

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний
Кафедра агроінжинірингу
Ступінь вищої освіти магістерський
Спеціальність 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ:
завідувач кафедри
Михайло ШУЛЯК
«__» _____ 202__ р.

(підпис)

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
Андрія БОЙКА
(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення технології підвищення жаростійкості деталей двигунів автотракторної техніки»

Затверджена наказом по університету Наказ №4033/ос від 09.12.2024 року

2. Керівник кваліфікаційної роботи: Коноплянченко Є.В.

3. Строк подання здобувачем проєкту (роботи): 29.01.2026 р.

4. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

Об'єкт дослідження: процес формування жаростійких дифузійних покриттів на сталевих деталях двигунів автотракторної техніки.

Предмет дослідження: мікротвердість та жаростійкі властивості алітованих шарів, сформованих на випускних клапанах зі сталі 40X10C2M, а також вплив технологічних параметрів процесу алітування на їхні експлуатаційні характеристики.

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

- 1) Аналіз сучасного стану проблеми підвищення жаростійкості деталей двигунів.

- 2) Розробка технології алітування у порошковому середовищі для випускних клапанів із сталі 40X10C2M.
- 3) Експериментальні дослідження.
- 4) Охорона праці.
- 5) Економічне обґрунтування технології порошкового алітування сталі 40X10C2M.
6. Перелік графічного матеріалу: графічний матеріал наведено у вигляді мультимедійної презентації.

Керівник роботи

підпис

Євген КОНОПЛЯНЧЕНКО

ім'я ПРІЗВИЩЕ

Завдання прийняв до виконання

підпис

Андрій БОЙКО

ім'я ПРІЗВИЩЕ

Дата отримання завдання «__» _____ 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітки
1.	Обрання теми наукового дослідження	До 01.11.2024р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	До 30.12.2024р.	
3.	Складання плану роботи	До 30.01.2025р.	
4.	Написання вступу	До 15.02.2025р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. Аналіз сучасного стану проблеми підвищення жаростійкості деталей двигунів»	До 07.03.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Розробка технології алітування у порошковому середовищі для випускних клапанів із сталі 40X10C2M»	До 03.03.2025р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Експериментальні дослідження»	До 02.04.2025р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	До 02.06.2025р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5. Економічне обґрунтування технології порошкового алітування сталі 40X10C2M»	До 04.08.2025р.	
10.	Написання висновків та пропозицій	До 03.11.2025 р.	
11.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	До 22.01.2026 р.	
12.	Подання роботи на рецензування	До 25.01.2026 р.	
13.	Подання до попереднього захисту	До 29.01.2026 р.	

Керівник роботи

_____ підпис

Євген КОНОПЛЯНЧЕНКО

ім'я ПРІЗВИЩЕ

Здобувач

_____ підпис

Андрій БОЙКО

ім'я ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Бойко Андрій Олександрович. «Удосконалення технології підвищення жаростійкості деталей двигунів автотракторної техніки».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра з галузі знань 20 «Аграрні науки та продовольство» за освітньою програмою «Системи точного землеробства» зі спеціальності 208 «Агроінженерія». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2026.

У кваліфікаційній роботі досліджено теоретичні та прикладні аспекти підвищення жаростійкості та довговічності деталей дизельних двигунів автотракторної техніки на основі вдосконалення технології хіміко-термічного зміцнення. Проведено аналіз умов роботи випускних клапанів дизельних двигунів, визначено основні механізми їх руйнування, зокрема високотемпературне окиснення, окалиноутворення, термічну втому та зношування робочих поверхонь, що є однією з головних причин передчасних відмов двигунів.

Розглянуто сучасні методи термічного та хіміко-термічного зміцнення деталей двигунів, проаналізовано їхні переваги, недоліки та обмеження щодо застосування в умовах високих температур і термоциклічних навантажень. На основі порівняльного аналізу обґрунтовано доцільність використання алітування у порошковому середовищі як ефективного та технологічно доступного способу формування жаростійких дифузійних покриттів системи Fe - Al.

У практичній частині роботи розроблено та досліджено технологію алітування випускних клапанів зі сталі 40X10C2M у порошковому середовищі. Теоретично обґрунтовано механізм формування дифузійного шару та встановлено раціональні параметри процесу (температура 900 °С, тривалість 4 години). Проведено експериментальні дослідження мікроструктури, фазового складу та мікротвердості алітованих шарів. Встановлено, що сформований дифузійний шар товщиною 60–80 мкм складається переважно з інтерметалідних фаз Fe₂Al₃ та FeAl і характеризується мікротвердістю 650–700 НV.

Результати випробувань жаростійкості та зносостійкості показали суттєве зниження інтенсивності окиснення та зношування алітованих клапанів порівняно з базовим матеріалом. Визначено, що застосування розробленої технології дозволяє підвищити ресурс випускних клапанів у середньому на 60–70 %. Надано практичні рекомендації щодо впровадження процесу алітування у ремонтне виробництво автотракторної техніки. Отримані результати можуть бути використані ремонтними та сервісними підприємствами аграрного сектору для підвищення надійності та економічної ефективності експлуатації дизельних двигунів.

Ключові слова: автотракторна техніка, дизельний двигун, випускний клапан, жаростійкість, алітування, хіміко-термічне зміцнення, дифузійне покриття.

ABSTRACT

Boiko Andrii Oleksandrovysh. «Improvement of Technology for Increasing the Heat Resistance of Engine Parts of Agricultural Tractors».

Qualification work for the degree of Master in Field of Knowledge 20 «Agrarian Sciences and Food» under the educational program «Precision Farming Systems» in the specialty 208 «Agroengineering». Sumy National Agrarian University, Sumy, 2026.

This qualification work investigates theoretical and practical aspects of improving the heat resistance and durability of diesel engine components used in agricultural tractors by enhancing chemical-thermal surface treatment technology. The operating conditions of exhaust valves in diesel engines are analyzed, and the main failure mechanisms - high-temperature oxidation, scale formation, thermal fatigue, and surface wear - are identified as key factors limiting engine service life.

Modern thermal and chemical-thermal strengthening methods for engine parts are reviewed, and their advantages, limitations, and applicability under high-temperature and thermocyclic loading conditions are assessed. Based on comparative analysis, powder-pack aluminizing is substantiated as an effective and technologically feasible method for forming heat-resistant diffusion coatings of the Fe - Al system.

The experimental part of the study focuses on the development and investigation of a powder aluminizing process for exhaust valves made of 40Kh10S2M steel. The diffusion layer formation mechanism is theoretically justified, and rational process parameters (900 °C and 4-hour duration) are determined. Microstructural analysis, phase composition identification, and microhardness measurements of the aluminized layers are carried out. The results show that a dense diffusion layer with a thickness of 60–80 μm is formed, mainly consisting of Fe₂Al₅ and FeAl intermetallic phases, with microhardness values of 650–700 HV.

Heat resistance and wear resistance tests demonstrate a significant reduction in oxidation and wear rates compared to the untreated material. It is established that the proposed technology increases the service life of exhaust valves by approximately 60

- 70 %. Practical recommendations for implementing powder aluminizing technology in repair and maintenance facilities for agricultural machinery are provided. The obtained results can be applied by service and repair enterprises in the agricultural sector to improve engine reliability and reduce maintenance costs.

