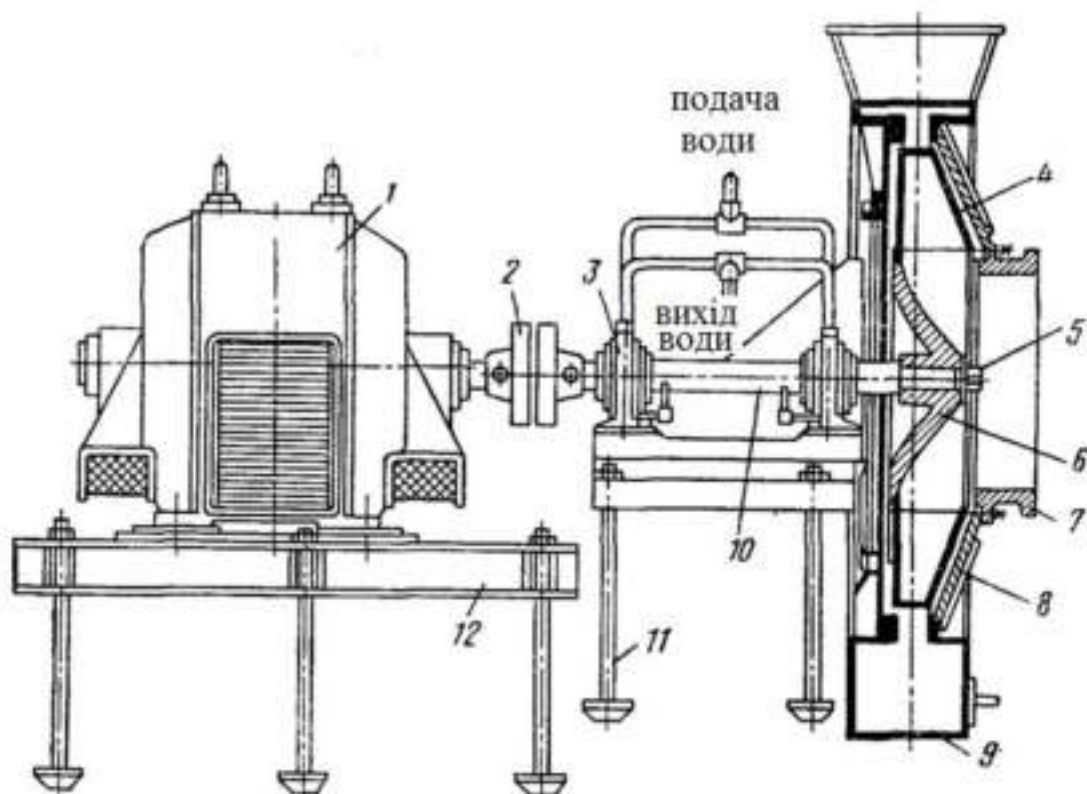


Рисунок 1.1 – Схема млинового вентилятора:

1 - електродвигун, 2 - сполучна муфта, 3 - підшипники, 4 - робоче колесо, 5 - гайка вала, 6 - маточина робочого колеса, 7 - всмоктувальний патрубок, 8 - броня кожуха, 9 - кожух, 10 - вал, 11 - анкерні болти, 12 - рама.

Вал встановлений у двох підшипниках та через пальцеву муфту з'єднаний з електродвигуном. Підшипники встановлені на рамі окремо і поміщені в загальний чавунний корпус. Найближчий до електродвигуна підшипник називається опорно-упорним, тому що він підтримує вал і обмежує його осьове переміщення. Інший підшипник називається опорним, тому що він лише підтримує вал. Робоче колесо обертається в кожусі равликоподібної форми, всмоктуючи з торцевого боку запилене вугільним пилом повітря.

Сучасні вентилятори для млинів для електростанцій виготовляють з підшипниками кочення, укладеними в загальний роз'ємний корпус з масляною ванною.

										Арк.
										11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Вентилятор та електродвигун зазвичай встановлюють на самостійних (окремих) рамах.

За конструкцією вентилятори та димососи мають багато спільного.

Для великих парогенераторів встановлюють вентилятори та димососи подвійного всмоктування.

Конструкція вентилятора типу ВМ (рис. 1.2) розрахована на встановлення його після сепараторів та циклонів та допускається запиленість потоку повітря до 80 г. вугільного пилу на 1м³ повітря [2].

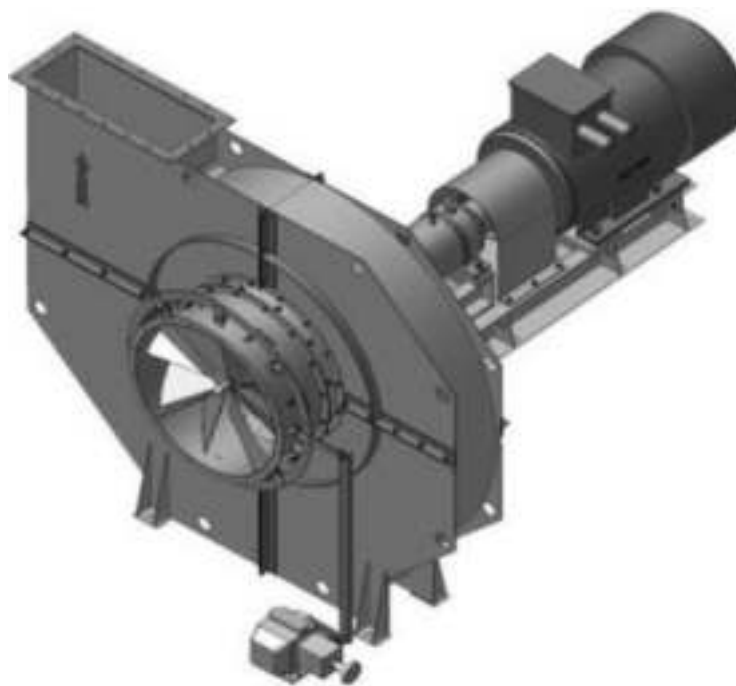


Рисунок 1.2 – Млиновий вентилятор типу ВМ.

Допускається застосування промислових вентиляторів ВМ у технологічних лініях на підприємствах чорної та кольорової металургії, а також в інших галузях промисловості для транспортування неагресивних середовищ із запиленістю аерозуміші, що переміщується, твердими частинками не більше 80 г/м³. За абразивністю та схильністю до налипання на лопатки робочих коліс зазначені частинки не повинні відрізнятися від вугільного пилу.

Технічні характеристики вентиляторів типу ВМ наведено в таблиці 1.1.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики вентиляторів типу ВМ [2].

Типорозмір вентилятора	Двигун		Витрата, м ³ /ч	Повний тиск, кг/м ²	Маса, кг	
	Потужність, кВт	Оберти, об/хв			без двигуна	повна
ВМ-15	160	1500	44000	680	1290	2820
ВМ-18	500	1500	108000	10650	3320	5950

Димосос (рис. 1.3) має робоче колесо двостороннього всмоктування, посаджене на вал. Вал спирається на підшипники ковзання чи кочення. Робоче колесо укладено у кожух, який укріплений на фундаментній рамі; на цій же рамі (або на окремих рамах чи стільцях) укріплені основи підшипників. Зазвичай підшипники є самовстановлюються з бабітовими вкладишами з кільцевим мастилом та водяним охолодженням. На одному кінці вал має пальцеву напівмуфту, яка зчіплюється з напівмуфтою електродвигуна. Електродвигун зазвичай встановлений на окремій рамі.

Вал димососа на ділянках, де розташовані всмоктують кожухи, захищений «сорочками» 9 (рис. 1.3) для охолодження цих ділянок повітрям, що засмоктується. Кожух димососа для багатозольних палив зсередини покритий захисною бронею, остання захищає кожух від стирання частинками золи, що містяться в димових газах.

Нагнітальний вентилятор має аналогічну конструкцію, але без захисту валу і кожуха, так як повітря, що засмоктується, не містить золи і температура його низька. Вентилятор має підшипники кочення без водяного охолодження.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

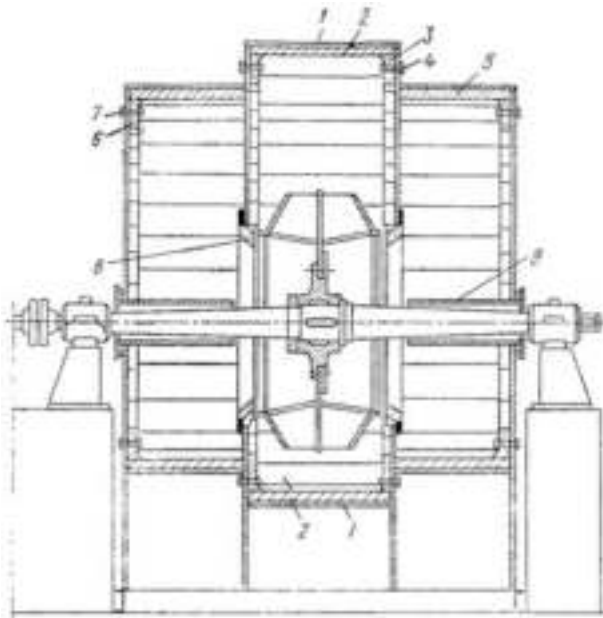


Рисунок 1.3 – Схема димососу двостороннього всмоктування:

1 – кожух, 2 – броня циліндричної частини равлика, 3 – броня торцевої частини равлика, 4 – болт кріплення броні до торцевої частини равлики, 5 – броня циліндричної частини кишені, що всмоктує, 6 – броня торцевої частини всмоктувальної кишені, 7 – болт, 8 – дифузор, 9 – охолоджувальна сорочка

Димососи ДН (лопатки робочого колеса загнуті назад) призначені для видалення димових газів з топок парових та водогрійних котлів, для переміщення пилогазоповітряних сумішей в інших технологічних установках.

Димососи ДН розраховані для переміщення димових газів та невибухонебезпечних пилогазоповітряних сумішей з температурою від -30 до $+200$ °С, запиленістю до $0,2$ г/м³. температура довкілля від -40 до $+40$ °С. Димососи можуть бути виготовлені з правим і лівим обертанням робочого колеса і кутами повороту патрубків нагнітального від 0° до 270° через 15° . Залежно від типорозміру димососа до комплекту поставки може входити (або не входити) напрямний апарат, який служить для регулювання продуктивності димососу. На рисунку 1.4 показаний димосос правого

										Арк.
										14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 24.23604.000 ПЗ					

обертання з положенням патрубку нагнітального 0° і з направляючим апаратом. Технічні характеристики димососів типу ДН наведено в таблиці 1.2 [3].



Рисунок 1.4 – Димосос ДН правого обертання.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики димососів типу ДН.

№ димососа	Встановлена потужність, кВт	Частота обертання, об/хв	Продуктивність, м ³ /год	Повний тиск, кг/м ²	Маса без двигуна, кг
ДН-2,7	1,1	1500	760	31	22
ДН-2,7	1,5	1500	760	42	22
ДН-2,7	1,1	3000	1450	120	22
ДН-2,7	2,2	3000	1450	120	22
ДН-3,5	3	1500	1800	30	56
ДН-6,3	5,5	1500	4000	80	195
ДН-8	11	1000	6500	78	316

Закінчення таблиці 1.2

ДН-8	15	1500	10500	170	322
ДН-9	11	1000	9500	99	380
ДН-9	15	1500	14800	222	375
ДН-10	11	1000	13 500	115	480
ДН-10	30	1500	20500	268	540
ДН-11,2	22	1000	19300	150	620
ДН-11,2	45	1500	23000	345	620
ДН-11,2	30	1500	28750	345	620
ДН-12,5	45	1000	26000	155	800
ДН-12,5	75	1000	26000	155	800
ДН-12,5	75	1500	39900	440	800
ДН-12,5	90	1500	39900	440	800
ДН-15	75	1000	50000	230	2500
ДН-15	90	1000	50000	230	2500
ДН-17	55	750	555000	220	3330
ДН-19	90	600	62000	170	3850
ДН-21	110	600	83000	210	4000
ДН-22	200	600	128000	200	5250
ДН-24	250	600	165000	240	7850

Равликоподібна частина та всмоктувальні кишені кожуха відцентрового димососа та вентилятора двостороннього всмоктування сконструйовані таким чином, що після зняття верхньої частини ротор виявляється відкритим і його можна виймати або встановлювати в кожух.

Вийнятий із кожуха димососа чи вентилятора з допомогою мостового крана чи талей ротор укладають на розташовані поблизу спеціальні козли. При цьому шийки валу повинні бути доступні для огляду та вимірювань. Їх обгортають картоном або тканиною, щоб уникнути пошкоджень [4].

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

На деяких старих електростанціях димососи розташовані в низьких приміщеннях, в яких важко розмістити будь-які підйомні механізми для зняття та встановлення ротора. У таких випадках ротор можна викочувати із кожуха на робочому колесі.

При ремонті млинового вентилятора або тяго нагнітальних машин одностороннього всмоктування робоче колесо можна зняти через отвір кожуха, що всмоктує, залишивши вал у підшипниках. Для цього з кожуха знімають патрубок і дифузор, що всмоктує, відгвинчують стопорну гайку з вала і за допомогою стяжної скоби знімають робоче колесо [5].

При капітальних ремонтах димососів та вентиляторів найбільш характерними є такі роботи: ремонт муфти, підшипників, крильчатки, кожуха, шиберів або клапанів, направляючих апаратів та деталей приводів, балансування ротора, центрування валу електродвигуна по валу димососа чи вентилятора.

При поточних ремонтах тяго нагнітальних машин і вентиляторів млинів зазвичай виконують наступні роботи: перевіряють стан сполучної муфти; перевіряють стан підшипників, системи мастила та водяного охолодження; виробляють ревізію ротора; відновлюють лопатки наплавленням твердими сплавами; перевіряють та відновлюють щільність кожуха.

Зазвичай під час ремонту крильчатки доводиться підварювати, наплавляти чи замінювати лопатки. Упущення під час перевірки або підварювання швів можуть призвести до відриву лопатки, руйнування крильчатки та аварійної зупинки відремонтованої машини. Підварювання лопаток виконують дуговим зварюванням [5].

Зношування лопаток визначають ретельним оглядом їх і обстукуванням молотком із загостреним кінцем (клювачем). Якщо після ударів загостреним кінцем молотка на лопатці залишаються наскрізні отвори або значні вм'ятини, замінюють лопатку або наплавляють. Цим самим

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

способом визначають ступінь зносу накладок на лопатки, щоб вчасно замінити їх.

Якщо зношені лопатки крильчатки не замінюють, їх відновлюють наплавленням. При поточних ремонтах на деяких електростанціях не виймають ротор з кожуха і наплавлення лопаток виконують на місці. При цьому працюють у респіраторах.

Наплавлення виконують зварювальники. Поверхня під наплавлення слюсар очищає від бруду, іржі чи окалини.

Знову виготовлені на електростанціях та наплавлені лопатки перед їх встановленням на крильчатку сортують таким чином [5]:

- визначають середню масу лопатки виготовленого комплекту, навіщо зважують всі лопатки, відібрані одного робочого колеса. Отриману загальну масу ділять на число лопаток, що дає середню масу $P_{ср}$ однієї лопатки комплекту;

- лопатки, призначені для певного робочого колеса, сортують на чотири групи: першу групу відбирають лопатки масою від 94 до 97 % від середньої маси $P_{ср}$; до другої групи відбирають лопатки масою від 97 до 100 % від середньої маси $P_{ср}$; у третю групу відбирають лопатки масою від 100 до 103 % середньої маси $P_{ср}$; до четвертої групи відбирають лопатки масою від 103 до 106 % від середньої маси $P_{ср}$.

Усі лопатки, маса яких перевищує 106 % від середньої маси $P_{ср}$, обробляють на наждачному диску, щоб довести їх до четвертої групи. Лопатки масою, менш необхідної першої групи, мають нормальні розміри, наплавляють збільшення маси. Лопатки з відхиленнями від нормальних розмірів замінюють на нові.

При обробці лопаток на наждачному диску не дозволяється знімати основний метал; допускається лише згладжування нерівностей наплавлення, за рахунок чого маса лопатки має бути доведена до необхідної.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Розсортовані за групами лопатки маркують, щоб їх можна було підібрати під час встановлення замість зношених.

Робоче колесо, на якому змінюють лопатки, встановлюють у зручне положення. Видаляють зношені лопатки, залишаючи лише кілька штук (8-10), щоб не розвалилося колесо, намічають ризики встановлення нових лопаток. У крильчатку двостороннього всмоктування встановлюють від кожної групи чотири лопатки. Дві з них встановлюють на кінцях діаметра з одного боку середнього диска, а інші - у таких самих точках з іншого боку диска (рис. 1.5, а) [5].

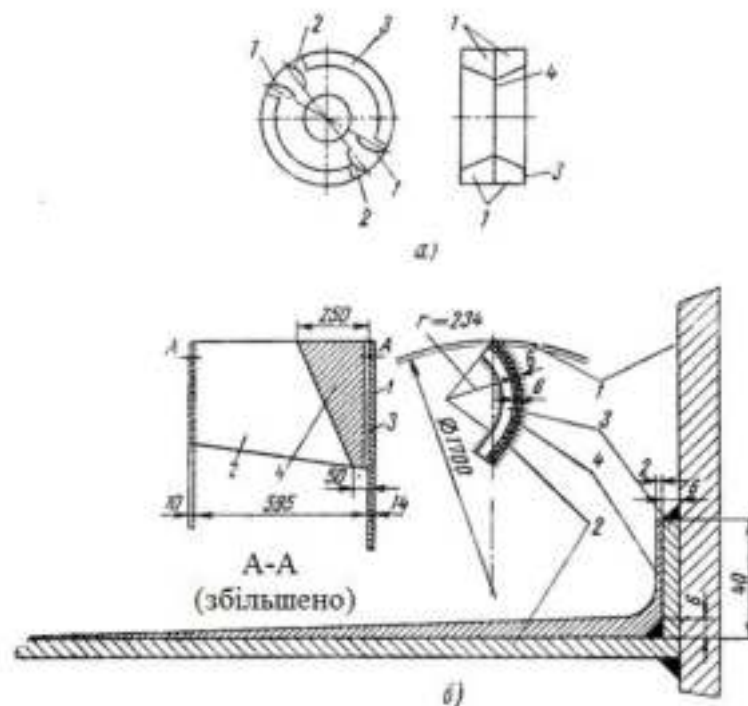


Рисунок 1.5 – Лопатки робочого колеса димососу:

а - розташування лопаток; 1, 2 - лопатки певної ваги, 3 - кільце, 4 - середній диск; б - наплавлення твердого сплаву на лопатку: 1 - диск, 2 - лопатка, 3 - захисна накладка, 4 - наплавлення

Розташування лопаток однакових груп по кінцях діаметра та по обидва боки середнього диска сприяє рівномірному розподілу маси щодо осі обертання крильчатки (полегшуючи статичне балансування), а також динамічної врівноваженості.

									Арк.
									19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 24.23604.000 ПЗ				

Крильчатки одностороннього всмоктування ремонтують, підбираючи з кожної групи по дві лопатки та встановлюючи їх у діаметрально протилежних точках кола.

Складання лопаток проводять за допомогою кондуктора (шаблону), який встановлюють за раніше розміченими ризиками. Крок лопаток при складанні не повинен коливатися більш ніж на 1%. Кожну встановлену лопатку прихоплюють електрозварюванням до середнього диска і зовнішнього кільця, а потім перевіряють правильність її положення за допомогою слюсарного косинця, одне ребро якого прикладають до площини диска, а інше повинно прилягати до лопатки, що утворює.

Після прихватки зварюванням та перевірки положення всіх лопаток роблять їх приварювання. Для прихватки та приварювання застосовують електроди якісні діаметром 3-4 мм.

Приварюють лопатки з боку потилиці, щоб шви не піддавалися стирання золою. Якщо передбачено наплавлення диска в місці стику з лопаткою, то на цій ділянці встановлюють захисну накладку (рис. 1.5 б), приварюючи її до диска і наплавляючи її. Це полегшує видалення зношених лопаток, так як зрубується (або сплавляється) шов, виконаний звичайними електродами, а не наплавка, що важко видалається.

Основним показником правильно відремонтованої крильчатки є величини радіального та осьового биття, які рекомендується перевіряти після посадки крильчатки на маточину, щоб врахувати і геометричні неточності останньої.

Биття крильчатки по зовнішньому діаметру допускаються в радіальному напрямку не більше 5 мм, в осьовому - не більше 3 мм. Неприпустиме биття усувають виправленням крильчатки з підігрівом. Після виправлення обов'язковою є перевірка міцності кріплення лопаток та інших зварних швів [5].

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відремонтване робоче колесо перевіряють на паралелях і за потреби балансують.

Ремонт кожухів димососів та вентиляторів полягає в усуненні нещільностей, що виникають від золотого зносу, та у заміні зношеної броні. Нещільності виявляють, оглядаючи кожух під час роботи механізму, тобто перед ремонтом. У сумнівних випадках користуються прапорцями з легкої тканини, за відхиленням яких виявляють нещільності.

Кожух нагнітального вентилятора броні не має. Кожух млинового вентилятора зсередини покритий бронею із сталевих або чавунних плит, укріплених за допомогою електрозварювання або болтами. Броня захищає корпус від стирання вугільним пилом.

Броня димососів виконується з листової сталі товщиною 16-20 мм, чавунних або сталевих плит товщиною 35-40 мм, плит із звичайної вуглецевої сталі, наплавлених твердими сплавами [5].

Кріпиться броня до кожуха димососа болтами з потопленими головками. Болти з виступаючими головками застосовувати не слід, тому що при зносі головок золою броня може відстати від кожуха і пошкодити крильчатку. Не рекомендується також з'єднувати плити тільки за допомогою клинових замків на торцях, оскільки при випаданні однієї плити внаслідок зношування або пошкодження виникає небезпека випадання решти всіх плит.

Броня циліндричної поверхні кожуха укладається так, що краї її заходять за броню торцевих поверхонь, що забезпечує надійне кріплення всієї броні (див. рис. 1.3). На кожух димососа кожного типу виготовляють шаблони, за якими заздалегідь виготовляють або підбирають і підганяють броньове покриття з тим, щоб його встановити на місце без копітких підгоночних операцій.

Броневі плити повинні щільно прилягати до стінок кожуха, а зазор на стику допускається трохи більше 2-3 мм. Особливо уважно стежать, щоб кріплення плит (болти, зварювання) було захищено від стирання золою.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зазвичай димососи та дутьові вентилятори великих електростанцій мають спрямовуючі апарати радіального типу або спрощені, схожі на звичайні шибери. На млинових вентиляторах як шибери встановлюють ретельно пригнані круглі поворотні диски, зазвичай звані щільними клапанами.

Ремонт направляючих апаратів та приводів полягає в очищенні, розбиранні, перевірці, зміні зношених елементів, відновленні пошкоджених деталей та у складанні та вивірянні положення [5].

Положення елементів направляючих апаратів перевіряють після закінчення ремонту, відкриваючи та закриваючи лопатковий апарат.

Під час ремонту контролюють щільність фланцевих з'єднань корпусу клапана. При необхідності з'єднання підтягують чи змінюють прокладки. Перевіряють сальникове набивання поворотної заслінки і, як правило, замінюють її новою. Як набивання застосовують азбестовий шнур, густо пересипаний сухим сріблястим графітом; таке набивання надійне в експлуатації.

У процесі збирання машини після ремонту всі деталі ретельно очищають від бруду, при цьому оброблені ділянки промивають гасом.

Збирають ротор у порядку, зворотному розбиранні за допомогою тих же вантажопідйомних механізмів. Встановлюючи крильчатку на вал, стежать, щоб лопатки при обертанні виявилися загнутими вперед (старі конструкції) або назад (сучасні конструкції).

Покладений на підшипники ротор повертають кілька разів вручну, щоб вал встановився у вкладишах, а потім виробляють остаточну вивірку положення підшипників на стійках і крильчатки в кожусі. При вивірці положення крильчатки необхідно забезпечити її переміщення убік від завязаного підшипника до опорного в результаті теплового подовження валу, якщо температура робочого середовища (повітря, газів) перевищить температуру навколишнього середовища.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вивіряють положення крильчатки в кожусі пересуванням ротора з підшипниками.

Дифузори на всмоктуючих сторонах кожуха замінюють у міру зношування при капітальному ремонті. Найбільш поширений спосіб кріплення дифузорів - електрозварювання, а тому при зміні дифузорів потрібне газове різання та сплавлення зношених частин.

При припасуванні нових дифузорів зберігають задані розміри зазорів між робочим колесом і дифузором, щоб не перешкоджати розширенню валу і не знижувати економічність роботи димососа або вентилятора.

Рекомендується виконувати заготовлю дифузорів з чотирьох-шість частин по довжині кола, так як при цьому легше виконувати підганання [6].

Вивіряючи положення дифузора, враховують величину торцевих биття з обох боків крильчатки і витримують розмір креслення від точки найбільшого биття.

1.3 Механізм зношування лопатей вентиляторів та димососів.

Правильне компонування проточної порожнини машини та системи газоходів, що дозволяє зменшити або виключити попадання вугільного пилу на внутрішні поверхні, що обмежують потік, знижує зношування.

Знос млинових вентиляторів та димососів залежить від частоти обертання. Якщо подача та тиск задані, слід зменшити частоту обертання робочого колеса. Але розміри машини при цьому буде збільшено. Тертя абразивних частинок розподілиться з більшої поверхні, знос буде істотно знижений [1].

Під час протікання газу з пилом через робоче колесо потік твердих частинок змінює напрям з осьового на радіальний. Абразивні частинки внаслідок відцентрової сили потрапляють на втулку та основний диск,

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

зношуючи їх. Потік, перетинаючи решітку лопатей, що обертається, призводить їх до руйнування [7].

Газоабразивне зношування є формою механічного зношування, яке виникає в умовах дії потоку газу, що переносить тверді частинки (абразиви). Це явище характерне для багатьох галузей промисловості, таких як енергетика, металургія, гірнича справа та будівництво. Знос спричиняється ударами абразивних частинок, які з високою швидкістю стикаються з поверхнею матеріалу, приводячи до його поступового руйнування.

Основні етапи механізму газоабразивного зношування [7]:

1. Подача абразивних частинок у потік газу.

Потік газу (повітря, димові гази) переносить тверді частинки (абразиви), які мають високу швидкість. Абразивними частинками можуть бути природні або штучні матеріали, такі як кварц, пісок, оксиди металів тощо.

2. Удар абразивних частинок об поверхню.

Абразивні частинки під великим кутом стикаються з поверхнею матеріалу, викликаючи мікроудари. Ці удари можуть бути локальними та мають характер мікрорізання або деформації поверхні. Частинки можуть або залишити слід, або видалити дрібні фрагменти матеріалу, що сприяє його зношуванню.

3. Механічна деформація поверхні.

При зіткненні абразивних частинок з поверхнею матеріалу виникає мікропластична деформація. У разі удару з високою енергією частинки можуть проникати в поверхню, залишаючи на ній сліди або дрібні тріщини.

4. Видалення матеріалу.

Через багаторазові удари абразивів матеріал починає поступово руйнуватися. Мікрочастинки матеріалу, які не можуть витримати подальшої деформації, відколюються і видаляються з поверхні, що призводить до зменшення маси та об'єму робочого шару.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

5. Форми зношування:

- Абразивне різання: Частинки діють як різальний інструмент, особливо при куті падіння, близькому до 90° , що призводить до утворення дрібних борозенок і тріщин.

- Ерозійне зношування: Відбувається при малих кутах падіння частинок, коли їх рух переважно ковзаючий, викликаючи ерозію поверхні.

Чинники, що впливають на інтенсивність газоабразивного зношування [7]:

1. Швидкість потоку газу і частинок.

Чим вища швидкість частинок, тим більша їхня кінетична енергія, що підвищує силу ударів і прискорює зношування.

2. Розмір і твердість абразивних частинок.

Великі та тверді частинки завдають сильніших пошкоджень поверхні, що збільшує швидкість зношування.

3. Кут зіткнення частинок із поверхнею.

Максимальне зношування відбувається при куті зіткнення близько 90° , коли частинки найбільше впливають на поверхню. При малих кутах домінує ковзання частинок, що також спричиняє ерозію, але меншу за інтенсивністю.

1. Малі кути атаки ($15...30^\circ$):

- У момент удару метал деформується і виштовхується, утворюючи лунки, які мають різну форму, глибину та площу.

- Спочатку лунка має максимальну ширину і глибину, але поступово її розміри зменшуються під час подальшого руху частинки.

- Лунки набувають кометоподібної форми, де ширша частина розташована на початку контакту.

2. Середні кути атаки (45°):

- Лунки стають глибшими і менш протяжними.

- Однак, як і при менших кутах, можна розрізнити напрямок потоку абразивних частинок.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Великі кути атаки (90°):

- Картина змінюється кардинально: абразивні частинки здійснюють удар по поверхні без руху по ній, тому ризики не утворюються.

- Форма і розміри лунок визначаються швидкістю та розмірами частинок, а також фізичними властивостями матеріалу — його твердістю, в'язкістю, міцністю та крихкістю.

При різних кутах атаки спостерігаються різні механізми зношування поверхні. Малі кути атаки призводять до мікрорізання та деформації, тоді як великі кути створюють ударний ефект без значного переміщення частинок уздовж поверхні. Це свідчить про необхідність врахування кута атаки при проектуванні матеріалів і покриттів для підвищення їх зносостійкості.

4. Властивості матеріалу поверхні.

Міцність, твердість та еластичність матеріалу поверхні впливають на його стійкість до зношування. Твердіші та менш крихкі матеріали краще протистоять абразивному впливу [8].

Зменшення газоабразивного зношування можливе за рахунок використання зносостійких матеріалів або покриттів, оптимізації робочих режимів та захисних бар'єрів, що знижують вплив абразивних частинок на критичні компоненти. Завдяки цьому термін служби робочого колеса збільшується у кілька разів.

1.4 Матеріали для виготовлення та зміцнення деталей, що працюють в умовах газоабразивного зношування.

В дослідженнях [10] були виконані випробування на газо абразивне зношування зразків зі сплавів на основі плавлених карбідів вольфраму ($WC+W_2C$, або реліт), наплавлених плазмово-порошковим методом у вигляді композиційних металів в один шар. Зразками були композиційні сплави, що склалися з сферичних гранул карбиду вольфраму і матричного сплаву Ni-

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Cr-Si-B. Було виявлено, що зношування сплавів на основі плавлених карбідів вольфраму не суттєво залежить від властивостей і твердості матриці при малих кутах атаки (до 15°). Це свідчить про те, що за таких умов головну роль у зношуванні відіграють тверді абразивні частинки, що взаємодіють з гранулами карбіду вольфраму, тоді як внесок матриці у процес деформації і руйнування матеріалу мінімальний. Дослідження підкреслює важливість вибору відповідних матеріалів для підвищення стійкості до абразивного зношування у середовищах, де спостерігаються низькі кути атаки.