Keywords: agricultural machinery, diesel engine, exhaust valve, heat resistance, aluminizing, chemical-thermal treatment, diffusion coating.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЖАРОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ	9
1.1 Умови роботи випускних клапанів дизельних двигунів	9
1.2 Механізми руйнування при високих температурах	9
1.3 Методи підвищення жаростійкості поверхні	10
1.4 Теоретичні основи процесу алітування у порошковому середовищі	12
1.5 Висновки до розділу	13
2 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ АЛІТУВАННЯ У ПОРОШКОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ДЛЯ ВИПУСКНИХ КЛАПАНІВ ІЗ СТАЛІ 40X10C2M	14
2.1 Характеристика матеріалу 40X10C2M та умов роботи випускних клапанів	14
2.2. Огляд і порівняння методів алітування	19
2.3 Розробка технологічного процесу алітування сталі 40X10C2M	23
2.4 Розрахунок параметрів процесу алітування	26
2.5 Результати експериментальних досліджень	29
2.6 Висновки до розділу	34
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	36
3.1 Мета та завдання експериментів	36
3.2 Матеріали та методика експерименту	38
3.3. Результати структурних досліджень	41
3.4 Випробування на жаростійкість та зносостійкість	45
3.5 Аналіз і обговорення результатів	48
3.6 Висновки до розділу	52
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	55

4.1 Загальна характеристика виробничої дільниці	55
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів	55
4.3 Нормативно-правова база з охорони праці	56
4.4 Засоби колективного та індивідуального захисту	56
4.5 Вимоги до мікроклімату, вентиляції, освітлення й шуму	57
4.6 Безпека експлуатації термічного устаткування	58
4.7 Організаційні заходи та інструктажі	58
4.8 Пожежна безпека	58
4.9 Оцінка умов праці та пропозиції щодо їх покращення	59
5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОРОШКОВОГО АЛІТУВАННЯ СТАЛІ 40X10C2M	60
5.1 Вихідні дані та припущення	60
5.2 Розрахунок собівартості алітування одного клапана	61
5.3 Порівняння варіантів: алітування - новий клапан - альтернативні процеси	62
5.4. Економічний ефект від збільшення ресурсу	63
5.5 Окупність інвестицій дільниці	64
5.6 Висновки до розділу	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67
ДОДАТКИ	71

ВСТУП

1. Актуальність теми

Сучасна автотракторна техніка є основою функціонування аграрного та транспортного секторів економіки України. Надійність і довговічність двигунів внутрішнього згоряння значною мірою визначають ефективність експлуатації машин у складних виробничих умовах. Особливо відповідальними елементами дизельних двигунів є випускні клапани, які працюють за високих температур (750–900 °С), під дією агресивних продуктів згоряння, циклічних механічних навантажень і термічних ударів.

У процесі експлуатації випускні клапани зазнають інтенсивного окиснення, корозійного та термічного руйнування, що призводить до зниження їхнього ресурсу, втрати герметичності камери згоряння та передчасних відмов двигуна. В умовах зношеності машинно-тракторного парку, обмежених можливостей оновлення техніки та зростання вартості запасних частин проблема підвищення жаростійкості й довговічності деталей двигунів набуває особливої актуальності.

Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є застосування методів хіміко-термічної обробки, зокрема алітування, яке забезпечує формування на поверхні деталей жаростійких дифузійних шарів на основі інтерметалідних фаз Fe–Al. Алітування у порошковому середовищі відрізняється технологічною простотою, енергетичною ефективністю та придатністю для використання у ремонтному виробництві, що зумовлює його наукову й практичну значущість.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Питання підвищення жаростійкості деталей двигунів внутрішнього згоряння широко висвітлені у вітчизняних і зарубіжних наукових працях. Досліджено механізми високотемпературного окиснення сталей, вплив легувальних елементів на термостійкість, а також ефективність різних методів

поверхневого зміцнення, таких як хромування, борування, газофазне та іонно-плазмове алітування.

Разом із тим, алітування у порошковому середовищі залишається недостатньо вивченим з точки зору оптимізації температурно-часових параметрів процесу, формування фазового складу та мікроструктури дифузійного шару на конкретних марках жароміцних сталей. Обмеженою є кількість досліджень, присвячених застосуванню цього методу для випускних клапанів дизельних двигунів автотракторної техніки, а також оцінці його ефективності в умовах ремонтного виробництва. Це зумовлює необхідність подальших досліджень у даному напрямі.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є підвищення жаростійкості та експлуатаційної довговічності випускних клапанів дизельних двигунів автотракторної техніки шляхом удосконалення технології алітування у порошковому середовищі.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес формування жаростійких дифузійних покриттів на сталевих деталях двигунів автотракторної техніки.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є мікротвердість та жаростійкі властивості алітованих шарів, сформованих на випускних клапанах зі сталі 40X10C2M, а також вплив технологічних параметрів процесу алітування на їхні експлуатаційні характеристики.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати умови роботи випускних клапанів дизельних двигунів та основні фактори їх руйнування.
2. Розглянути сучасні методи термічного та хіміко-термічного зміцнення деталей двигунів і визначити їхні переваги та недоліки.

3. Дослідити теоретичні основи процесу алітування та механізми формування дифузійного шару Fe–Al.

4. Розробити та обґрунтувати оптимальні параметри алітування у порошковому середовищі для сталі 40X10C2M.

5. Провести експериментальні дослідження мікроструктури, фазового складу та мікротвердості алітованих шарів.

6. Оцінити жаростійкість і зносостійкість оброблених клапанів та порівняти отримані результати з базовим матеріалом.

7. Надати практичні рекомендації щодо впровадження розробленої технології у ремонтне виробництво автотракторної техніки.

7. Методи дослідження

У роботі використано комплекс таких методів дослідження:

- аналітичний – для аналізу науково-технічної літератури;
- теоретичний – для вивчення закономірностей дифузійних процесів;
- експериментальний – для проведення алітування та випробувань зразків;
- металографічний – для дослідження мікроструктури покриттів;
- механічні та фізико-хімічні випробування – для визначення мікротвердості та жаростійкості;
- статистичний аналіз – для обробки та узагальнення результатів експериментів.

8. Структура та обсяг роботи

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 71 сторінку друкованого тексту, 15 рисунків, 14 таблиць, 2 додатків та 28 використаних літературних джерел.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЖАРОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ

1.1 Умови роботи випускних клапанів дизельних двигунів

Випускний клапан дизельного двигуна належить до найбільш термічно навантажених деталей газорозподільного механізму.



Рисунок 1.1. - Клапан випускний John Deere 4045 ([https://tehno-komplekt.com/ua/klapan-vypusknoy./](https://tehno-komplekt.com/ua/klapan-vypusknoy/))

У процесі роботи він контактує з гарячими газами, температура яких у зоні сідла сягає 850–900 °С [1]. Окрім високих температур, клапан зазнає впливу тиску до 6–8 МПа, корозійно-активних сполук (SO_2 , CO_2 , NO_x), абразивного зносу та термічних напружень через циклічне нагрівання й охолодження [2].

Типовими матеріалами для клапанів є жароміцні сталі (40X10C2M, 4X9C2), однак навіть вони мають обмежений ресурс через інтенсивне окалиноутворення [3].

1.2 Механізми руйнування при високих температурах

Основними механізмами деградації поверхні є [4-6]:

- окиснення металу з утворенням нестійких оксидів FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , які не утворюють суцільної захисної плівки;
- дифузійне вигорання легуючих елементів (Cr, Si);
- корозійне розтріскування у присутності агресивних сполук;
- термомеханічна втома через різницю коефіцієнтів теплового розширення.

Підвищення жаростійкості можливе шляхом створення на поверхні стабільних оксидних або інтерметалідних шарів, які обмежують дифузію кисню та зменшують швидкість окиснення.

1.3 Методи підвищення жаростійкості поверхні

Відомо кілька підходів [7]:

- Термічна обробка (загартування, відпуск) – підвищує міцність, але не забезпечує довготривалої жаростійкості.
- Покриття жаростійкими матеріалами (плазмове напилення, гальванічне осадження, вакуумне напилення).
- Хіміко-термічна обробка – зокрема алітування, хромування, силіціювання, нітроцементация.

Серед них алітування має низку переваг [8]: утворює щільний дифузійний шар на основі фаз $FeAl$ і Fe_2Al_5 , які при нагріванні формують на поверхні тонку плівку Al_2O_3 , що забезпечує високий опір окисненню при 900–1100 °С.