Також у цьому дослідженні порівнювали зносостійкість сплавів Ni-Cr-Si-B та C-Cr-Ni-Si-Mn за умов кімнатної температури. З'ясовано, що в умовах кімнатної температури сплав Ni-Cr-Si-B демонструє зносостійкість, яка перевищує показники сплавів C-Cr-Ni-Si-Mn у 2,7 разу. Однак, при високих температурах зносостійкість сплаву Ni-Cr-Si-B суттєво знижується.

Армування карбідами ванадію:

- Сферичні гранули карбіду ванадію як армуюча фаза збільшують зносостійкість композиційних сплавів на 10-12% у порівнянні з використанням дроблених карбідів.

- Це явище пояснюється тим, що карбіди при зношуванні створюють так званий "тіньовий ефект", захищаючи матричний матеріал від абразивної дії.

Така структура з армуючими сферичними карбідами ванадію забезпечує ефективніший опір зношуванню завдяки їх геометрії, що дозволяє краще розподіляти навантаження і захищати матрицю від руйнування.

У роботі [10] було проведено аналітичний огляд матеріалів для наплавлення, які характеризуються стійкістю до газоабразивної дії. Одним із таких матеріалів є порошкова стрічка ПЛ-АН 111, що широко використовується для наплавлення контактних поверхонь зрівняльних клапанів доменних печей. Ця стрічка вирізняється високими

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

експлуатаційними та технологічними властивостями, проте є дуже дорогою через використання нікелевої оболонки.

Автори роботи запропонували заміну стрічки ПЛ-АН 111 на наплавочні матеріали на основі заліза, орієнтуючись на високохромисті чавуни, які легуються сильними карбідоутворюючими елементами, такими як: вольфрам (W), ванадій (V), молібден (Mo), ніобій (Nb). Використання таких сплавів дозволяє досягти високої зносостійкості за меншої вартості матеріалу, порівняно з нікелевими сплавами. Застосування залізної основи з додаванням карбідоутворюючих елементів забезпечує ефективний захист поверхонь від абразивного зношування, що робить цей варіант економічно вигіднішим, зберігаючи високі технологічні показники.

Для підвищення зносостійкості наплавлених матеріалів при газо абразивному зношуванні необхідно забезпечити вміст зміцнюючої карбідної фази в обсязі не менше 30...35 %. Крім того, важливо контролювати величину розкриття тріщин, оскільки вони можуть бути потенційними осередками руйнування або продувів [10].

Ключові аспекти:

- Наплавні матеріали з нікелевою матрицею, армованою карбідами, добре підходять для забезпечення необхідного рівня зміцнення.

- Тріщини в наплавленому шарі мають вирішальне значення для експлуатаційної надійності в умовах газоабразивного зношування. Їхній напрямок і ширина залежать від технології наплавлення.

Вимоги до тріщин:

- Тріщини, що утворюються під кутами 0...30° відносно газового потоку, повинні мати ширину розкриття до 0,05 мм.

- Тріщини під кутами більше 30° можуть мати ширину до 0,1 мм.

Контроль над величиною та напрямком тріщин дозволяє мінімізувати їх негативний вплив і знизити ймовірність руйнування покриття під впливом газоабразивних частинок.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

У роботі [9] було встановлено, що підвищення зносостійкості наплавленого металу до газо абразивного зношування досягається за рахунок легування бором у кількості 3-5 %. Це сприяє утворенню зміцнюючої карбоборидної фази з вмістом до 40%, яка ефективно протистоїть зношуванню.

Однак легування бором має суттєві недоліки:

- Схильність до утворення тріщин у наплавленому металі значно підвищується.

- Легування бором призводить до зниження пластичних властивостей металу, що спричиняє збільшення кількості тріщин, розкриття та відколів.

- Механічна обробка наплавленого шару ускладнюється через його високу твердість і крихкість, що може стати проблемою для подальшого використання деталей з таким покриттям.

Попри високу зносостійкість, ці проблеми обмежують застосування борованих покриттів у ситуаціях, де важлива пластичність і легкість обробки матеріалу.

Авторами роботи [11] було розглянуто дослідний сплав на сонові системи Fe–C–Cr з додатковим легуванням ванадієм (1,5 - 2,0 %) та з вмістом бору (1,8 - 2,2 %). Цей сплав, наплавлений порошковим дротом ПП-260X14P2Ф2НЗ, показав вищу пластичність порівняно з попередніми сплавами, хоча його зносостійкість була у 1,5...1,8 рази вищою за зносостійкість сплаву, наплавленого дротом ПП-АН 170.

Проте, незважаючи на переваги в зносостійкості, цей електродний дріт не отримав широкого застосування через низьку стійкість до утворення тріщин в наплавленому шарі.

З проведених досліджень можна сформулювати такі принципи розробки наплавних матеріалів на залізній основі:

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Легування карбідоутворюючими елементами (Mo, V, W, Nb, Ti) значно підвищує газоабразивну зносостійкість металу.

2. Карбідна фаза у таких сплавах повинна мати підвищену твердість і округлу форму, що сприяє покращенню зносостійкості.

3. Модифікація наплавленого металу дозволяє оптимізувати його структуру та мікроструктурні властивості, забезпечуючи кращий опір зносу.

Ці принципи спрямовані на створення зносостійких покриттів для деталей, що працюють у важких умовах, наприклад, під впливом газоабразивного середовища.

У структурі наплавленого шару металу важливо уникати появи тендітного мартенситу, що досягається шляхом легування елементами, такими як Ni, Cu, Mn, що є аустенітоутворюючими. Це дозволяє зберегти пластичність металу та запобігти його крихкості [9].

Твердість наплавленого шару металу повинна бути в межах HRC 48...54. Якщо твердість вища, метал стає крихким, що призводить до проблем у процесі обробки, зокрема, під час шліфування. В таких умовах виникає розбивання країв тріщин, що спричинює передчасне руйнування матеріалу.

Для підвищення зносостійкості наплавленого шару можна використовувати ефект дисперсійного твердіння, що досягається шляхом термічної обробки, зокрема, відпалу. Ця обробка дозволяє зняти залишкові напруження, які виникають після процесу наплавлення, і може додатково поліпшити властивості металу під час його експлуатації.

Таким чином, правильний вибір легуючих елементів, контроль твердості та проведення термічної обробки є важливими факторами для забезпечення оптимальних властивостей наплавленого металу.

Дослідження [12] показали, що газоабразивний знос покриттів на зразках зі сплавів OT4-1 (титанова основа) та EP718ID (нікелева основа) і

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сталі EI961 (високолегована сталь) залежить від кута атаки абразивного потоку.

При куті атаки 70° спостерігається більш інтенсивне зношування, ніж при тангенціальному потоці з кутом 20° . Це вказує на те, що при великих кутах атаки абразивні частинки впливають на матеріал сильніше.

Однак для титанових сплавів, таких як OT4-1 з покриттями на основі TiN, VC, VN та ZrN, зворотна залежність: більший знос спостерігається при малих кутах атаки. Це пояснюється тим, що покриття цих сплавів менш ефективно опирається впливу абразивних частинок, що рухаються вздовж поверхні під малими кутами.

Характер пошкодження зразків залежить не лише від кута атаки, але й від складу сплаву і типу покриття. Випробування показали, що композиційні покриття, зокрема, на основі карбідів і нітридів титану та ванадію, мають різний механізм пошкодження під впливом абразивного середовища, що підкреслює важливість вибору оптимальної комбінації сплаву та покриття для підвищення зносостійкості в конкретних умовах експлуатації.

Багатошарові покриття ER-7 та EK-7, розроблені для захисту лопатей компресорів під час ремонту вертольотів з двигунами TV3-117 та TV2-117, показують низьку стійкість до ерозії в умовах газоабразивного зносу. У дослідженні було також розглянуто газоабразивне зношування сталей EI961 та титанових сплавів VT8-1, покритих EK-7 та ER-7. Результати випробувань [12] вказують, що опір ерозії цих покриттів значною мірою залежить від розміру частинок ерозійного середовища та кута атаки. Так, при зношуванні кварцовим піском (розмір частинок близько 240 мкм) та куті атаки, що складає 70° , обидва покриття показали недостатній опір до зношування під дією пилоповітряного потоку. Це свідчить про слабкість покриттів у більш агресивних умовах. Однак, при куті атаки 20° зносостійкість покриттів була значно вищою, що вказує на залежність їхньої ефективності від кута потрапляння абразивних частинок.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Відносна зносостійкість покриттів ЕК-7 та ER-7 при менших кутах атаки в 1,5–2,5 рази вища, ніж у непокритого основного матеріалу. З двох покриттів, ER-7 показало дещо вищу ерозійну стійкість порівняно з ЕК-7.

Багатошарові покриття систем TiC, Cr₃C₂, VN зі сталевою матрицею і TiN, ZrN, VN, VC та Cr₃C₂ з титановою матрицею володіють високим опором до газоабразивного зношування, але цей опір суттєво залежить від товщини покриття [13].

У роботі [14] проведено порівняння зносостійкості покриттів з основою Fe-Cr-B-Al зі сталлю 12X1МФ, що застосовується для захисту казанів на теплових електростанціях. Дослідження показали, що через значну пористість електродугових покриттів, отриманих порошковим дротом, їх зносостійкість до газо абразивного зношування за кімнатної температури є нижчою, ніж у сталі 12X1МФ, твердість якої становить 400 HV.

Ключовою проблемою покриттів з вищою твердістю є поява тріщин, спричинених значними напруженнями розтягування, що виникають у процесі розпилення (понад 100 МПа). Це негативно впливає на їх зносостійкість. Наприклад, покриття на основі системи Fe-Cr-B-Al з вмістом 12 % Al та твердістю 560 HV показує зносостійкість, близьку до сталі 12X1МФ.

Однак, зносостійкість покриття з 2 % Al та вищою твердістю 930 HV була вдвічі нижчою через схильність до тріщиноутворення та пористість, що значно знижує його здатність протистояти абразивному зносу.

При зростанні температури випробувань покриття на основі Fe-Cr-B-Al демонструють зменшення втрати маси порівняно зі сталлю, що призводить до підвищення їх зносостійкості навіть при температурі понад 400 °С. Це явище свідчить про те, що при високих температурах покриття стає більш стійким до газоабразивного зносу, ніж сталь.

У випадку сталі 12X1МФ, втрата маси від газоабразивного зносу зростає зі збільшенням температури для всіх кутів падіння абразивних частинок. Це можна пояснити утворенням на її поверхні плівки оксидів

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заліза, яка стає товстішою за підвищених температур, але легко руйнується абразивним матеріалом, що підвищує швидкість зношування сталі.

За температур понад 400 °С в покритті починається процес рекристалізації, що сприяє частковому або повному заповненню мікротріщин продуктами корозії газу. Це позитивно впливає на стан матеріалу, знижуючи рівень розтягуючих напружень або навіть призводячи до утворення стискаючих напружень. Такі зміни сприяють підвищенню зносостійкості покриття, оскільки стискаючі напруження допомагають запобігти подальшому розповсюдженню тріщин і зменшують вплив газоабразивного зношування.

При куті падіння абразивних частинок 30° поверхня хімічно однорідних покриттів зношується рівномірно, що свідчить про їх стабільну стійкість до зношування. У той же час на поверхні хімічно гетерогенних покриттів спостерігається утворення шорсткості. Виявлені на шорсткій поверхні тверді фази, зокрема залізні бориди, леговані хромом, підтверджуються даними спектрального аналізу. Ці тверді фази можуть виступати як осередки зносу або зменшувати його шляхом посилення поверхневої міцності покриття.

Під час газоабразивного зносу за кімнатної температури покриття зношувалися через виникнення та поширення мікротріщин, а також через виривання значних фрагментів покриття. Це спостерігалось як по об'єму матеріалу, так і вздовж напрямку потоку абразивних частинок. Такий механізм зношування призводить до прогресивної деградації покриття, знижуючи його захисні властивості і прискорюючи втрату матеріалу.

Під час газоабразивного зношування при високих температурах покриття зношувалися незначно завдяки утворенню захисних плівок оксиду заліза (Fe₂O₃). У діапазоні температур 300-600 °С на поверхні покриттів та між лунками формувалися фрагменти ударостійких оксидних плівок, таких як Al₂O₃ (оксид алюмінію) і Cr₂O₃ (оксид хрому) [14]. Ці оксидні плівки

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективно знижували зношування покриттів, утворюючи захисний шар, що обмежував безпосередній контакт з абразивними частинками.

При зростанні температури випробування, тріщини в покриттях заповнюються продуктами корозії (легованого хрому заліза, та оксидів алюмінію), що супроводжується вирівнюванням опору зносу гетерогенних і гомогенних покриттів.

У роботах [16-22] досліджували газоабразивне зношування таких матеріалів, як алюміній, мідь, м'яка та нержавіюча сталь. Результати показали, що алюміній 6061 продемонстрував підвищену стійкість до ерозії, тоді як нержавіючі сталі 316 та 304 продемонстрували набагато гірші характеристики зносу. Це може бути пов'язано з умовами випробувань, включаючи вплив температури приміщення.

Більшість дослідних матеріалів зазнавали пластичної деформації за рахунок максимальної швидкості ерозії, яка спостерігалася при малих кутах атаки (30° і 45°). При збільшенні кута атаки (60° , 75° і 90°) швидкість ерозії значно зменшувалася. Зокрема, нержавіючі сталі 316 і 304 зазнавали більшої ерозійної шкоди при підвищеній температурі 60°C .

У дослідженні [16] виявлено типові механізми зношування, такі як кратери, пухкості, нерегулярні вм'ятини, крихке руйнування та подряпини, яке характеризувалося тріщинами, що виникали в різних місцях на поверхні зразків.

Зносостійкі рубці мали еліптичну форму при кутах атаки 30° та 45° , що є типовою ознакою для матеріалів, підданих впливу при низьких кутах атаки ($\alpha \leq 45^\circ$). При підвищеній температурі 60°C і кутах атаки 90° спостерігалася майже кругла форма рубців, що вказує на особливості зношування матеріалів при таких умовах [15].

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5 Поведінка матеріалів при газоабразивному зношуванні.

Механізм ерозійного або газоабразивного зношування вважають найбільш складним серед усіх видів зношування. Таке зношування супроводжується агресивним ударним впливом частинок абразиву, котрі діють під якимось певним кутом до поверхні тертя. Такий кут називають кутом атаки і він може змінюватися від 0° до 90° . Ерозійне зношування залежить від таких факторів, як розмір і швидкість частинок, температура середовища, а також властивості матеріалу, включаючи його твердість і пластичність.

Кути атаки визначають тип зношування:

- При малих кутах атаки (близько $15^\circ \dots 30^\circ$) відбувається мікрорізання, де частинки рухаються паралельно поверхні, створюючи подряпини та виривання матеріалу.

- При середніх кутах атаки (близько 45°) абразивні частинки формують глибші лунки, але менш витягнуті порівняно з малими кутами.

- При високих кутах атаки ($80^\circ \dots 90^\circ$) абразивні частинки завдають прямого удару по поверхні без значного зсуву, що спричиняє утворення глибоких кратерів і відшарування матеріалу.

У зоні удару спостерігається складний процес зношування. Майже не можливо відокремити одну абразивну частку та спостерігати за її траєкторією руху [7]. Тому слід враховувати, що всі експериментальні дані це не що інше як усереднена картина дії рухомих частинок, що є результатом індивідуально впливу кожної з них на поверхню зношування. Певна доля частинок, що вдаряються з деякою швидкістю об поверхню зношування не змінюючи своєї траєкторії і швидкості, а інша доля просто витісняється сусідніми частинками та не долітає до поверхні [8].

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час зношування газоабразивного на поверхні матеріалу спостерігається наклеп, тобто деформаційне зміцнення. Обсяг, глибина та ступінь зміцнення залежать від кількох факторів, серед яких:

- Вихідна структура металу: матеріали з різною мікроструктурою реагують на зношування по-різному. Наприклад, тверді загартовані сталі мають вищу стійкість до наклепу порівняно з нормалізованими сталями.

- Швидкість потоку: вищі швидкості абразивних частинок збільшують енергію їх удару по поверхні, що сприяє більш інтенсивному наклепу.

- Кут атаки: кути атаки абразивних частинок впливають на характер зношування. Малі кути сприяють мікрорізанню, тоді як великі кути, особливо близькі до 90° , спричиняють значне утворення наклепу через ударне навантаження.

Інверсія зношування між нормалізованими і загартованими сталями відбувається саме під впливом наклепу. На малих кутах атаки перевагу мають м'якші, нормалізовані сталі, оскільки вони здатні деформуватися без руйнування. Проте при збільшенні кута атаки до прямого (90°) домінуючим фактором стає наклеп, що робить тверді загартовані сталі більш стійкими до зношування через їхню здатність краще опиратися утворенню тріщин і крихкого руйнування.

Наклеп під час газоабразивного зношування має не тільки позитивні сторони, як зміцнення поверхні, але й негативні наслідки. Одним із таких є крихкість, яка виникає через надмірне збільшення твердості матеріалу. Це призводить до підвищеного ризику викришування - процесу відшаровування і руйнування дрібних частинок поверхні під дією абразивного навантаження.

Важливий фактор у цьому - наявність крихких і твердих фаз у структурі металу. Такі фази, після дії абразивних частинок, можуть вимиватися з більш в'язкої матриці, що послаблює матеріал і сприяє утворенню дефектів на його поверхні. Це особливо характерно для

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заевтектоїдних сталей, у яких є вторинний цементит. Ці фази менш стійкі до зношування, порівняно з доевтектоїдними сталями, де такі крихкі фази відсутні, що забезпечує вищу зносостійкість.

Ще один негативний аспект - це динамічний фактор. Під час зношування, особливо за умов дії високошвидкісних частинок, відбувається руйнування металу через постійні ударні навантаження. Динамічні навантаження призводять до швидшого руйнування матеріалу, оскільки сприяють виникненню мікротріщин, які з часом розвиваються у більші дефекти.

Таким чином, наклеп не завжди є вигідним для зносостійкості, і у певних випадках, особливо при присутності крихких фаз, він може прискорювати процес руйнування матеріалу.

Зміна швидкості потоку абразивних частинок суттєво впливає на радіальні та тангенціальні сили, що діють на поверхню під час газоабразивного зношування.

При куті атаки $\alpha = 90^\circ$ (перпендикулярний удар абразивних частинок), збільшення швидкості потоку у 10 разів призводить до пропорційного збільшення радіальних і тангенціальних сил. Це пояснюється тим, що при такому куті частинки з найбільшою силою ударяють по поверхні, безпосередньо передаючи свою кінетичну енергію матеріалу. Збільшення швидкості потоку прямо збільшує енергію кожної частинки, що веде до більшого зносу.

При куті атаки $\alpha = 30^\circ$ (близькому до тангенціального удару), максимальні тангенціальні сили збільшуються набагато менше при аналогічній зміні швидкості потоку. Це пов'язано з тим, що при малих кутах частинки ковзають по поверхні, і частина енергії витрачається на мікрорізання та ковзання, а не на безпосередній удар. Таким чином, вплив швидкості потоку на тангенціальні сили стає менш вираженим, ніж при прямому ударі.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Так, при куті атаки $\alpha = 45^\circ$ спостерігається найбільш інтенсивна дія абразивних частинок, що призводить до максимального зношування. Це явище можна пояснити поєднанням радіальних і тангенціальних сил, що створюють найбільш сприятливі силові умови для ефективного руйнування матеріалу.

Радіальні сили при цьому куті все ще достатньо сильні, щоб викликати глибокі деформації і вм'ятини в матеріалі. Водночас вони не настільки великі, як при перпендикулярному ударі, але достатні для механічного впливу на поверхню.

Тангенціальні сили у цьому випадку діють з достатньою потужністю для створення ковзання частинок по поверхні, що спричиняє мікрорізання, здирання частинок матеріалу та утворення борозен. Це руйнування є дуже ефективним через взаємодію з радіальними силами.

Саме таке поєднання сил - ударний вплив (радіальні сили) разом із ковзанням (тангенціальні сили) - створює оптимальні умови для максимального зношування, адже частинки потоку здатні і проникати в поверхню, і видаляти матеріал із неї одночасно.

Отже, кут атаки відіграє важливу роль у розподілі сил при зношуванні, і при різних кутах вплив швидкості потоку на радіальні та тангенціальні сили суттєво відрізняється [7].

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали для наплавлення.

При плазмово-порошковому напавленні, як наплавний матеріал, використовувався промисловий порошок ПР-Х18ФНМ, фракцією 50...200 мкм, хімічний склад якого, наведено в таблиці 2.1. Промисловий порошок ПР-Х18ФНМ це високолегований порошковий матеріал, який використовують для електродугового наплавлення та напилення. Він має склад, орієнтований на покращення зносостійкості, корозійної стійкості та жароміцності металевих виробів. Основними елементами в складі порошку є хром (Cr), нікель (Ni), і молібден (Mo), що робить його придатним для застосування в умовах підвищених температур і агресивних середовищ.

Типові характеристики порошку ПР-Х18ФНМ [23]:

1. Хімічний склад:

- Хром (Cr) — забезпечує корозійну стійкість і підвищену твердість.
- Нікель (Ni) — покращує ударну в'язкість і сприяє жароміцності.
- Молібден (Mo) — підвищує міцність і зносостійкість.

2. Застосування:

- Використовується для наплавлення поверхонь деталей, що працюють у важких умовах зносу та корозії, зокрема в нафтохімічній, гірничо-металургійній промисловості.

- Забезпечує високу твердість та опір абразивному зношуванню.

3. Переваги:

- Висока зносостійкість і твердість після наплавлення.
- Хороша корозійна стійкість навіть у агресивних середовищах.
- Стійкість до високих температур.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порошок ПР-Х18ФНМ є ефективним для відновлення та зміцнення деталей, що піддаються інтенсивному зносу та корозії в промислових умовах.

Як основний матеріал використовували пластини зі сталі 20 розміром 100x250x10 мм попередньо шліфувалися. Сталь 20 - це вуглецева конструкційна сталь низьковуглецевого типу, яка широко використовується в промисловості завдяки своїм хорошим механічним властивостям і здатності до обробки. Ця сталь має низький вміст вуглецю, що робить її відносно пластичною і добре зварюваною, проте вона не володіє високою твердістю або зносостійкістю.

Основні характеристики сталі 20 [23]:

1. Хімічний склад сталі 20 наведений у таблиці 2.2. (відповідно до ГОСТ 1050):

2. Механічні властивості:

- Межа міцності (σ_B): 410–490 МПа
- Межа плинності ($\sigma_{0.2}$): 245 МПа
- Відносне подовження (δ): 20%
- Ударна в'язкість (КСУ): 590 кДж/м²

3. Технологічні властивості:

- Добре піддається зварюванню.
- Відмінно обробляється різанням.
- Можливість піддаватися цементації та загартуванню для підвищення поверхневої твердості.

4. Застосування:

- Виготовлення різних конструкційних деталей, таких як осі, вали, муфти, шестерні.
- Виробництво труб, деталей машин і механізмів, які працюють при відносно низьких навантаженнях.
- Підходить для цементації та інших видів термічної обробки для підвищення твердості поверхневого шару.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сталь 20 поєднує в собі достатню міцність і пластичність, що робить її універсальним матеріалом для багатьох інженерних і будівельних застосувань.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад промислового порошку ПР-Х18ФНМ (мас. %, Fe – основа)

C	V	Cr	Mo	Ni
2,1...2,4	7...8	17...19	2...2,6	2...3

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сталі 20 (мас. %, Fe – основа)

Mn	C	Si	Cu	Ni	As	S	Cr	P
0,35...0,65	0,17...0,24	0,17... ,37	0,25	0,25	0,08	0,04	0,25	0,04

Покриття наносили за допомогою установки УПН-303УХЛ4, що обладнана плазмотроном з водяним охолодженням. Пристрій додаткового обдування зони наплавлення, встановлений на плазмотроні, забезпечував високий рівень захисту створюваних зміцнювальних шарів захищаючи від шкідливого впливу атмосферного повітря. В якості захисного, плазмоутворюючого та транспортуючого газу використовували аргон вищого гатунку. При ручному дуговому наплавленні, як наплавочний матеріал, обради електроди Т-590.

Електроди Т-590 - це спеціалізовані електроди для електродугового наплавлення, призначені для відновлення і зміцнення деталей, що працюють в умовах високого абразивного зношування і ударних навантажень. Вони широко використовуються в машинобудуванні, гірничодобувній, сільськогосподарській та інших галузях, де необхідно підвищити зносостійкість сталевих деталей. Основні характеристики електродів Т-590 [24]:

1. Хімічний склад яких представлений в таблиці 2.3.

2. Властивості наплавленого шару:

- Твердість наплавленого металу становить 56-62 HRC, що забезпечує високу зносостійкість.
- Наплавлений шар стійкий до абразивного зношування і має високу твердість навіть після термічної обробки.
- Застосовується для роботи в умовах значних ударних навантажень і абразивного впливу.

3. Призначення:

- Електроди Т-590 використовуються для наплавлення різних частин механізмів, таких як зубці ковшів екскаваторів, молоти дробарок, ножі для різання, сільськогосподарські інструменти, направляючі та інші деталі, що піддаються зносу.

- Підходять для наплавлення на вуглецеві та низьколеговані сталі.

4. Технологічні особливості:

- Електроди забезпечують рівномірний і стійкий процес наплавлення.
- Наплавлення виконується за кілька шарів (зазвичай до 3), що дозволяє створити достатньо товстий зносостійкий шар.
- Рекомендується для використання на поверхнях, які потребують відновлення після значного зношування або для підвищення їх експлуатаційної довговічності.

Електроди Т-590 ефективно підвищують термін служби деталей за рахунок створення твердого і зносостійкого покриття, що робить їх популярними для відновлення і зміцнення різних робочих поверхонь.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад електродів Т-590 (мас.%, Fe – основа)

Mn	C	Si	B	Cr
1,2	3,2	2,2	1	25

Наплавлення здійснювали за допомогою зварювального апарату ВКСМ-1000 та баластного реостату РБ-306.

2.2 Обладнання та режими для наплавлення.

УПН-303УХЛ4 рис. 2.1 – це установка плазмово-наплавлювальна (УПН), призначена для наплавлення або нанесення спеціальних захисних покриттів на металеві поверхні з використанням плазмових технологій. В даній моделі застосовується водоохолоджуваний плазмотрон, що є ключовим компонентом установки, який генерує та спрямовує плазмовий струмінь на поверхню деталі.

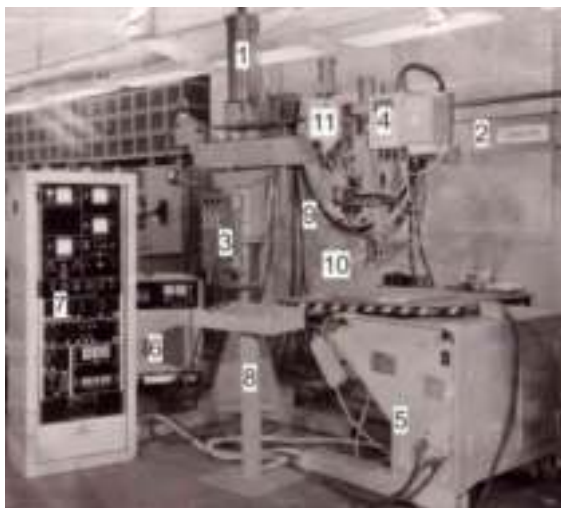


Рисунок 2.1 – Установка плазмово-наплавлювальна.

Описана установка є комплексним обладнанням для нанесення покриттів за допомогою плазмотрона, який використовує порошкові матеріали. Ось ключові компоненти і їх функції:

1. Поворотна колона (1) – основна частина конструкції, яка дозволяє змінювати положення всього обладнання, забезпечуючи гнучкість у роботі.
2. Ключова балка (2) – частина конструкції, яка підтримує поворотну колону і забезпечує її стабільність. Може також служити для підтримки різного устаткування.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

3. Регулятори витрати газів (3) – пристрої, що керують потоком газу, який необхідний для плазмового процесу.

4. Підвісна самохідна головка (4) – рухомий елемент, що переміщується вздовж напрямної балки і забезпечує точність позиціонування плазмотрона.

5. Маніпулятор виробу (5) – механізм для фіксації і переміщення оброблюваного виробу, що дозволяє змінювати його положення під час нанесення покриття.

6. Джерело живлення (6) – електричний блок, що постачає енергію для роботи плазмотрона і всього устаткування.

7. Шафа (7) – вміщує електроніку та інші компоненти керування, захищаючи їх від зовнішніх впливів.

8. Пульт управління (8) – панель, за допомогою якої оператор керує всіма процесами в установці.

9. Коливальний механізм (9) – пристрій, що забезпечує поперечні коливання плазмотрона, полегшуючи рівномірне нанесення покриття з розмахом до 60 мм.

10. Плазмотрон (10) – основний робочий інструмент, який генерує плазмову дугу для плавлення порошкового матеріалу і його нанесення на поверхню виробу.

11. Порошковий живильник (11) – механізм, що подає порошкові матеріали в плазмотрон для створення покриття.

Ця установка призначена для плазмового напилення, зокрема для нанесення захисних або функціональних покриттів на різні деталі, використовуючи плазмову дугу для розплавлення порошкових матеріалів та їх нанесення на поверхню виробів.

Основні характеристики УПН-303УХЛ4:

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

1. Плазмотрон – це інструмент, який генерує плазмовий струмінь високої температури, що розплавляє матеріали, які потім осаджуються на поверхні деталі, формуючи покриття.

2. Водоохолоджувана система – використовується для підтримки стабільної температури плазмотрона та запобігання його перегріву під час роботи. Охолодження водою забезпечує довший термін служби обладнання і покращує стабільність процесу наплавлення.

3. Матеріали наплавлення – це можуть бути металеві порошки, дріт або інші наплавлювальні матеріали, які піддаються впливу плазмового струменя і осідають на поверхні деталі.

Переваги УПН-303УХЛ4:

- Висока точність нанесення покриттів.
- Широкий спектр матеріалів , які можуть бути використані для покриттів (сплави, метали, кераміка).
- Ефективне охолодження за допомогою води, що забезпечує безперервну роботу.
- Захист від зношування завдяки нанесенню високоякісних зносостійких покриттів.

Застосування:

- Наплавлення зносостійких покриттів на деталі машин та механізмів.
- Відновлення поверхонь робочих деталей.
- Застосування в ремонтних роботах для продовження терміну служби обладнання.