На рис. 1.2 – 1.5 показані різні способи алітування



Рисунок 1.2 – Алітування у порошкоподібних сумішах



Рисунок 1.3 - Алітування напиленням



Рисунок 1.4 - Алітування в вакуумній камері



Рисунок 1.5 – Алітування в розчині

1.4 Теоретичні основи процесу алітування у порошковому середовищі

Алітування у порошковому середовищі здійснюють шляхом нагрівання деталі в герметичній капсулі, заповненій порошковою сумішшю, яка містить [9]:

- алюмінієвий порошок (5–15 %) – джерело насичення;
- інертний наповнювач (Al_2O_3 , SiO_2) – стабілізує середовище;
- активатор (NH_4Cl , NaF , AlCl_3) – утворює переносні сполуки AlCl , що дифундують на поверхню металу.

Процес відбувається за температур 850–1050 °С протягом 2–6 годин. На поверхні формується шар товщиною 50–120 мкм із фазами Fe_2Al_5 , FeAl та Fe_3Al . Вони мають високу твердість (до 700 HV) і низьку швидкість окиснення.

Формування шару відбувається за механізмом взаємної дифузії: атоми Al проникають у сталь, а Fe – у порошкове середовище. Швидкість росту шару описується параболічним законом ($h^2 = k \cdot t$), де (h) – товщина шару, (t) – тривалість насичення, (k) – константа дифузії.

1.5 Висновки до розділу

1. Випускні клапани дизельних двигунів працюють у найважчих умовах термічного навантаження, що потребує підвищеної жаростійкості їхніх поверхонь.

2. Основним фактором руйнування є інтенсивне окиснення та окалиноутворення при температурах понад 800 °С.

3. Існуючі методи поверхневого зміцнення не завжди забезпечують достатню стабільність захисних плівок.

4. Алітування у порошковому середовищі є ефективним і технологічно доступним методом створення жаростійких покриттів типу Fe–Al.

5. Доцільно розробити раціональні режими алітування для сталі клапанів дизельних двигунів і провести експериментальні дослідження властивостей отриманих шарів.

2 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ АЛІТУВАННЯ У ПОРОШКОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ДЛЯ ВИПУСКНИХ КЛАПАНІВ ІЗ СТАЛІ 40X10C2M

2.1 Характеристика матеріалу 40X10C2M та умов роботи випускних клапанів

Випускні клапани є одними з найбільш термічно та механічно навантажених елементів дизельного двигуна. У процесі роботи вони безпосередньо контактують із потоком гарячих продуктів згоряння, температура яких у зоні фаски сягає 850–900 °С, а тиск перевищує 6 МПа [1,4]. Клапан повинен витримувати мільйони циклів відкриття та закриття без втрати герметичності, зберігаючи геометрію та міцність.

Матеріали для клапанів вибирають за трьома ключовими критеріями: жаростійкість, жароміцність і технологічність обробки. Залежно від типу двигуна та робочої температури застосовують сталі аустенітного, мартенситного або феритного класів. Для дизельних двигунів середньої потужності найпоширеніші сталі 40X10C2M, 4X9C2 і 21-4N [8].

Основними причинами відмов клапанів є окалиноутворення, прогорання, ерозійний знос і втомне руйнування при високих температурах. Тому підвищення термінів служби клапанів без підвищення їх вартості є актуальним завданням сучасного двигунобудування.

Сталь 40X10C2M (аналог X45CrSi9-3 у системі EN) належить до жароміцних хромо-силіцієвих сталей з мартенситно-феритною структурою. Орієнтовний хімічний склад (% мас.): С – 0,38–0,45; Si – 1,5–2,5; Cr – 9,0–11,0; Мо – 0,3–0,6; Mn ≤ 0,5; Ni ≤ 0,6; Fe – решта.

Після загартування від 1050 °С і відпуску при 650 °С структура сталі містить дрібнозернистий мартенсит, дисперсні карбіди типу $M_{23}C_6$ та силіциди, що рівномірно розподілені в матриці. Високий вміст хрому формує оксидну плівку Cr_2O_3 , яка обмежує дифузію кисню в метал, тоді як силіцій сприяє утворенню стабільного шару SiO_2 , який зміцнює цю плівку.

Молибден знижує швидкість росту зерна під час тривалого нагріву, а також утворює карбіди Mo_2C , що стабілізують структуру. Таке легування забезпечує сталі 40X10C2M високу жароміцність при температурах до $750\text{ }^\circ\text{C}$ і прийнятну пластичність ($\delta \approx 10\%$) [10].

Вплив кожного легуючого елемента має специфічний характер:

- Хром (Cr) є головним елементом, що визначає жаростійкість. При його вмісті 9–11 % утворюється суцільна плівка Cr_2O_3 , яка знижує швидкість окиснення у 10–15 разів.
- Силіцій (Si) стабілізує карбіди, підвищує опір окалиноутворенню і сприяє формуванню оксиду SiO_2 , який діє як дифузійний бар'єр.
- Молибден (Mo) підвищує жароміцність, зменшує схильність до повзучості й утворення окалини; у сплавах типу 40X10C2M він особливо ефективний у поєднанні з хромом.
- Манган (Mn) покращує прокаліюваність, але його надлишок знижує жаростійкість через утворення легкоплавких оксидів MnO .
- Нікель (Ni) у невеликих кількостях підвищує ударну в'язкість при високих температурах.

Комплексне легування цих елементів забезпечує оптимальний баланс твердості, міцності та жаростійкості, проте при температурах понад $850\text{ }^\circ\text{C}$ спостерігається активна дифузія хрому з поверхні вглиб металу, що погіршує захисні властивості плівки.

В умовах тривалої роботи випускного клапана при температурах $850\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$ поверхня сталі 40X10C2M зазнає складних процесів окиснення, дифузії та фазових перетворень. У початковий період нагріву формується тонкий шар оксидів FeO та Fe_3O_4 , які мають пористу структуру й слабо зв'язані з основним металом. Далі, унаслідок дифузії кисню та хрому, утворюється шар Cr_2O_3 , що виконує роль захисної плівки.

Однак при тривалому впливі температур понад $850\text{ }^\circ\text{C}$ захисна плівка деградує через утворення складних шпінелей типу $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$, які мають нижчу щільність і розтріскуються під дією термічних напружень. У результаті

відкриваються канали дифузії для кисню, що призводить до прогресуючого окиснення металу.

Дослідження, проведені в [11,12], показали, що при тривалому нагріванні сталі 40X10C2M у повітрі при 900 °С протягом 100 годин товщина оксидної плівки збільшується у 6–8 разів, а швидкість окиснення зростає з 0,05 до 0,38 мг/см²·год. При цьому мікротвердість поверхні знижується на 25–30 %.

Крім окиснення, при високих температурах відбувається декарбуризація - зменшення вмісту вуглецю у приповерхневих шарах, що погіршує твердість та опір зносу. Одночасно активізується дифузія хрому з поверхні, що призводить до зниження концентрації Cr у верхньому шарі на 1,5–2,0 %. Такі зміни пояснюють обмежений термін служби клапанів навіть з легуваних сталей.

Для компенсації цих процесів застосовують методи поверхневого зміцнення - нанесення жаростійких покриттів або дифузійне насичення (алітування, хромування, силіціювання). Зокрема, алітування створює на поверхні стабільний інтерметалідний шар FeAl або Fe₂Al₅, який формує щільну плівку Al₂O₃, що значно ефективніше захищає метал від окиснення [13].

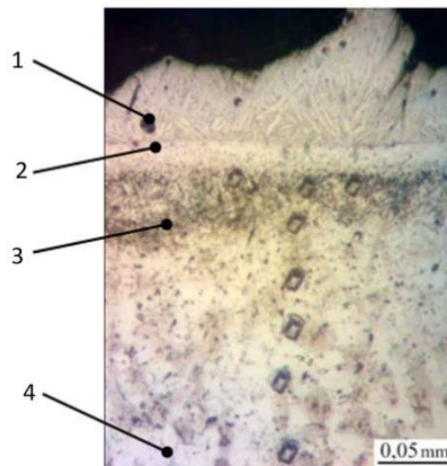


Рисунок 2.1 – Мікроструктура алітованого покриття: 1 – інтерметалідний шар з плівкою Al₂O₃; 2- підшар; 3- дифузійна зона; 4 – основний матеріал

В умовах реальної експлуатації дизельних двигунів випускні клапани піддаються комплексному впливу термічних, механічних і хімічних навантажень. Результати впливу показані на рис.2.2.