ВКСМ-1000 (рис. 2.2) Багатопостовий зварювальний випрямляч ВКСМ-1000-1-1 розрахований на одночасне живлення шести зварювальних постів з номінальним струмом по 300 А кожен. Зовнішня характеристика випрямляча ВКСМ-1000 тверда.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Випрямляч складається з наступних основних вузлів: силового понижуючого трансформатора ТС, випрямного блоку з вентилятором, пускорегулюючої та захисної апаратури.

Трансформатор ТС – трифазний, стрижневого типу, обмотки виконані з алюмінієвих проводів. Первинна обмотка трансформатора з'єднана "трикутником", а вторинна, що складається з двох трифазних обмоток, - "зіркою".

Випрямний блок зібраний за шестиконтактною кільцевою схемою з кремнієвих вентилів типу ВК-2-200. Пуско-регулююча та захисна апаратура складається з автомата АВ та реле контролю вентиляції РКВ, автомат служить для захисту всієї установки від коротких замикань та відключення її у разі пробою одного з вентилів, реле – для припинення роботи без вентиляції та при неправильному напрямку обертання вентилятора.



Рисунок 2.2 – ВКСМ-1000.

Основні характеристики ВКСМ-1000:

1. Стикове контактне зварювання – тип зварювання, при якому два металеві елементи нагріваються на місці контакту до температури плавлення або близької до неї і з'єднуються шляхом стиснення.
2. Потужність апарату – 1000 ампер (можливо, 1000 кВА або інша одиниця залежно від конкретної моделі та призначення).

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

3. Електроди – використовуються для подачі струму на зварювані деталі.

4. Регулювання режимів – можливість налаштування зварювального струму, часу зварювання та сили стиснення для досягнення найкращої якості з'єднання.

5. Охолодження – деякі моделі можуть оснащуватися водоохолоджуваною системою для тривалої роботи без перегріву.

Переваги ВКСМ-1000:

- Надійне і міцне з'єднання металевих деталей.
- Висока продуктивність при зварюванні великих заготовок.
- Автоматизація процесу зварювання з мінімальним втручанням оператора.
- Енергоефективність при роботі з великими струмами.

Застосування:

- Використовується в машинобудуванні, металургії, будівництві для з'єднання металевих елементів великих конструкцій.
- Підходить для виготовлення та ремонту труб, рельсів, балок, каркасів і конструкцій зі сталі, алюмінію, міді та їх сплавів.

Цей апарат ідеально підходить для промислового використання, коли необхідна висока якість зварних з'єднань та міцність конструкцій.

Баластний реостат РБ-306 (рис. 2.3) це електричний компонент, що використовується для обмеження струму в електричних колах. Він належить до типу змінних резисторів і зазвичай застосовується в електричних системах зварювального обладнання, тягових електродвигунів, або інших установках, де потрібно регулювати струм чи напругу.

Баластний реостат є необхідним обладнанням при комплектації зварювальних постів, що мають живлення від зварювальних генераторів або багатопостових випрямлячів зварювальних для наплавлення покритим електродом, різання і ручного дугового зварювання. Також широко

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовуються в постах для аргонодугового зварювання разом з осцилятором для компенсації постійної складової струму зварювального. Також, реостати баластові застосовуються на зарядних станціях та в гальванічних лініях.



Рисунок 2.3 – Баластний реостат РБ-306

Зварювальний баластовий реостат служить для ступінчастого регулювання величини зварювального струму.

Для зварювання реостат баластний підключається у зварювальний ланцюг послідовно і являє собою каскад із кількох елементів опорів, з'єднаних між собою, що складаються з константового дроту котрий має великий омичний опір. Регулювання здійснюється за допомогою ножів контактних, що розташовані на передній панелі реостата, а їх кількість складає 5...7 штук [25].

Якщо для зварювання потрібна більша величина струму ніж та на яку розрахований зварювальний реостат, тоді необхідно включати два реостата з паралельним з'єднанням. Тоді сила зварювального струму на виході збільшується відповідно у два рази.

Основні функції баластного реостата РБ-306:

1. Регулювання струму – обмежує величину струму, який протікає через електричне коло, запобігаючи його перегріву або пошкодженню.
2. Стабілізація напруги – забезпечує стабільну роботу пристроїв, які підключені до змінних джерел живлення або коливальних навантажень.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Захист – запобігає перевантаженню та короткому замиканню в електричних мережах.

Основні характеристики [25]:

- Потужність – реостат може витримувати значні струми, залежно від умов експлуатації.

- Регулювання опору – дозволяє змінювати опір в залежності від необхідних електричних параметрів.

- Конструкція – зазвичай складається з металевих дротів або стрічок з високим опором, намотаних на каркас з ізоляційного матеріалу.

Застосування:

- Зварювальні апарати – використовується для регулювання струму при зварюванні.

- Електротранспорт – баластні реостати часто застосовуються для керування струмом в тягових електродвигунах.

- Промислове обладнання – використовуються в різних електричних системах для регулювання потужності або захисту від перевантажень.

Переваги:

- Надійність в експлуатації.

- Можливість регулювання параметрів електричних систем без необхідності складної електроніки.

- Простота конструкції і довговічність.

Реостат РБ-306 забезпечує стабільну роботу обладнання і є важливим компонентом для промислових електричних систем.

При плазмово-порошковому наплавленні покриття наплавляли за один прохід в один шар струмом прямої полярності при відстані від плазмотрона до виробу 10...12 мм, витраті плазмоутворюючого газу 1...2 л/хв, що транспортує 10...16 л/хв, для додаткового піддуву до 10 ...15 л/хв, напрузі на дузі 31...42 В.

Режими наплавлення наведено в таблиці 2.4

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Режими наплавлення покриття.

Струм	Лінійна швидкість	Швидкість подачі порошку	Розмах коливань	Частота коливань
215-225 А	4,5 м/год	1,5-1,9 кг/год.	20-22 мм.	0,3-0,4 Гц

При ручному дуговому наплавленні покриття наплавляли в один шар нижньому положенні струмом прямої полярності. Діаметр електродів 5 мм сила струму 250-280 А.

2.3 Приготування шліфів зразків.

Процес приготування шліфів виконувався у три етапи.

1 етап. Вирізка та торцювання шліфу. Вирізка зразка з досліджуваної поверхні виконувалась кутшліфувальною машинкою. Далі зразок піддавали торцюванню на площину по наждачному колі, з постійним охолодженням водою, щоб уникнути спотворення структури зразка.

2 етап. Шліфування зразка проводилася на наждачному папері різної зернистості, а саме: Р320, Р400, Р600 та на щільному папері із нанесенням алмазної пасти з різними розмірами зерен (зернистість зеленої 10/7, а синьої пасти 28/20). Шліфування зразка на наждачному папері різної зернистості є стандартною процедурою підготовки поверхні перед подальшими дослідженнями, такими як металографічний аналіз або механічні випробування. Кожен етап шліфування із застосуванням наждачного паперу з різною зернистістю виконується для поступового згладжування поверхні та усунення подряпин, залишених попередньою крупнішою зернистістю.

Етапи шліфування:

1. Р320: Велика зернистість. Використовується для початкової обробки поверхні, щоб видалити грубі дефекти або нерівності на зразку.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. P400: Середня зернистість. Дозволяє усунути подряпини, залишені після шліфування на P320, і підготувати зразок до фінішного шліфування.

3. P600: Дрібна зернистість. Використовується для остаточного шліфування, щоб забезпечити рівну й гладку поверхню з мінімальними подряпинами, готову для полірування або подальших досліджень.

Кожен наступний етап шліфування усуває дефекти попереднього, роблячи поверхню більш гладкою і підготовленою для точних аналізів, таких як дослідження мікроструктури або визначення механічних характеристик.

Після паперу переходять на шліфування за допомогою алмазної пасти, також, переходячи від великої зернистості до дрібнішої.

Алмазна паста використовується для досягнення високої точності обробки та створення дзеркально гладкої поверхні зразка, особливо для металографічних досліджень, коли необхідно розглядати мікроструктуру матеріалу під мікроскопом.

Етапи шліфування алмазною пастою:

1. Вибір алмазної пасти:

- Пасти відрізняються за розміром зерен алмазного порошку. Зазвичай використовуються пасти з зернистістю від 1 мкм до 6 мкм, залежно від вимог до фінішної обробки.

- Чим менший розмір зерен, тим гладкіша поверхня.

2. Нанесення пасти:

- Алмазна паста наноситься на спеціальну полірувальну тканину або диск, який закріплюється на шліфувальній машині.

- Зразок притискається до поверхні з пастою, і шліфування виконується круговими рухами з контрольованим тиском.

3. Процес полірування:

- Під час полірування алмазна паста видаляє мікроскопічні подряпини та нерівності, що залишилися після шліфування наждачним папером, забезпечуючи максимально гладку поверхню.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Полірування триває доти, доки на поверхні зразка не буде видно подряпин або інших дефектів.

4. Очищення:

- Після завершення шліфування зразок промивається для видалення залишків пасти та частинок матеріалу.

Переваги шліфування алмазною пастою:

- Висока точність: Забезпечує дзеркальну поверхню без видимих дефектів.

- Контрольована обробка: Алмазні зерна дуже тверді, що дозволяє точно видаляти мікрошар матеріалу.

- Гладкість: Підготовка поверхні для подальших досліджень, таких як оптична або електронна мікроскопія.

Цей метод широко використовується у дослідженнях матеріалів, де потрібен високий рівень деталізації структури зразків.

3 етап. На обертовому плоскому колі (фетрі) проводили полірування. Полірування на обертовому плоскому колі (фетрі) — це заключний етап підготовки зразка після шліфування, призначений для отримання дзеркальної поверхні. Фетр, як полірувальний матеріал, використовується через його м'яку структуру, яка дозволяє делікатно полірувати поверхню зразка без створення нових подряпин. Основні етапи полірування на фетрі:

1. Підготовка полірувального кола:

- Для полірування використовують плоский обертовий диск, на якому закріплено фетр. Фетр забезпечує м'який контакт із поверхнею зразка.

- На фетр наноситься полірувальна речовина (найчастіше алмазна паста або оксидні суспензії) з обраною зернистістю для отримання дзеркальної поверхні.

2. Процес полірування:

- Зразок притискається до обертового полірувального диска з фетром під невеликим і рівномірним тиском.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Оберткові рухи кола забезпечують рівномірну обробку всієї поверхні зразка, зберігаючи геометрію та структуру поверхні.

- Під час полірування важливо контролювати тиск і тривалість процесу, щоб уникнути перегріву зразка і пошкоджень.

3. Полірувальні речовини:

- Для полірування на фетрі можуть використовуватись різні полірувальні склади, такі як алмазна паста з дрібними зернами (наприклад, 1-3 мкм) або оксид алюмінію.

- Залежно від вимог до чистоти поверхні, полірувальні матеріали вибираються для досягнення оптимального результату.

4. Очищення:

Після полірування зразок промивається у воді або спеціальному розчині для видалення залишків полірувальної пасти та дрібних частинок матеріалу.

Після полірування на обертовому фетровому колі поверхня зразка стає дзеркальною, з мінімальними дефектами і подряпинами. Така підготовка є необхідною для точних досліджень, особливо під мікроскопом, де важливо спостерігати мікроструктуру матеріалу.

Аналіз мікроструктури покриттів проводили на оптичному мікроскопі GX51 марки Olympus, з вбудованим аналізатором зображень SIAMS 700. Для якісного зображення мікроструктури зразків їх поверхню піддавали травленню протягом трьох хвилин методом занурення. Склад травника наступний: 15 мл. H_2O , 1 гр. $CuCl_2$, 65 мл. C_2H_5OH , 20 мл. HCl .

Мікроскоп Olympus GX51, рис. 2.4, інвертований металографічний дослідний мікроскоп для вирішення завдань вхідного контролю, якості продукції, перевірки технологічних процесів у лабораторних та виробничих умовах.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53



Рисунок 2.4 – Мікроскоп Olympus GX51.

Для мікроскопа Olympus GX51 специфічно [26]:

1) Широкий вибір оптичних елементів, револьверні головки (у тому числі моторизовані) на 5 та 6 об'єктивів. Об'єктиви UIS оптики зі збільшенням від 1,25 до 150х.

2) Спостереження у 4-х режимах – темного та світлого поля (DF та BF), диференційно-інтерференційного розмаїття (ДІК) Номарського (DIC) та у простому поляризованому світлі.

3) Допускається встановлення проміжного модуля із двократним збільшенням.

4) Вбудований порт дозволяє підключати одночасно до 3 камер, наприклад камеру високої роздільної здатності UC30 для цифрової зйомки або класичну 35 мм камеру.

5) Передбачено використання різних типів фільтрів.

6) Можливість встановлення різних джерел світла, а саме: металгалідної лампи 50Вт, галогенної лампи потужністю 100 Вт, ксенонової 75 Вт або ртутної лампи 100 Вт. Швидка зміна ламп, залежно від необхідності досліджень.

7) Основа Т-подібної форми, ніжки-опори із пристроями поглинання вібрації, блок живлення в єдиній конструкції з приладом.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Конструкція мікроскопа розроблена з урахуванням виконання великої кількості рутинних операцій і, відповідно, забезпечує максимальну зручність користувача, оптимізовано розташування всіх органів управління (регулювання освітленості, фокусування, апертурної та польової діафрагми тощо).

Перемикання режимів (темне і світле поле) здійснюється практично миттєво за допомогою зручно розташованого важеля. Для роботи в режимі DIC потрібне встановлення спеціального слайдера в слот конструкції.

Для виконання широкого кола завдань дослідження на робочому столі може бути розміщений зразок вагою до 5 кг.

Для роботи із зображеннями до комплекту поставки входить пакет ліцензійного програмного забезпечення AnalySis Docu.

Точність фокусування оптичної системи не залежить від ваги робочого столу та розміру зразків.

При фіксації результатів спостережень слід пам'ятати, що під час мікрофотографування одержують нереверсивне зображення, а при цифровій зйомці – реверсивне (ліва та права сторони зображення змінюються місцями). Відновити нормальне положення можна у процесі експорту та обробки даних на ПК.

Для отримання достовірних результатів досліджень обов'язково виконувати вимоги щодо якості поверхонь аналізованих зразків. Для контролю структури матеріалу поверхню необхідно попередньо протруїти.

2.4 Методи та обладнання для випробування покриттів на зносостійкість.

Аналіз літератури дійсно вказує на переважання механізму мікрорізання при абразивному зношуванні під дією газового потоку на робочу поверхню, особливо при малих кутах атаки. Це явище можна

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

пояснити тим, що частинки потоку, що діють під малими кутами, ковзають по поверхні, здійснюючи мікрорізання, а не ударне руйнування, що типове для більших кутів атаки.

Зважаючи на це, для лабораторних випробувань на зносостійкість доцільно обрати метод, що імітує подібний механізм зношування. Метод випробування матеріалів на зносостійкість при терті об нетвердо закріплені абразивні частинки є саме таким методом, що дозволяє відтворити умови, за яких переважає мікрорізання.

Лабораторні випробування проводяться згідно з ГОСТ 23.208-79, який описує методику випробування матеріалів на зносостійкість при терті по нетвердо закріплених абразивних частинках. Цей стандарт охоплює методи оцінки зносостійкості матеріалів у реальних умовах роботи шляхом моделювання впливу абразивних частинок, що є важливим для передбачення поведінки матеріалів в умовах газоабразивного зношування.

Суть методу випробування на зносостійкість полягає в наступному:

1. Закріплення зразка: Випробуваний зразок закріплюється в зразкоутримувачі установки, забезпечуючи його надійне утримання під час тестування.

2. Притискання до ролика: Зразок притискається до ролика за допомогою важеля, який створює необхідний тиск, симулюючи реальні умови тертя.