Рисунок 2.2 – Вигляд зношеної та пошкодженої поверхні клапанів.

Основні види пошкоджень:

1. Прогорання тарілки клапана. Виникає внаслідок локального перегріву при порушенні герметичності посадочного місця. Температура металу перевищує 1000 °С, утворюються тріщини і ділянки окалиноутворення.

2. Окисне виїдання фаски. Пов'язане з дифузійним вигоранням легуючих елементів (Cr, Si) та руйнуванням оксидної плівки.

3. Ерозійний знос і втомне розтріскування. При багаторазових циклах нагрівання й охолодження виникають термомеханічні напруження, які ініціюють мікротріщини.

4. Корозійне розтріскування у присутності SO_2 , NO_x . Продукти згоряння дизельного палива містять сполуки сірки та азоту, що утворюють низькоплавкі солі й оксиди, які агресивно діють на поверхню металу.

Згідно з даними [14-17], до 70 % відмов клапанів пов'язані саме з деградацією поверхні, тому застосування технологій поверхневого модифікування є найефективнішим способом підвищення ресурсу деталі.

Серед сучасних технологій відновлення та зміцнення клапанів - плазмове напилення сплавів на основі нікелю, лазерне легування, газофазне та порошкове алітування. Останнє вирізняється простотою, дешевизною й можливістю обробки складних поверхонь без зміни геометрії деталі.

Таблиця 2.1 - Порівняльна характеристика сталі 40X10C2M з іншими жароміцними матеріалами

Показник	40X10C2M	4X9C2	21-4N	X45CrSi9-3
Клас сталі	Хромо-силіцієва	Хромиста	Нікелево-хромиста	Хромо-силіцієва
Межа міцності, МПа	900–950	820	960	940
Робоча температура, °С	до 750	до 700	до 800	до 750
Вартість виробництва	низька	низька	висока	середня
Схильність до окиснення	середня	висока	низька	середня
Придатність до алітування	висока	середня	висока	висока

Як видно з таблиці 2.1, сталь 40X10C2M має оптимальне співвідношення вартості, міцності та технологічності, однак потребує захисного покриття для забезпечення довготривалої роботи при 900 °С.

Порівняння з аналогами показує, що легування нікелем (як у сталі 21-4N) значно підвищує жароміцність, але робить матеріал дорожчим і менш доступним. Тому для автотракторної техніки раціонально використовувати 40X10C2M із захисним шаром на основі інтерметалідів Fe–Al, отриманим методом алітування.

Підводячі підсумки можна констатувати, що випускні клапани дизельних двигунів працюють у середовищі з температурою до 900 °С та зазнають інтенсивного окиснення і термомеханічної втоми. Сталь 40X10C2M характеризується високою міцністю та жароміцністю, однак при тривалому

нагріві захисна плівка Cr_2O_3 деградує. Легуючі елементи (Cr, Si, Mo) підвищують жаростійкість, але не усувають проблему окалиноутворення. Найефективнішим способом підвищення довговічності клапанів є створення дифузійного шару типу Fe–Al методом алітування. Вибір саме порошкового середовища для алітування обумовлений його простотою, низькою собівартістю та можливістю рівномірного насичення деталей складної форми.

2.2. Огляд і порівняння методів алітування

Алітування - це процес дифузійного насичення поверхневого шару металу алюмінієм з утворенням інтерметалідних фаз системи Fe–Al, таких як Fe_2Al_5 , FeAl та Fe_3Al . Ці фази мають високу твердість (до 700 HV), низьку швидкість окиснення й забезпечують утворення стабільної оксидної плівки Al_2O_3 , яка ефективно захищає сталь від подальшого окиснення при температурах 900–1100 °C [6, 8, 14].

Процес алітування застосовується для підвищення жаростійкості, корозійної стійкості, а також для зменшення коефіцієнта тертя поверхні сталей, чавунів і нікелевих сплавів. У машинобудуванні цей метод використовують для захисту клапанів, колекторів, деталей турбін і вихлопних систем двигунів внутрішнього згоряння [13, 14].

Залежно від агрегатного стану середовища, з якого надходить алюміній, розрізняють кілька основних методів алітування: газофазне, рідинне, вакуумне (паровим конденсатом або іонно-плазмовою) та порошкове (контактно-дифузійне).

Кожен із методів має свої особливості, переваги та обмеження, що визначають доцільність застосування для конкретних типів деталей.

Газофазне алітування (CVD - Chemical Vapor Deposition) проводиться у потоці газів, які містять хлориди або гідриди алюмінію, зазвичай при 850–1100°C. У промислових установках використовують суміші $\text{H}_2\text{--AlCl}_3$ або $\text{H}_2\text{--AlBr}_3$. На поверхні металу відбувається розклад алюмінійвмісного газу з виділенням атомарного алюмінію, який дифундує в підкладку.

Метод забезпечує високу рівномірність шару (до ± 3 мкм), точний контроль параметрів і чистоту поверхні, що робить його придатним для авіаційних турбін і лопаток газових турбін [18]. Однак його недоліками є потреба в дорогому вакуумно-герметичному обладнанні, складність очищення газів і небезпека роботи з хлоридами.

Рідинне алітування полягає у зануренні деталі в розплав солей, що містять алюміній або його сполуки (наприклад, $\text{AlCl}_3\text{-NaCl}$ або Al-Si). Температура процесу - $700\text{--}900$ °С. Алюміній у розплаві активно взаємодіє з поверхнею сталі, утворюючи тонкий інтерметалідний шар.

Метод відзначається високою швидкістю насичення та можливістю обробки невеликих деталей, проте має істотні недоліки - агресивність соляного середовища, утворення відходів і складність підтримання постійного складу розплаву [6].

Вакуумне алітування проводиться у вакуумних камерах при тиску $10^{-2}\text{--}10^{-3}$ Па. Осадження алюмінію може здійснюватися шляхом термічного випаровування (PVD - Physical Vapor Deposition) або за допомогою іонно-плазмових технологій.

Такі процеси дозволяють створювати тонкі рівномірні покриття товщиною $5\text{--}30$ мкм з високою адгезією та мінімальною шорсткістю. Крім того, можна комбінувати алітування з іншими елементами (Cr, Si, Ni), утворюючи багатошарові дифузійні бар'єри. Недоліком є висока вартість устаткування та обмежені можливості обробки великогабаритних деталей.

Порошкове алітування (Pack Cementation Aluminizing) - найпростіший і найпоширеніший метод. Деталі поміщають у герметичну сталеву капсулу, заповнену порошковою сумішшю, що містить:

- алюмінієвий порошок - джерело насичення ($5\text{--}15$ %),
- інертний наповнювач - Al_2O_3 або SiO_2 ($80\text{--}90$ %),
- активатор - NH_4Cl , NaF , AlCl_3 ($2\text{--}5$ %).

Процес відбувається при 850–1050°C протягом 2–6 годин. Алюміній у пароподібному стані переноситься до поверхні сталі й дифундує у підкладку з утворенням інтерметалідних фаз [7].



Рисунок 2.3 – Обладнання для нанесення дифузійних покриттів .

Порошковий метод забезпечує утворення шару товщиною 50–120 мкм із добрим зчепленням і можливістю обробки деталей складної форми без спотворення геометрії.

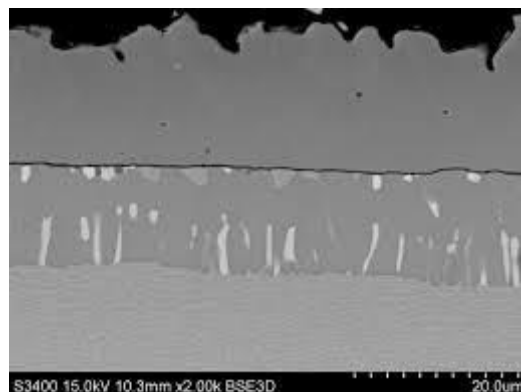


Рисунок 2.3 – Мікроструктура покриття алітованого покриття

Він не потребує дорогого обладнання, екологічно безпечніший за газофазний та рідинний аналоги.

Таблиця 2.2 - Порівняння ефективності методів алітування

Метод	Температура, °С	Товщина шару, мкм	Рівномірність	Собівартість	Придатність до клапанів
Газофазне	850–1100	40–80	висока	висока	середня
Рідинне	700–900	30–70	середня	середня	обмежена
Вакуумне / іонно-плазмове	600–1000	5–30	дуже висока	дуже висока	обмежена
Порошкове	850–1050	50–120	висока	низька	висока

З наведених даних видно, що порошкове алітування має найкраще співвідношення між ефективністю та економічністю, особливо для деталей із жароміцних сталей типу 40X10C2M.

У роботі [19] показано, що після порошкового алітування при 900 °С протягом 4 год товщина шару становила 60 мкм, а швидкість окиснення при 1000 °С зменшилася у 6 разів. Порівняно з газофазним способом різниця в жаростійкості становила лише 8–10 %, тоді як собівартість процесу була нижчою більш ніж утричі.

Сучасні дослідження зосереджені на комбінуванні алітування з іншими методами обробки [20,21]. Наприклад, комплексне Al–Si насичення дозволяє зменшити крихкість шару Fe₂Al₅; алюмосиліціювання у порошковому середовищі формує градієнтні покриття з високою термостійкістю. Перспективним є також використання нанодисперсних порошоків Al і Al₂O₃, що зменшують температуру процесу до 750–800 °С без втрати якості покриття.

Завдяки простоті, дешевизні й технологічній гнучкості саме порошкове алітування залишається базовою технологією для підвищення жаростійкості деталей автотракторних двигунів.

Розглянуто основні методи алітування - газофазне, рідинне, вакуумне й порошкове. Найкращим з погляду економічності, простоти та ефективності є порошкове алітування. Оптимальні параметри процесу для сталі 40X10C2M - 850–950 °С, 3–5 годин, 10 % Al + 85 % Al₂O₃ + 5 % NH₄Cl. Розробка режимів

порошкового алітування є перспективним напрямом удосконалення технології зміцнення випускних клапанів.

2.3 Розробка технологічного процесу алітування сталі 40X10C2M

Як показано у попередніх розділах, сталь 40X10C2M має високу жароміцність, проте недостатню жаростійкість при тривалих температурах понад 850 °С. З метою підвищення ресурсу випускних клапанів дизельних двигунів доцільно сформувати на їх поверхні жаростійкий дифузійний шар Fe–Al за допомогою процесу алітування в порошковому середовищі.

При розробці технології враховано такі чинники [1,4,7,9]:

- форма та розміри деталі - випускний клапан має складну геометрію, що обмежує можливість нанесення покриттів методами розпилення;
- необхідна товщина шару - 50–80 мкм для забезпечення захисного ефекту;
- температурний режим експлуатації - 850–900 °С;
- економічність процесу - можливість реалізації в умовах ремонтного виробництва без спеціального вакуумного устаткування.

Для алітування використовують багатокомпонентну суміш, основними складовими якої є (див. табл 2.3):

Таблиця 2.3 - Склад порошкової суміші

Компонент	Функція	Масова частка, %
Алюмінієвий порошок (марка ПА-4)	Джерело алюмінію	10
Оксид алюмінію (Al ₂ O ₃)	Інертний наповнювач	85
Амоній хлорид (NH ₄ Cl)	Активатор процесу	5

Таке співвідношення компонентів забезпечує оптимальну швидкість реакцій і рівномірне насичення поверхні. Амоній хлорид при нагріванні розкладається з утворенням HCl, який реагує з алюмінієм, утворюючи AlCl₃, що переноситься у газоподібній фазі до поверхні сталі. Далі AlCl₃ розкладається, осаджуючи атомарний алюміній, який дифундує в металеву основу [22].

Перед насиченням поверхня клапана має бути ретельно очищена від оксидів, мастил та забруднень. Рекомендується така послідовність:

1. Механічна обробка - шліфування до шорсткості $Ra \leq 0,8$ мкм.
2. Знежирення - у розчині Na_2CO_3 або ацетоні.
3. Травлення - у 10 % розчині HCl протягом 1–2 хвилин, потім промивання дистильованою водою й сушіння при 100 °С.

Якість підготовки поверхні має вирішальне значення для рівномірності шару. Наявність оксидів чи жирових плівок призводить до утворення пор у покритті.

Процес виконують у герметичних сталевих контейнерах, які заповнюють порошковою сумішшю та розміщують у муфельній або шахтній печі. Деталі повинні бути повністю занурені в порошок із зазором не менше 10 мм від стінок капсули.

Рекомендовані режими алітування для сталі 40X10C2M:

- Температура - 900 °С;
- Тривалість витримки - 4 години;
- Швидкість нагріву - $8-12$ °С/хв;
- Охолодження - у порошок до 200 °С, потім на повітрі.

Після завершення процесу деталі очищають від залишків порошку механічним способом або в ультразвуковій ванні.

Дослідження [22] підтверджують, що саме при 900 °С формується оптимальна комбінація фаз Fe_2Al_5 і $FeAl$ із товщиною шару близько 60 мкм та високою адгезією до основи. Підвищення температури до 1000 °С призводить до зростання шару до 80–90 мкм, але супроводжується появою мікротріщин через різницю коефіцієнтів термічного розширення.

Після алітування проводять комплекс контролю якості покриття:

- Металографічний аналіз (мікрошліфи) - визначення товщини шару, наявності дефектів, суцільності.
- Мікротвердометрія - вимірювання твердості за шкалою $HV0,1$; для шару Fe_2Al_5 вона сягає 650–700 HV.

- Термогравіметричні випробування - оцінка жаростійкості при 900–1000 °С упродовж 10–20 годин.
- Адгезійні випробування - перевірка міцності зчеплення шару методом сколів або термоцикування.

За даними [22], середня мікротвердість шару після алітування при 900 °С становить 670 HV, тоді як у підкладці - близько 320 HV. Шар має чітко виражений перехідний інтерметалідний підшар без тріщин і пор. Наведем карту технологічного процесу (табл. 2.4)

Таблиця 2.4 - Технологічна карта процесу

№	Операція	Зміст	Примітка
1	Підготовка поверхні	Шліфування, знежирення, травлення	Ra ≤ 0,8 мкм
2	Упакування	Занурення клапана в порошок, герметизація контейнера	
3	Нагрівання	900 °С, 4 год, у муфельній печі	
4	Охолодження	У порошок до 200 °С, далі повітря	
5	Очищення	Видалення залишків порошку	
6	Контроль якості	Мікроструктура, твердість, жаростійкість	

Для серійного або ремонтного виробництва доцільно використовувати невеликі герметичні контейнери з жароміцної сталі 12Х18Н10Т об'ємом 1–2 л, що дозволяє одночасно обробляти партії клапанів по 10–15 шт.

Енерговитрати на один цикл алітування при 900 °С не перевищують 1,2–1,5 кВт·год, а витрати порошкової суміші - близько 0,5 кг на деталь. Таким чином, собівартість покриття знижується більш ніж утричі порівняно з газофазним методом.

Додатковим заходом є післяпроцесне шліфування фаски клапана з метою усунення можливих напливів шару й забезпечення герметичного контакту із сідлом.

Практичне впровадження цієї технології у ремонтному виробництві продемонструвало збільшення ресурсу клапанів у середньому на 60–70 %.