3. Обертання ролика: Після ввімкнення установки ролик починає обертатися, забезпечуючи тертя між зразком і поверхнею ролика.

4. Подача абразивного матеріалу: За допомогою дозуючого пристрою, який забезпечує безперервну подачу абразивного матеріалу, створюються умови для тертя з абразивними частинками.

5. Процес випробування: Установка працює протягом певного часу, під час якого абразивні частинки діють на поверхню зразка, що дозволяє оцінити його зносостійкість.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Схема установки, представлена на рисунку 2.5, ілюструє взаємодію зразка з роликом та абразивними частинками, що допомагає візуалізувати процес випробувань. Це дозволяє моделювати механізм мікрорізання, що виникає при абразивному зношуванні.

У процесі випробувань зносостійкості зразків, при використанні кам'яного вугілля з твердістю до 5 одиниць за шкалою Мооса (наближено до твердості кварцу, який має твердість 7 одиниць), застосовувався пісок з фракцією 500 мкм як абразивний матеріал. Для кожної фракції піску було випробувано по два зразки, що дозволяло отримати середні показники зносу.

Ключові етапи випробування:

1. Тривалість: Кожен тест тривав 15 хвилин.
2. Оцінка зношування: Після завершення тестування втрата маси зразків визначалася за допомогою терезів для оцінки ступеня зносу. Це дозволяло точно визначити кількість матеріалу, що втратили зразки під час газоабразивного зношування.

Цей підхід дає змогу кількісно оцінити вплив абразивних частинок на зразки і дозволяє порівняти зносостійкість різних матеріалів при дії частинок із різною твердістю.

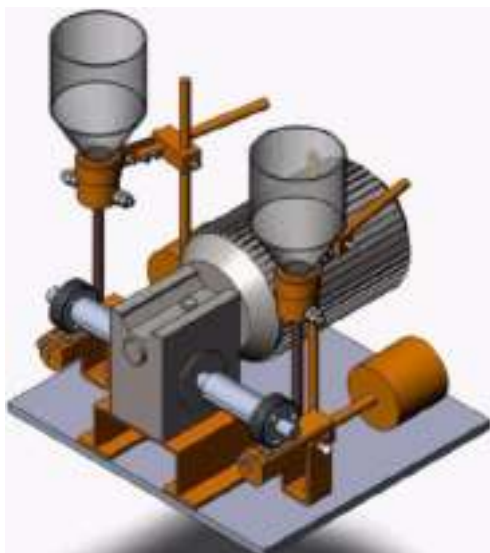


Рисунок 2.5 – Модель лабораторної установки для випробування матеріалів на зносостійкість при терті по незакріплених частинках.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Метод випробування матеріалів та покриттів на газоабразивне зношування за допомогою відцентрового прискорювача дозволяє створити умови, що імітують реальні умови зношування в технічних пристроях, де матеріали піддаються дії абразивних частинок.

Опис методу:

1. Відцентровий прискорювач складається з ротора, який обертається навколо вертикальної осі. На роторі розміщено чотири радіально спрямовані канали прямокутного перерізу.

2. Абразивний матеріал подається в ці канали, і під дією відцентрових сил він викидається з ротора. Частинки ударяються об поверхню випробуваних зразків, що симулює умови газоабразивного зношування.

3. Зразки закріплюються навколо ротора і можуть бути встановлені під різними кутами атаки для імітації впливу абразивного потоку під різними кутами (що дозволяє оцінити кутову залежність зношування).

4. Схема установки представлена на рисунку 2.6, що ілюструє принцип роботи відцентрового прискорювача.

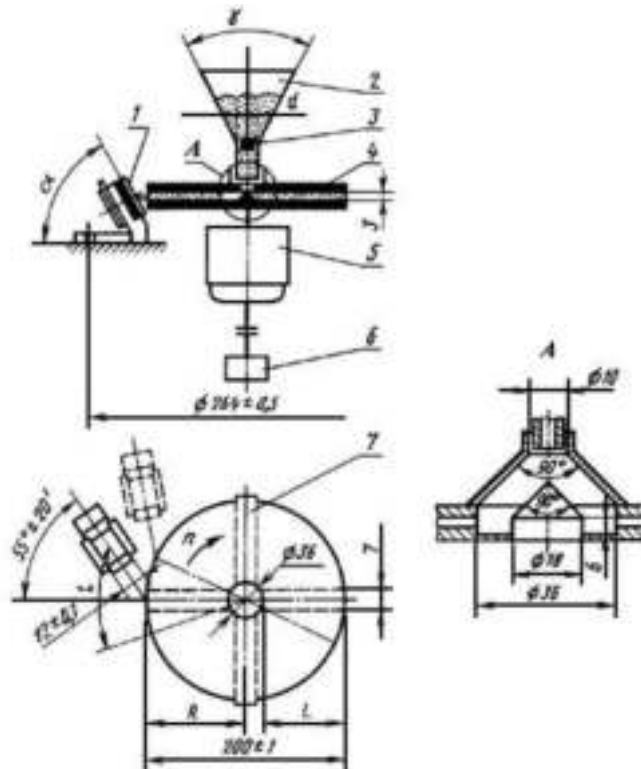


Рисунок 2.6 – Схема лабораторної установки на газоабразивне зношування.

Цей метод, відповідно до ГОСТ 23.201-78, широко використовується для визначення зносостійкості матеріалів та покриттів в умовах, близьких до експлуатаційних, і дає змогу провести точну оцінку характеристик покриттів, підданих дії абразивних частинок.

При випробуваннях на зношування газоабразивне використовували кварцовий пісок з фракцією менше 200 мкм, що є одним з найпоширеніших абразивних матеріалів для таких тестів. Для оцінки зносостійкості матеріалів було встановлено наступні параметри:

1. Абразивний матеріал: кварцовий пісок фракції менше 200 мкм.
2. Тривалість випробування: 30 хвилин.
3. Кількість зразків: одночасно випробовувалося 5 зразків, що дозволяє отримати статистично значущі результати.
4. Кути атаки: зразки були встановлені під різними кутами атаки (90°, 60°, 30°, 15°), що дозволяє дослідити вплив кута падіння абразивних частинок на процес зношування.
5. Оцінка втрати маси: розмір втрати маси кожного зразка визначали за допомогою ваг після завершення випробування, що є стандартною методикою для оцінки зносостійкості.

Такий підхід дозволяє комплексно оцінити вплив різних факторів на процес газоабразивного зношування, включаючи кут атаки, що впливає на інтенсивність зносу.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Структура матеріалу після наплавлення.

На рисунку 3.1 показана мікроструктура покриття, отриманого методом плазмово-порошкового наплавлення порошком марки Пр-Х18ФНМ.

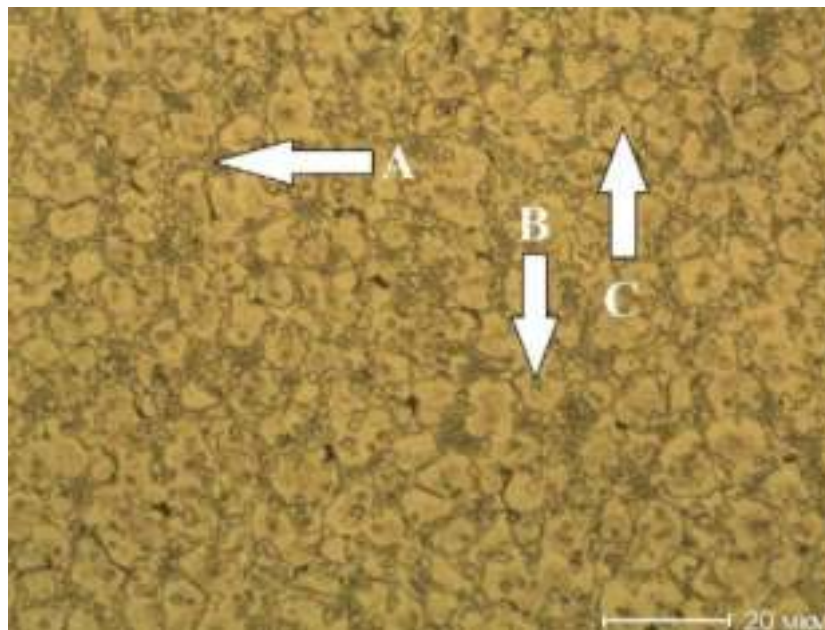


Рисунок 3.1 – Мікроструктура покриття отриманого наплавленням порошком
ПР-Х18ФНМ:

(А - евтектика на основі карбіду M_7C_3 , В - VC карбід, С - матриця, утворена γ - і α - твердими розчинами).

Основними характеристиками структури є:

1. Евтектика на основі карбіду M_7C_3 :

- Розташована за межами зерен матриці.
- Утворює сітчасту, скелетоподібну будову.
- Об'ємна частка евтектики у металі становить 24 – 30%.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Твердість M_7C_3 досягає 1380 HV, що робить ці частинки важливими для підвищення зносостійкості матеріалу.

2. Карбіди VC:

- Мають округлу форму зі середнім фактором форми 0,78...0,81.
- Середній розмір карбідів VC не перевищує 2 мкм.
- Об'ємна частка карбідів VC становить 12 – 13 %.
- Твердість VC досягає 2000 – 3000 HV, що надає покриттю надзвичайно високу зносостійкість.
- Округла форма карбідів VC забезпечує кращий «тіньовий» ефект на матрицю, що сприяє ефективному зміцненню покриття.

Таким чином, структура покриття містить високотверді евтектичні включення і карбіди VC, які забезпечують значне підвищення зносостійкості покриття завдяки їхній високій твердості та сприятливій геометрії [3].

На рисунку 3.2 зображено мікроструктуру покриття, отриманого шляхом наплавлення електродом марки «Т-590». Ця структура має певні особливості покриття, зокрема евтектичний карбід M_7C_3 , що має скелетоподібну будову. Така структура характерна для високовуглецевих систем на основі Fe-Cr-V-Mo-C. Це говорить про те, що процес формування покриття впливає на мікроструктуру і склад матриці, де інтенсивність травлення вказує на переважання мартенситу, що підтверджує високий вміст вуглецю та хрому.

У випадку покриттів, сформованих плазмовим наплавленням порошку Пр-Х18ФНМ, спостерігається інша структура — залишковий аустеніт. Це може бути результатом більшої стійкості до мартенситного перетворення через вміст нікелю або хрому в даному сплаві, що стабілізує аустенітну фазу навіть після охолодження.

Це вказує на те, що тип і склад використовуваного порошку, а також метод нанесення (плазмове наплавлення) значно впливають на кінцеву структуру покриття та його властивості.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

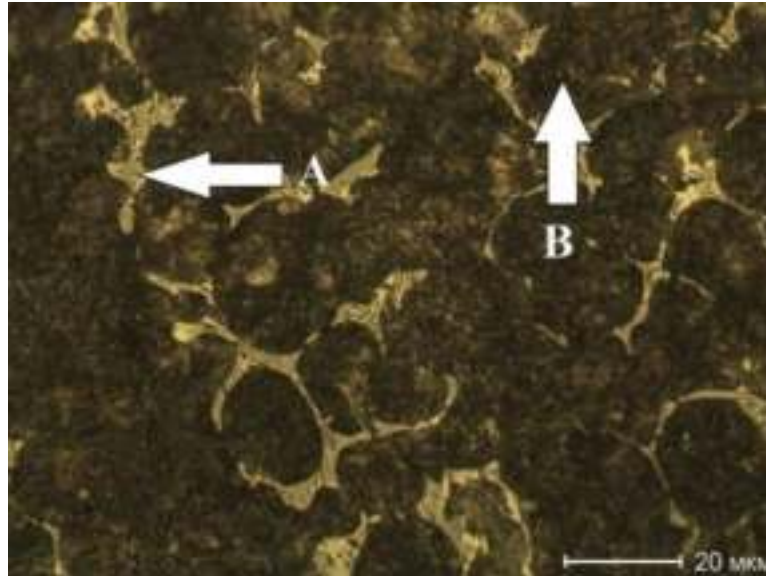


Рисунок 3.2 – Мікроструктура покриття, сформована ручним дуговим наплавленням покритими електродами Т-590 (А - M_7C_3 , В - матриця, що складається з α -і γ -твердих розчинів)

3.2 Результати лабораторних випробувань на зношування отриманих покриттів.

З опису двох гістограм, наведених на рисунках 3.3 і 3.4, можна зробити наступні висновки щодо зносостійкості покриттів, отриманих різними технологіями зміцнення:

1. Гістограма на рисунку 3.3 демонструє результати випробувань на зносостійкість покриттів, отриманих за допомогою плазмового наплавлення порошку Пр-Х18ФНМ та ручного дугового наплавлення електродами Т-590. Покриття, сформоване плазмовим наплавленням, показує значно кращі результати у випробуваннях з нетвердо закріпленими абразивними частинками. Зносостійкість цього покриття є в 2-3 рази вищою, що може бути пов'язано з його складом, фазовим станом матриці та особливостями структури (наприклад, стабілізацією аустеніту або наявністю зміцнених карбідів).

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Гістограма на рисунку 3.4 підтверджує, що покриття, отримане ручним дуговим наплавленням електродами Т-590, демонструє нижчий рівень зносостійкості при газоабразивному зношуванні. Це стосується всіх кутів атаки абразиву (15°, 30°, 60°), що свідчить про те, що цей тип покриття менш ефективний в умовах інтенсивного абразивного зношування, яке моделюється відцентровим прискорювачем.

Загалом, результати досліджень вказують на перевагу плазмового наплавлення порошку Пр-Х18ФНМ у підвищенні зносостійкості, особливо в абразивних середовищах.