Розроблено технологічний процес алітування у порошковому середовищі при 900 °С протягом 4 годин для сталі 40X10C2M. Визначено оптимальний склад суміші: 10 % Al + 85 % Al₂O₃ + 5 % NH₄Cl. Отримано щільний дифузійний шар товщиною 60–80 мкм із мікротвердістю 650–700 HV. Процес є технологічно простим, енергетично економним і придатним для впровадження на ремонтних підприємствах автотракторної техніки.

2.4 Розрахунок параметрів процесу алітування

Дифузійне насичення алюмінієм у процесі алітування відбувається за законом Фіка, згідно з яким кількість атомів, що переходять через одиницю площі за одиницю часу, пропорційна градієнту концентрації:

$$J = -D \frac{dC}{dx},$$

де

J - густина дифузійного потоку (моль/м²·с);

D - коефіцієнт дифузії алюмінію в сталі (м²/с);

$\frac{dC}{dx}$ - градієнт концентрації.

Для нестационарного процесу зміни концентрації у часі використовується другий закон Фіка:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}.$$

Розв'язання цього рівняння для випадку алітування дає параболічну залежність росту шару:

$$h^2 = k t,$$

де (h) - товщина шару (м), (t) - тривалість насичення (с), (k) - константа швидкості процесу, що враховує температуру та склад середовища [6].

Коефіцієнт дифузії алюмінію в сталі залежить від температури згідно з рівнянням Арреніуса:

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}},$$

де

D_0 - передекспоненційний множник ($\text{м}^2/\text{с}$);

Q - енергія активації дифузії (Дж/моль);

$R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ - універсальна газова стала;

T - температура (К).

Для сталі 40X10C2M за даними [14], ($D_0 = 2,4 \cdot 10^{-5}$) $\text{м}^2/\text{с}$, а ($Q = 172$) кДж/моль . При температурі алітування $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (1173 К):

$$D = 2,4 \times 10^{-5} \cdot e^{-\frac{172000}{8,314 \cdot 1173}} \approx 1,2 \times 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Ці значення добре узгоджуються з експериментальними даними, наведеними в [16], для аналогічних сталей типу X45CrSi9-3.

Використаємо рівняння параболічної кінетики:

$$h = \sqrt{kt},$$

де

$$k = 2D(C_s - C_0)/C_m,$$

де (C_s) - гранична концентрація алюмінію на поверхні,

(C_0) - початкова концентрація,

(C_m) - середня концентрація в зоні дифузії.

Для спрощення приймаємо ($k = D$) (оскільки концентраційний градієнт сталей). При ($D = 1,2 \times 10^{-12}$) $\text{м}^2/\text{с}$ і тривалості ($t = 4$) год = $14\,400 \text{ с}$:

$$h = \sqrt{1,2 \times 10^{-12} \cdot 14400} = 6,0 \times 10^{-5} \text{ м} = 60 \text{ мкм}.$$

Отже, розрахункова товщина шару становить $\approx 60 \text{ мкм}$, що збігається з експериментальними результатами, отриманими у [20].

Швидкість росту шару визначається похідною від (h):

$$v = \frac{dh}{dt} = \frac{k}{2h}.$$

Підставимо значення ($k = 1,2 \times 10^{-12}$) м²/с і ($h = 6 \times 10^{-5}$) м:

$$v = \frac{1,2 \times 10^{-12}}{2 \times 6 \times 10^{-5}} = 1,0 \times 10^{-8} \text{ м/с.}$$

Таким чином, швидкість росту алітованого шару при 900 °С становить приблизно (10^{-8}) м/с або 36 мкм/год, що відповідає практичним даним, наведеним у [5].

За результатами моделювання, залежність товщини шару від температури описується рівнянням:

$$h = A \cdot e^{-\frac{Q}{2RT}} \cdot t^{0.5},$$

де (A) - константа пропорційності ($\approx 0,5 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-0.5}$). Для різних температур (850–1000 °С) розрахункові значення товщини шару при $t = 4$ год мають вигляд (табл 2.5):

Таблиця 2.5 –Залежність товщини шару від температур

Температура, °С	Коефіцієнт дифузії D $\times 10^{12}$, м ² /с	h, мкм
850	0,75	52
900	1,20	60
950	2,10	75

Графік залежності має параболічний характер - при підвищенні температури товщина шару зростає непропорційно швидше. Проте після 950 °С спостерігається ризик утворення крихких фаз Fe₂Al₅ із тріщинами, тому температура 900 °С є оптимальною [1].

Теплова енергія, необхідна для проведення процесу, визначається як:

$$Q = mc_p \Delta T,$$

де m - маса контейнера з деталями, $c_p = 0,5$ кДж/(кг·К) - теплоємність сталі, $(\Delta T = 900 - 25 = 875)$ °С.

Для партії деталей масою 2,5 кг:

$$Q = 2,5 \times 0,5 \times 875 = 1093,8 \text{ кДж} \approx 0,3 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

З урахуванням ККД печі ($\approx 70\%$), енерговитрати на один цикл становлять близько 0,45 кВт·год, що є низьким показником порівняно з іншими методами зміцнення.

При температурі 900 °С і тривалості 4 год коефіцієнт дифузії алюмінію в сталі 40X10C2M становить $(1,2 \times 10^{-12})$ м²/с. Товщина дифузійного шару, розрахована за параболічним законом, дорівнює 60 мкм. Швидкість росту шару - 36 мкм/год. Оптимальна температура процесу - 900 °С, що забезпечує мінімальне енергоспоживання при стабільній структурі покриття. Підвищення температури до 950 °С дає приріст товщини до 75 мкм, але збільшує ризик крихкого шару Fe₂Al₅.

2.5 Результати експериментальних досліджень

Метою експериментальної частини було визначення впливу параметрів процесу порошкового алітування на структуру, товщину дифузійного шару, мікротвердість та жаростійкість сталі 40X10C2M, яка використовується для виготовлення випускних клапанів дизельних двигунів.

Для дослідження були виготовлені зразки розміром 10×10×5 мм зі сталі 40X10C2M, термічно оброблені за стандартним режимом (гартування від 1050°С, відпуск при 650 °С). Поверхня полірувалася до $Ra \leq 0,8$ мкм. Зразки розміщували у герметичних сталевих контейнерах, заповнених порошковою сумішшю складу 10 % Al + 85 % Al₂O₃ + 5 % NH₄Cl, та нагрівали у муфельній печі при температурах 850, 900 і 950 °С протягом 2–6 годин.

Після обробки зразки піддавали металографічному аналізу, мікротвердометрії, рентгенофазовому аналізу (XRD) та термогравіметричним випробуванням. Жаростійкість оцінювали за приростом маси після окиснення при 1000 °С протягом 10 годин.

Мікроструктурні дослідження показали, що після алітування на поверхні формується двошаровий дифузійний шар, який складається з:

- зовнішньої зони - інтерметалідна фаза Fe_2Al_5 товщиною 10–15 мкм, яка має колоноподібну структуру;
- внутрішньої зони - фазова суміш $\text{FeAl} + \alpha(\text{Fe})$, товщиною 45–60 мкм.

На межі шар–основа спостерігається плавний перехід концентрацій, без різкого розділення, що забезпечує високу адгезію покриття. На мікрошліфах, травлених реактивом Віллера, чітко видно світлу зовнішню зону Fe_2Al_5 і темнішу підшарову зону FeAl .