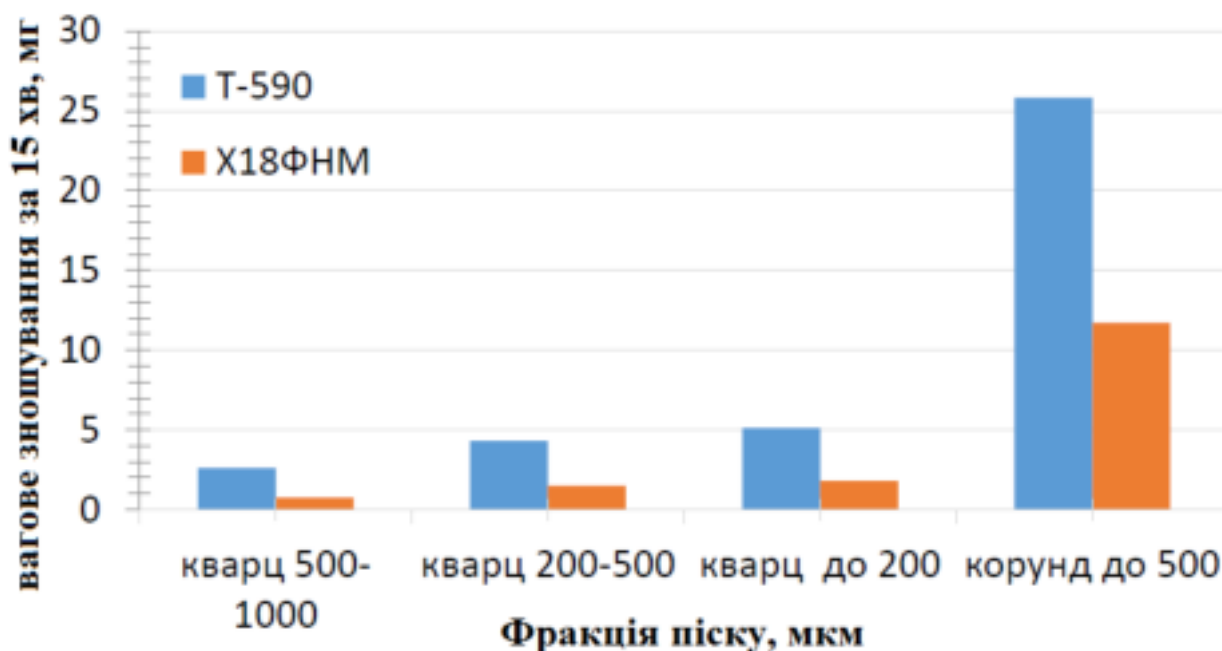
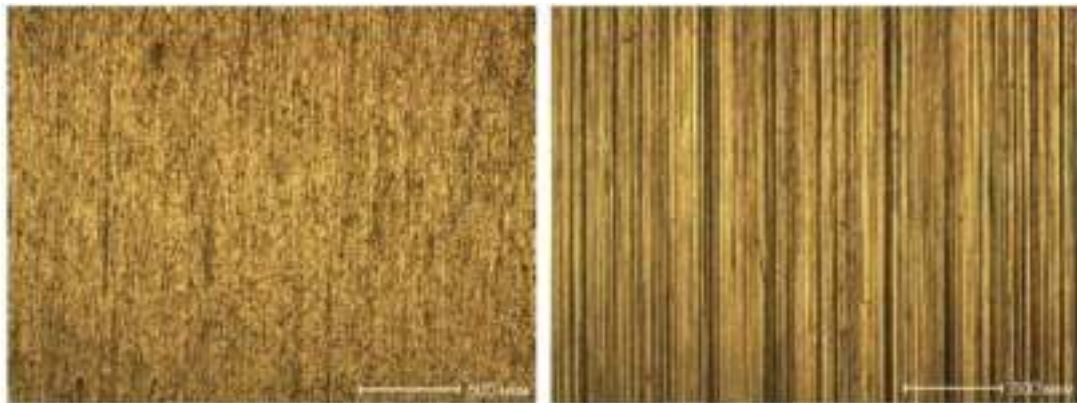


Рисунок 3.3 – Гістограма залежності вагового зношування покриттів від фракції піску.

- Поверхня, зношена корундом, демонструє значно більші і глибші ризики. Корунд, як один із найбільш твердих абразивів, утворює глибокі, безперервні сліди, що вказує на агресивний характер зношування. В ході дії корундових частинок відбувається більш глибоке проникнення в матеріал, що призводить до утворення значно виражених тріщин і борозен.

Таким чином, можна зробити висновок, що при взаємодії з кварцовим піском зношування є більш поверхневим і рівномірним, тоді як корунд викликає значно інтенсивніше руйнування поверхні з утворенням глибших і помітніших слідів.



а)

б)

Рисунок 3.5 – Структура поверхонь після лабораторних випробувань на абразивне зношування:

а – кварцовим піском, б – електрокорундом.

Поверхні покриття ПР-Х18ФНМ, рисунок 3.6 отримані за допомогою травлення, демонструють різні механізми зношування залежно від абразивного матеріалу – кварцового піску і електрокорунду.

1. Зношування кварцовим піском:

- На поверхні під літерою А можна побачити великі скупчення карбідів VC, що утворюють тіньовий ефект. Це означає, що карбіди діють як своєрідний "бар'єр", захищаючи матрицю від глибокого зношування. Завдяки

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цьому не спостерігаються глибокі ризики, оскільки абразивні частинки піску не можуть проникнути через карбідні скупчення.

- Під літерою Б позначено евтектичний карбід M_7C_3 , який також відіграє захисну роль, зміцнюючи матрицю і перешкоджаючи її зносу. Карбіди M_7C_3 та VC мають схожу функцію, запобігаючи глибокому проникненню абразивних частинок і сприяючи зниженню зносу покриття.

2. Зношування електрокорундом:

- Праворуч показано поверхню, яка зазнала впливу більш твердого абразиву – електрокорунду (твердість ~ 2000 HV). Електрокорунд прорізає структуру покриття набагато глибше, що призводить до утворення глибоких рисок.

- На деяких ділянках можна спостерігати пластичну деформацію по краях рисок, що вказує на агресивність абразивного матеріалу і високий тиск під час контакту.

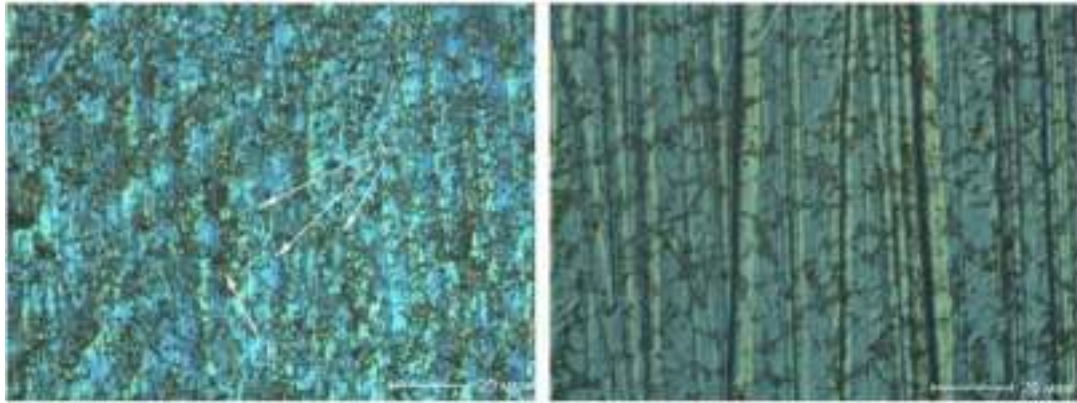
- Також видно невеликі лунки, які залишилися після випадання карбідів VC, що може бути результатом руйнування карбідних частинок через високу твердість електрокорунду. Це свідчить про те, що навіть карбіди, які забезпечували захист при взаємодії з менш твердим абразивом (кварцовим піском), не витримують впливу електрокорунду.

Цей приклад демонструє різну поведінку покриття ПР-Х18ФНМ в умовах зношування різними абразивами: кварцовий пісок викликає менші пошкодження завдяки тіньовому ефекту карбідів, тоді як електрокорунд агресивно руйнує структуру, зокрема й захисні карбіди.

З аналізу структури після газо абразивного зношування, рисунок 3.7, можна зробити наступні висновки щодо характеру зносу покриття Х18ФНМ при різних кутах атаки абразивних частинок:

1. Зношування при куті атаки 15° (рис. 3.7, а):

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66



а)

б)

Рисунок 3.6 – Структура поверхонь після травлення:

а – зношування кварцовим піском, б – зношування електрокорундом.

- На зображенні при низькому куті атаки абразивних частинок (15°) поверхня зношення представлена лунками (під літерою А), що утворюються в результаті удару абразивних частинок об поверхню. Такі лунки є типовими для мікроударного зношування, коли абразивні частинки ковзають по поверхні під малим кутом і залишають неглибокі сліди.

- Під літерою Б видно скупчення карбідів VC, які залишають за собою слід у вигляді матриці, захищеної карбідами завдяки тіньовому ефекту. Це свідчить про те, що карбіди VC забезпечують ефективний захист матриці на малих кутах атаки, перешкоджаючи глибокому проникненню абразивних частинок і зменшуючи інтенсивність зношування.

2. Зношування при куті атаки 90° (рис. 3.7, б):

- При більшому куті атаки (90°) знос носить переважно втомний характер, як показують темні області на зображенні. У цьому випадку абразивні частинки ударяються об поверхню майже перпендикулярно, що призводить до більш глибокого пошкодження структури.

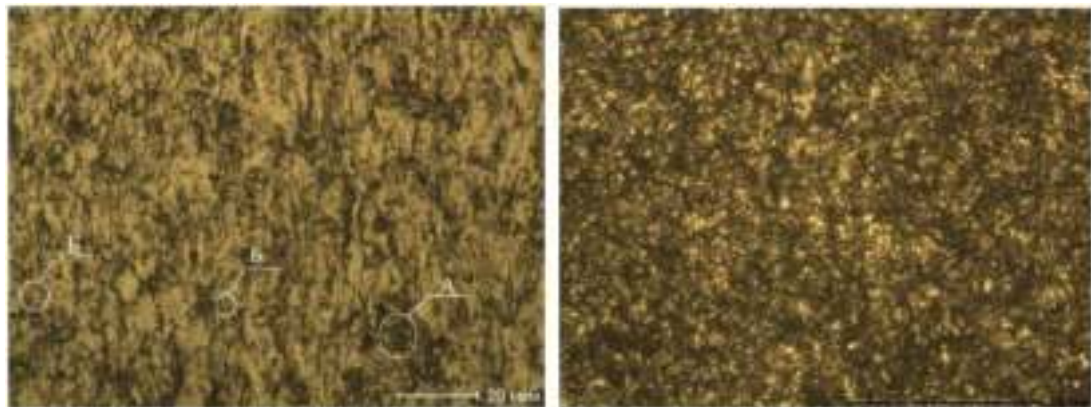
- Матриця, яка складається з метастабільного аустеніту та мартенситу, під дією ударів абразивних частинок зазнає фазових перетворень. Метастабільний аустеніт перетворюється на тендітний мартенсит, що призводить до руйнування матриці та викрашування частинок.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

- Карбіди VC, які при малих кутах атаки захищають матрицю, в умовах багаторазових ударів вдавлюються в матрицю. Це викликає фазові перетворення (аустеніт \rightarrow мартенсит) у прилеглих ділянках, що призводить до ослаблення зв'язку між карбідними включеннями та матрицею. В результаті цього карбіди можуть вимиватися газообразним потоком, а крихкі об'єми мартенситу під карбідами викрашуються.

- Зі збільшенням кута атаки здатність карбідів VC захищати матрицю знижується, оскільки удари стають більш інтенсивними та глибшими.

- Окремі частини евтектичного карбіду M_7C_3 , який є менш міцною фазою порівняно з VC, відколюються від сітчастої структури під багаторазовими ударами і вифарбовуються з поверхні покриття, що також сприяє зносу.



а)

б)

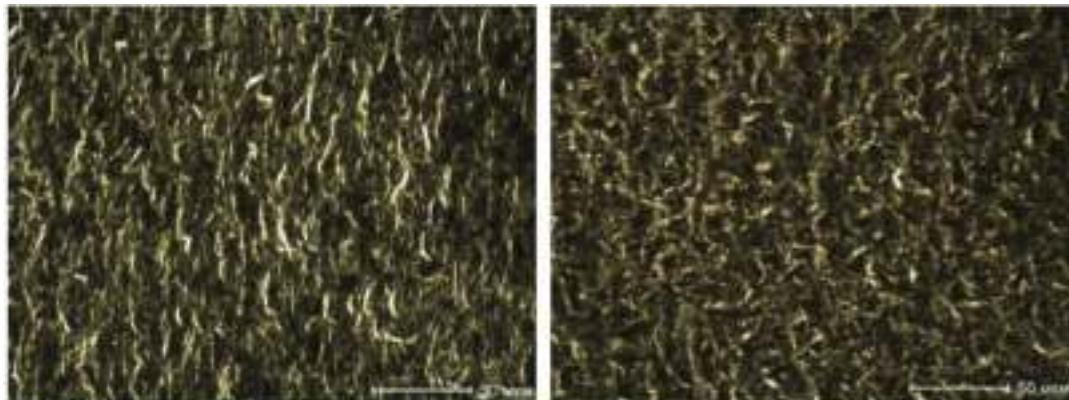
Рисунок 3.7 – Світле поле поверхонь:

а – поверхня X18ФНМ, зношена при $\alpha = 15^\circ$; б – поверхня X18ФНМ, зношена при $\alpha = 90^\circ$

Загалом, при малих кутах атаки карбіди VC забезпечують ефективний захист матриці завдяки своїй високій твердості, тоді як при збільшенні кута атаки відбувається більш інтенсивне руйнування і викрашування, особливо через втомне зношування та фазові перетворення в матриці.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лунки, тоді як при високому куті (90°) відбувається більш інтенсивне проникнення частинок у поверхню, що призводить до утворення глибоких лунок без явного напрямку зношування.



а)

б)

Рисунок 3.8 – Темне поле поверхонь:

а – поверхня Х18ФНМ, зношена при куті атаки 15° ; б – поверхня Х18ФНМ, зношена при куті атаки 90°

Таким чином, зношування Fe-Cr-V-Mo-C покриття відбувається через поетапну деградацію матриці і карбідів під впливом абразивних частинок, де карбіди VC і M_7C_3 забезпечують захисну функцію, уповільнюючи знос матриці.

Схема, наведена на рисунку 3.9, описує механізм руйнування Fe-Cr-V-Mo-C покриття під впливом абразивних частинок пилоповітряної суміші. Механізм абразивного зношування складається з кількох етапів:

1. Зношування матриці:

- Матриця Fe-Cr-V-Mo-C покриття зазнає зношування першою, оскільки її твердість подібна до твердості абразивних частинок вугільного пилу. Матриця менше протистоїть абразивному впливу, тому руйнується відносно швидко.

2. Захисна функція евтектики (M_7C_3):

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Евтектика (1380 HV) має більшу твердість, тому її зношування відбувається повільніше порівняно з матрицею. Вона виконує захисну функцію, закриваючи частину матриці на робочій поверхні і запобігаючи мікрорізанню абразивними частинками. Через свою структуру евтектика не виривається з поверхні, але поступово зрізається абразивними частинками.



Рисунок 3.14 – Характер руйнування покриття системи Fe-Cr-V-Mo-C пило повітряною абразивною сумішшю

3. Роль карбідів ванадію (VC):

- Карбіди ванадію, з твердістю 2900 HV, мають дуже високу стійкість до зношування, тому не руйнуються під дією абразивних частинок. Вони забезпечують "тіньовий ефект", захищаючи прилеглі ділянки матриці та евтектики від абразивного впливу.

- Однак з часом, після того як прилеглі об'єми матриці та евтектики зношуються, карбіди VC втрачають зв'язок з робочою поверхнею покриття і в кінцевому підсумку можуть бути вирвані газоабразивним потоком.

4. Після втрати карбідів VC:

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

- Після виривання карбідів VC залишаються відкритими ділянки матриці та евтектики, які швидко стираються через їх відносно високу вразливість до абразивного впливу.

5. Паралелі з поліруванням:

- Мікрорельєф, який формується під час абразивного зношування газоабразивним потоком при малих кутах атаки, подібний до рельєфу, що спостерігається при поліруванні покриттів на фетрі з пастою ГОІ. Це свідчить про схожість механізмів абразивного зношування нежорстко закріпленими частинками та механізму, що діє під малими кутами атаки.

Отже, схема на рисунку 3.9 ілюструє складний процес абразивного зношування, в якому матриця руйнується першою, потім поступово зношується евтектика, і лише на останньому етапі відбувається вивільнення карбідів VC.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

4 ОЦІНКА КОМЕРЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТА ПЕРСПЕКТИВНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ПОЗИЦІЇ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОСТІ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

4.1 Потенційні споживачі результатів дослідження.

У цільовий ринок входять комерційні та підрядні організації галузей теплоенергетики та гірничодобувної промисловості.

Для даних комерційних організацій критерієм сегментування є ремонт. Виробляємо сегментування ринку для реалізації технології наплавлення покриттів для деталей та обладнання, що працюють в умовах газоабразивного зношування за критеріями ремонту. Ця технологія у ремонті новим напрямом, яким до сьогодні не застосовувалася.