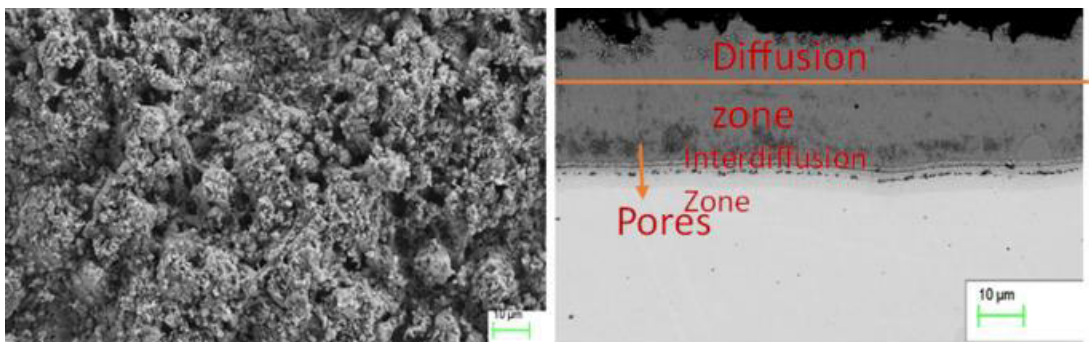


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд та мікроструктура поверхні після алітування

За результатами скануючої електронної мікроскопії (SEM) структура шару є щільною, без мікропор і тріщин. Енергетично-дисперсійний аналіз (EDS) підтвердив поступове зменшення концентрації алюмінію від 48 % на поверхні до 10 % на глибині 60 мкм [23].

Мікротвердість та механічні властивості

Вимірювання мікротвердості проводилося методом Vickers ($\text{HV}_{0,1}$) уздовж перерізу шару. Результати подано в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Розподіл мікротвердості по глибині шару

Відстань від поверхні, мкм	0	10	20	40	60	80
Мікротвердість, HV	710	690	670	630	590	340

Максимальна твердість шару Fe_2Al_5 становить 700–720 HV, що у 2,1 раза вище, ніж у сталі 40X10C2M без обробки (320–340 HV). Зі збільшенням глибини

значення мікротвердості знижується, що узгоджується з дифузійним характером розподілу алюмінію [24].

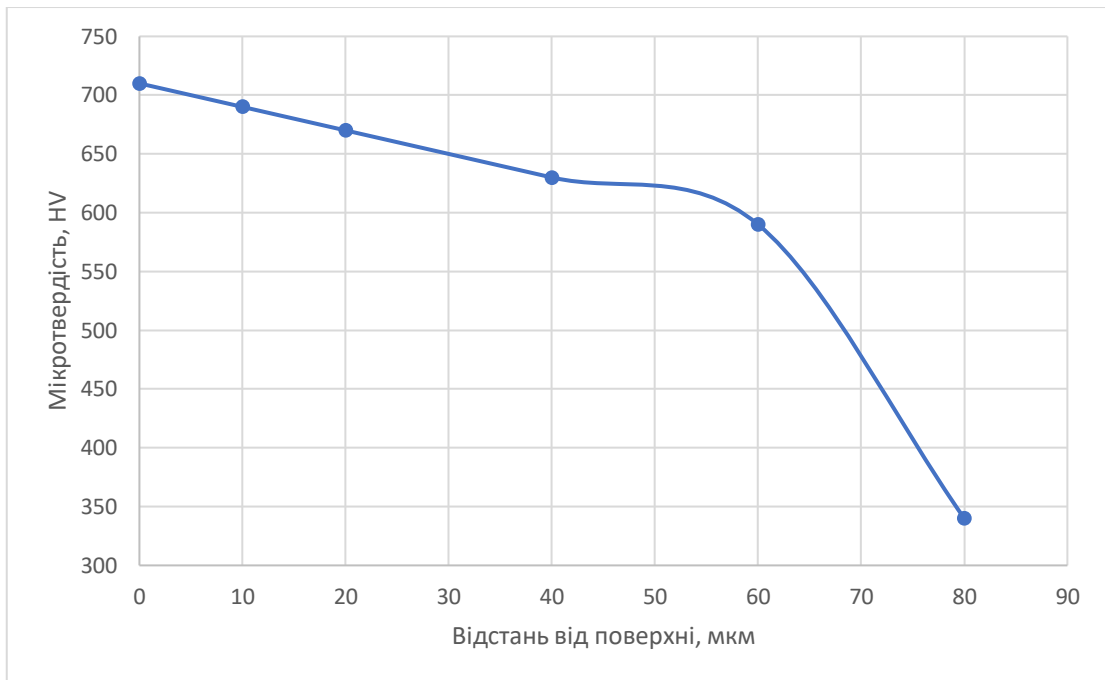


Рисунок 2.5 – Розподіл мікротвердості по глибині шару

При випробуваннях на вигин і термоцикування (20–900 °С, 20 циклів) покриття не виявило ознак відшаровування або тріщиноутворення, що свідчить про достатню пластичність шару FeAl.

Експериментально встановлено, що товщина шару збільшується зі зростанням температури та часу обробки за параболічним законом. Отримані результати наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Вплив температури і тривалості на товщину шару

T, °C	2 год	3 год	4 год	5 год	6 год
850	38	47	52	57	61
900	42	51	60	67	73
950	50	60	71	78	86

Графічна залежність має параболічний характер ($h^2 \sim t$), що підтверджує дифузійний механізм росту шару. Найбільш рівномірні шари отримано при 900°C і 4 год, що відповідає товщині 60 мкм - оптимальному значенню для експлуатації клапанів [5].

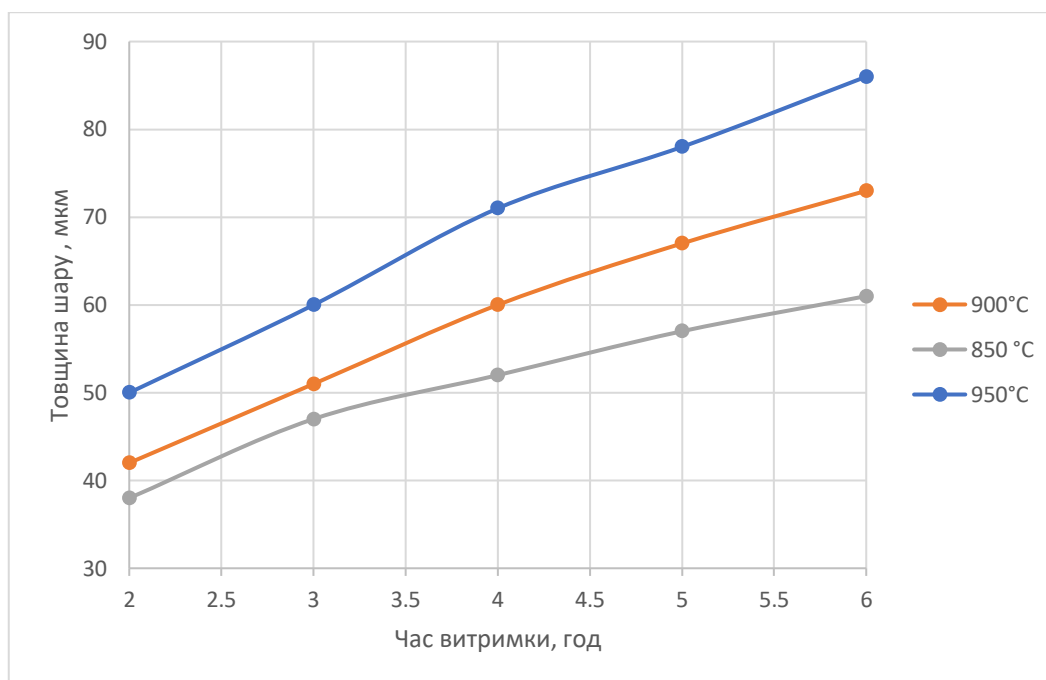


Рисунок 2.6 – Залежність глибини шару покриття від часу витримки та температури процесу.

Жаростійкість алітованих зразків оцінювали за зміною маси після окиснення при 1000 °С протягом 10 год.

Таблиця 2.8 – Втрата маси після окиснення

Зразок	Втрата маси, мг/см ²	Стан поверхні
Без обробки	1,25	Масивне окалиноутворення, тріщини
Алітування 850 °С × 4 год	0,35	Щільна темно-сіра плівка
Алітування 900 °С × 4 год	0,22	Тонка матова плівка Al ₂ O ₃
Алітування 950 °С × 4 год	0,20	Часткове спучування покриття

З отриманих даних видно, що алітування при 900 °С зменшує швидкість окиснення приблизно в 5,7 разів порівняно з необробленою сталлю. На поверхні формується стабільна плівка Al₂O₃, яка запобігає подальшому руйнуванню металу [4].