Основними сегментами даного ринку є енергетична (теплові електростанції, що працюють на вугіллі), на нього і буде спрямована орієнтація підприємства.

4.1.1 FAST – аналіз.

FAST - аналіз постає як синонім функціонально-вартісного аналізу. Суть цього методу базується на тому, що витрати, пов'язані зі створенням та використанням будь-якого об'єкта, що виконує задані функції, складаються з необхідних для його виготовлення та експлуатації та додаткових, функціонально невиправданих, зайвих витрат, що виникають через запровадження непотрібних функцій, що не мають прямого відношення до призначення об'єкта, або пов'язані з недосконалістю конструкції, технологічних процесів, матеріалів, методів організації праці тощо.

FAST – аналіз складається із шести стадій:

1. Вибір об'єкта FAST - аналізу;

									МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
										73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

2. Опис головної, основних та допоміжних функцій, що виконуються об'єктом;
3. Визначення значущості виконуваних функцій об'єктом;
4. Аналіз вартості функцій, що виконуються об'єктом дослідження;
5. Побудова функціонально-вартісної діаграми об'єкта та її аналіз;
6. Оптимізація функцій, що виконуються об'єктом.

Стадія 1. Вибір об'єкта FAST-аналізу.

Об'єктом даного аналізу є об'єкт дослідження, а саме плазмово-порошкова наплавка Fe-Cr-v-Mo-C покриттів.

Стадія 2. Опис головної, основних та допоміжних функцій, що виконуються об'єктом.

Головною функцією (призначенням) цієї технології є можливість отримання якісних покриттів на деталях, що працюють в умовах газообразивної дії.

Як основні функції плазмово-порошкового наплавлення можна виділити технологію наплавлення, що гарантує хороше формування і якість наплавлених валиків.

До допоміжних функцій можна віднести можливість отримання якісних покриттів без особливих зусиль, тому що процес наплавлення плазмовою дугою нічим не відрізняється від звичайного процесу зварювання вкритим електродом.

Стадія 3. Визначення значущості виконуваних функцій об'єктом.

Для оцінки значущості функцій використовуватимемо метод розміщення пріоритетів, запропонований Блумбергом В.А. та Глущенко В.Ф. В основу цього методу покладено розрахунково-експертне визначення значення кожної функції.

Спочатку необхідно побудувати матрицю суміжності функцій, таблиця 4.1), у якій визначимо найбільш значні їх.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1 – Матриця суміжності функцій технології плазмово-порошкового наплавлення на деталь методом один валик у шарі

Можливості	Можливість отримання якісних покриттів	Зручна технологія наплавлення	Відсутність громіздкого обладнання	Можливість отримання валика без особливих зусиль
Можливість отримання якісних покриттів	=	=	>	>
Зручна технологія наплавлення	=	=	>	>
Відсутність громіздкого обладнання	<	<	=	>
Можливість отримання валика без особливих зусиль	<	<	<	=

Примітка: «<» – менша; «=» – однакові функції за значимістю; «>» – більш значуща

Після визначення найважливіших функцій необхідно визначити кількісне співвідношення функції. Для цього збудуємо матрицю кількісних співвідношень функцій, таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Матриця кількісних співвідношень функцій.

	Можливість отримання якісних покриттів	Зручна технологія наплавлення	Відсутність громіздкого обладнання	Можливість отримання валика без особливих зусиль	Разом
Можливість отримання якісних покриттів	1	1	1,5	1,5	5
Зручна технологія наплавлення	1	1	1,5	1,5	5
Відсутність громіздкого обладнання	0,5	0,5	1	1,5	3,5
Можливість отримання валика без особливих зусиль	0,5	0,5	0,5	1	2,5
Σ					16

Примітка: 0,5 при <; 1,5 за «>»; 1 при «=»

Відповідно до матриці кількісних співвідношень отримали такі відносні значення значущості функцій: можливість отримання якісних покриттів – 0,3125 (5/16), зручна технологія наплавлення – 0,3125 (5/16),

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

відсутність громіздкого обладнання – 0,21875 (3,5/ 16), можливість отримання валика без особливих зусиль – 0,15625 (2,5/16). Видно, що найбільш значущою функцією (призначенням) плазмово-порошкового наплавлення деталей є її головне призначення - можливість отримання якісних покриттів.

Стадії 4 і 5 - аналіз вартості функцій, виконуваних об'єктом дослідження та побудова функціонально-вартісної діаграми об'єкта, та її аналіз відповідно проводити не будемо, оскільки представлені функції даної технології зварювання носять загальний характер і не можуть бути на даний момент оцінені у грошовому еквіваленті.

Стадія 6. Оптимізація функцій, які виконує об'єкт.

Плазмово-порошкова наплавка дозволяє скоротити загальний час та витрати на ремонт деталей, що працюють в умовах газоабразивного зношування за рахунок формування більш зносостійких покриттів. У цьому способі застосовується порошок, що сприяє економії зварювального матеріалу.

Порівняно з методами, що використовуються на сьогоднішній день, плазмово-порошкова наплавка дозволяє отримувати якісні покриття, кращі за якістю покриттям, виконаним ручним дуговим наплавленням.

4.1.2 SWOT – аналіз.

SWOT – аналіз – Strengths (сильні сторони), Weaknesses (слабкі сторони), Opportunities (можливості) та Threats (загрози) – це визначення сильних та слабких сторін проекту, виявлення можливостей та загроз щодо його здійснення. Цей аналіз проводять для виявлення зовнішнього та внутрішнього середовища проекту. Проводиться даний аналіз у кілька етапів.

Перший етап.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Даний етап полягає в описі сильних і слабких сторін проекту, таблиця 4.3, у виявленні можливостей та загроз для реалізації проекту, які виявились або можуть з'явитися у його зовнішньому середовищі.

До сильних сторін проекту належать:

Стабільний перебіг процесу формування валика – С1. Якісне формування покриття, що наплавляється - С2. Висока швидкість наплавлення - С3. Можливість наплавлення у всіх просторових положеннях без зміни режимів наплавлення – С4. Тривалість навантаження стала і дорівнює 100% - С5.

До слабких сторін проекту належать:

Необхідність висококваліфікованого персоналу – Сл.1. Дорожнеча обладнання - Сл.2.

До можливостей проекту належать:

Впровадження ринку нового методу наплавлення з допомогою переваг і витіснення застарілих розробок – В1. Фінансова підтримка спонсора – В2.

До погроз відносяться:

Необхідність підвищення кваліфікації робітника – У1.

Другий етап.

Даний етап полягає у виявленні відповідності сильних та слабких сторін науково-дослідного проекту зовнішнім умовам довкілля. Ця відповідність чи невідповідність мають допомогти виявити ступінь необхідності проведення стратегічних змін.

Таблиця 4.3 – Інтерактивна матриця проекту

Сильні сторони проекту					
Можливості	С1	С2	С3	С4	С5
В1	+	+	-	+	-
В2	-	-	-	-	-

4.2 Оцінка готовності проекту до комерціалізації.

На даному етапі проводиться оцінка ступеня готовності проекту до комерціалізації та визначення рівня власних знань щодо її проведення або завершення. Для цього необхідно заповнити спеціальну форму, що містить показники про ступінь опрацьованості проекту з позиції комерціалізації та компетенції розробника наукового проекту.

При проведенні аналізу за таблицею 4.5, за кожним показником ставиться оцінка за п'ятибальною шкалою. При цьому система виміру по кожному напрямку (ступінь опрацьованості наукового проекту, рівень наявних знань у розробника) відрізняється. Так, при оцінці ступеня опрацьованості наукового проекту 1 бал означає не опрацьованість проекту, 2 бали – слабку опрацьованість, 3 бали – виконано, але як не впевнений, 4 бали – виконано якісно, 5 балів – є позитивний висновок незалежного експерта. Для оцінки рівня наявних знань у розробника система балів набуває наступного вигляду: 1 бал означає не знайомий або мало знаю, 2 бали – в обсязі теоретичних знань, 3 бали – знаю теорію та практичні приклади застосування, 4 бали – знаю теорію та самостійно виконую, 5 балів балів – знаю теорію, виконую та можу консультувати.

Таблиця 4.5 – Бланк оцінки ступеня готовності наукового проекту до комерціалізації.

№ п/п	Найменування	Ступінь опрацьованості наукового проекту	Рівень наявних знань у розробника
1	Визначено наявний науково-технічний доробок	5	4

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

Продовження таблиці 1.5

2	Визначено перспективні напрямки комерціалізації науково-технічного зачепила	5	4
3	Визначено галузі та технології (товари, послуги) для пропозиції на ринку	5	3
4	Визначено товарну форму науково-технічного доробку для подання на ринок	5	4
5	Визначено авторів та здійснено охорону їх прав	5	5
6	Проведено оцінку вартості інтелектуальної власності	5	5
7	Проведено маркетингові дослідження ринків збуту	4	4
8	Розроблено бізнес-план комерціалізації наукової розробки	3	3
9	Визначено шляхи просування наукової розробки на ринок	4	4
10	Розроблено стратегію (форму) реалізації наукової розробки	4	5
11	Опрацьовано питання міжнародного співробітництва та виходу на закордонний ринок	1	1
12	Опрацьовано питання використання послуг інфраструктури підтримки, отримання пільг	3	3

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

Закінчення таблиці 1.5

13	Опрацьовано питання фінансування комерціалізації наукової розробки	4	3
14	Є команда для комерціалізації наукової розробки	4	4
15	Опрацьовано механізм реалізації наукового проекту	5	4
	Разом балів	63	56

Таким чином, можна сказати, що розробка є перспективною, а знання розробника є достатніми для успішної її комерціалізації.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

ВИСНОВКИ

1. Досліджено механізм газоабразивного зношування покриттів ситем Fe-Cr-C-V та Fe-Cr-V-Mo-C. При малих кутах атаки карбідна фаза захищає матрицю від руйнування, тим самим зменшуючи знос. Карбіди ванадію через свою твердість не можуть бути зруйновані і тому внаслідок тривалого зношування вони вириваються з робочої поверхні. Евтектика карбіду M_7C_3 через свою скелетообразного будови не може бути вирвана з поверхні і тому вона руйнується аналогічно матриці, але при цьому вона все одно захисний ефект на матрицю.

Таким чином, зношування Fe-Cr-V-Mo-C покриття відбувається через поетапну деградацію матриці і карбідів під впливом абразивних частинок, де карбіди VC і M_7C_3 забезпечують захисну функцію, уповільнюючи знос матриці.

2. В результаті лабораторних досліджень зносостійкість покриттів, отриманих плазмово-порошковим наплавленням порошком Пр-Х18ФНМ в 2...3 рази вище ніж покриттів, сформованих ручним дуговим наплавленням електродами Т-590.

3. Згідно виконаного FAST – аналізу доведено, що заміна технології ручного дугового наплавлення електродами Т-590 на плазмове наплавлення порошком Пр-Х18ФНМ на виробництві, дозволить збільшити термін експлуатації лопатей робочого колеса вентилятора млина і зменшити кількість ремонтів.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Експлуатація промислового теплоенергетичного устаткування : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Резидент Н. В., Ткаченко С. Й., Чепурний М. М. – [Вид. 2-е, перероб. і доп.]. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 142 с.
2. Мандрус В. І. Гідравлічні та аеродинамічні машини. Львів: Магнолія, 2006. 328 с
3. Степанов Д. В., Корженко Є. С., Боднар Л. А. Котельні установки промислових підприємств: навч. пос. Вінниця: ВНТУ, 2011. 120 с.
4. Експлуатація теплоенергетичних установок і систем / Драганов Б. Х., Іщенко В. В., Шеліманова О. В.; за ред. Б.Х. Драганова. Київ : Аграрна освіта, 2009. 230 с.
5. Електронний ресурс URL: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/remont-oborudovaniya-parogeneratornogo-ceha/Page-40.html>, дата звернення 10.10.2024 р.
6. ГКН 04.07.028-2005 Положення про проведення плановопопереджувальних ремонтів основного обладнання теплопостачальних підприємств.
7. Максименко О.П. Основи трибології: Навч. посібник / О.П. Максименко, О.Є. Лейко. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2005. – 192 с.
8. Чернець М.В. Дослідження механізмів та триботехнічних систем / М.В. Чернець, Ю.Ю. Скварок, М. Опеляк, Б.І. Кіндрацький. – Під заг. ред. М.В. Чернеця. – Дрогобич: Коло, 2003. – 440 с
9. Білик О.Г. Розвиток наукових і технологічних основ наплавлення зносостійких сплавів порошковими стрічками : дис. ... док. техн. наук : 05.03.06 : Маріуполь, 2019. 362 с.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

10. O. G. Belik, B. V. Efremenko (2017). Структурні макроаномалії покриття, наплавленого порошковою стрічкою ПЛ АН-111. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки, 35(), 50-57. <https://www.europub.co.uk/articles/-A-269485>

11. Mellor B.G. Surface coating for protection against wear / B.G.Mellor // CRC Press: Boca Raton Boston New York Washington, DC. – 2006. – 430p.

12. Tyagi A. Materials under extreme conditions recent trends and future prospects edited / A. Tyagi, S.Banerjee// BARC.:Mumbai, India. – 2017. – 841p

13. Артемчук, В. В. Нанесення шаруватих аморфізованих відновлювальних газотермічних покриттів / В. В. Артемчук, Є. А. Астахов // Вісн. Нац. техн. ун-ту ХПІ – Х., 2012. – № 33. – С. 28–37

14. Student M.M., Pokhmurs'ka H.V., Hvozdets'kyi V.V. Effect of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings // Materials Science. – 2009. – vol. 45. - № 4. –P. 481-489

15. Juan R. Laguna-Camacho, Vite-Torres M. Solid Particle Erosion on Different Metallic Materials // Tribology in engineering. – 2013. P. 63-78.

16. Venkataraman B. &Sundararajan G., the Solid Particle Erosion of Copper at Very Low Impact Velocities, Wear 1989; 135, 95-108.

17. Ambrosini L. &Bahadur S., Erosion of AISI 4140 Steel, Wear 1987; 117, 37-48.

18. Harsha A. P. & Deepak Kumar Bhaskar, Solid Particle Erosion Behavior of Ferrous and Non-ferrous Materials and Correlation of Erosion Data with Erosion Models, Materials and Design 2008; 29, 1745-1754.

19. Hutchings I. M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, London, Edward Arnold; 1992.

20. Morrison C.T. & Scattergood R. O., Erosion of 304 stainless steel, Wear 1986; 111-113.

21. Levy A. V. &Chik P., the Effects of Erodent Composition and Shape on the Erosion of Steel, Wear 1983; 89, 151-162.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

22. Liebhard M. & Levy A., The Effect of Erodent Particle Characteristics on the Erosion of Metals, Wear 1991; 151, 381-390

23. Матеріалознавство та технологія металів : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А. М. Власенко. – Київ : Літера ЛТД, 2019. – 224 с.

24. Полянський, С. К. Експлуатаційні матеріали для автомобілів і будівельно-дорожніх машин: підручник / С. К. Полянський, В. М. Коваленко. - К. : Либідь, 2005. - 504 с.

25. Електронний ресурс URL: <https://svarka.kr.ua/svarochnoe-oborudovanie/svarochnye-apparaty/reostaty-ballastnye/reostat-ballastnyj-rb-306-u2-esva>, дата звернення 10.11.2024 р.

26 Електронний ресурс URL: http://www.alpha-pribor.com.ua/pdf/GX_HQ.pdf, дата звернення 10.11.2024 р.

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

ДОДАТКИ

					МРТАМ 24.23604.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87