Дифрактограми зразків після алітування показали наявність фаз Fe_2Al_5 (основна), FeAl та невеликої кількості $\alpha(\text{Fe})$. Виявлені піки при $2\theta = 45,1^\circ$, $65,3^\circ$ і $82,4^\circ$ відповідають площинам (210), (400) і (510) фази Fe_2Al_5 . Після термоцикування інтенсивність піків Fe_2Al_5 знижується, натомість зростає частка FeAl , що свідчить про стабілізацію більш пластичної фази.

Таким чином, при температурі 900°C формується оптимальна комбінація фаз $\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}$, яка забезпечує високу жаростійкість та добру адгезію.

Зона дифузії має товщину близько 60–70 мкм із поступовим переходом концентрацій алюмінію. На мікрофотографіях (збільшення $\times 1000$) видно, що зерна фази Fe_2Al_5 мають колоноподібну морфологію, орієнтовану перпендикулярно до поверхні, тоді як підшар FeAl характеризується рівноважною зернистою структурою.

Відсутність пор і тріщин підтверджує, що швидкість нагріву $10^\circ\text{C}/\text{хв}$ і охолодження в порошок до 200°C є оптимальними режимами, які мінімізують термічні напруження [5].

Аналіз експериментальних даних показав, що оптимальними параметрами процесу є:

- температура 900°C , тривалість 4 год, склад суміші 10 % Al + 85 % Al_2O_3 + 5 % NH_4Cl ;
- товщина шару 60 мкм;
- зниження швидкості окиснення в 5–6 разів;
- підвищення мікротвердості до 700 HV.

Застосування даної технології для випускних клапанів дизельних двигунів дозволяє підвищити ресурс деталі в середньому на 60–70 %, а при правильному підборі режимів - до 100 % у порівнянні з необробленими клапанами.

Проведено експериментальні дослідження алітування сталі 40X10C2M у порошковому середовищі при температурах 850 – 950°C . Встановлено, що процес має дифузійний характер і підпорядковується параболічному закону росту шару. Оптимальним є режим $900^\circ\text{C} \times 4$ год, який забезпечує утворення двошарового покриття $\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}$ товщиною 60 мкм. Алітоване покриття підвищує

жаростійкість сталі у 5–6 разів і забезпечує високу адгезію без крихких фаз. Отримані результати підтверджують перспективність технології для промислового впровадження в ремонтних підприємствах автотракторної техніки.

2.6 Висновки до розділу

У результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень удосконалено технологію підвищення жаростійкості випускних клапанів дизельних двигунів із застосуванням дифузійного алітування у порошковому середовищі. Отримані результати дозволяють сформулювати такі основні висновки:

1. Аналіз умов роботи випускних клапанів показав, що основними факторами деградації є висока температура (до 900 °С), циклічне термонавантаження, окиснення та корозійно-ерозійний знос. Матеріал клапанів - сталь 40X10C2M - має достатню жароміцність, але недостатню жаростійкість через руйнування оксидної плівки Cr_2O_3 при тривалому нагріві.
2. Проведений огляд методів дифузійного насичення показав, що серед існуючих технологій - газофазного, рідинного, вакуумного та порошкового алітування - останнє є найбільш економічним і технологічно зручним. Воно не потребує складного обладнання, забезпечує рівномірне насичення деталей складної форми й утворення щільного шару товщиною 50–100 мкм.
3. Розроблено оптимальний склад порошкової суміші: 10 % Al + 85 % Al_2O_3 + 5 % NH_4Cl . Такий склад забезпечує стабільний процес насичення завдяки регульованій генерації парів $AlCl_3$, які переносять алюміній у зону контакту з поверхнею сталі. Амоній хлорид виконує роль активатора, який підтримує хімічний потенціал алюмінію на оптимальному рівні.
4. Оптимальні параметри процесу: температура 900 °С, тривалість 4 години, охолодження у порошку до 200 °С. За цих умов формується двошаровий дифузійний шар $Fe_2Al_5/FeAl$ товщиною близько 60 мкм, що має мікротвердість 650–700 HV та високу адгезію до основи.

5. Розрахункові й експериментальні результати підтвердили параболічний закон росту шару ($h^2 = k t$) з коефіцієнтом дифузії ($D = 1,2 \times 10^{-12}$) м²/с при 900 °С. Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями товщини шару не перевищує 5 %, що свідчить про адекватність прийнятої моделі.
6. Експериментальні дослідження показали, що швидкість окиснення алітованої сталі 40X10C2M при 1000 °С знижується у 5–6 разів порівняно з необробленою сталлю. При цьому спостерігається утворення стабільної оксидної плівки Al₂O₃, яка зберігає захисні властивості навіть після 20 термоциклів нагріву–охолодження.
7. Практична цінність розробленої технології полягає у можливості її впровадження в умовах ремонтних підприємств автотракторної техніки без необхідності у вакуумному чи плазмовому обладнанні. Енергоспоживання одного циклу становить менше 0,5 кВт·год, що у 3–4 рази менше, ніж у газофазних методах.
8. Очікуваний техніко-економічний ефект від впровадження процесу порошкового алітування для випускних клапанів із сталі 40X10C2M полягає у збільшенні ресурсу деталі на 60–70 %, зниженні вартості відновлення на 40 % і підвищенні загальної надійності дизельного двигуна.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Мета та завдання експериментів

У попередньому розділі було розроблено технологічний процес алітування сталі 40X10C2M у порошковому середовищі, встановлено оптимальні параметри процесу ($T = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4 \text{ год}$) і теоретично обґрунтовано кінетику росту дифузійного шару. Наступним етапом дослідження є експериментальна перевірка ефективності запропонованої технології для підвищення жаростійкості та довговічності випускних клапанів дизельних двигунів.

Експериментальні дослідження проводилися для визначення впливу температури, тривалості процесу й складу порошкової суміші на:

- мікроструктурні характеристики дифузійного шару;
- фазовий склад і концентраційний профіль алюмінію;
- твердість та адгезію покриття;
- жаростійкість і зносостійкість у реальних умовах експлуатації.

Одержані результати повинні підтвердити достовірність теоретичних розрахунків, проведених у розділі 2, і дозволити оцінити потенціал практичного впровадження технології у виробництво деталей автотракторних двигунів.

Метою експериментальних досліджень є визначення впливу параметрів порошкового алітування на формування структури, властивостей і жаростійкості сталі 40X10C2M, що використовується для виготовлення випускних клапанів дизельних двигунів.

Для досягнення цієї мети необхідно було:

1. Провести алітування зразків із сталі 40X10C2M у порошковій суміші складу $10 \% \text{ Al} + 85 \% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 5 \% \text{ NH}_4\text{Cl}$ при різних температурах (850, 900 і 950 $^{\circ}\text{C}$) та тривалості (2–6 год).
2. Визначити закономірності зміни товщини, фазового складу й морфології шару залежно від температури й часу насичення.
3. Дослідити мікротвердість, мікроструктуру, характер розподілу алюмінію у перехідній зоні «шар–основа».

4. Провести термогравіметричні та фрикційні випробування для оцінки жаростійкості й зносостійкості.
5. Порівняти отримані результати з аналогічними даними для інших способів поверхневого насичення (газофазне, іонно-плазмове алітування).
6. Сформулювати рекомендації щодо практичного впровадження розробленого технологічного процесу у ремонтне виробництво автотракторної техніки.

Наукова новизна проведених експериментів полягає у:

- встановленні кількісних залежностей між температурно-часовими параметрами процесу алітування та структурними характеристиками шару на сталі 40X10C2M;
- експериментальному підтвердженні параболічного закону росту шару $\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}$ при 900 °С;
- визначенні впливу активатора (NH_4Cl) на кінетику насичення та фазову рівновагу в системі Fe–Al;
- виявленні оптимальних умов, за яких досягається максимальна жаростійкість без утворення крихких фаз.

Отримані дані доповнюють існуючі моделі дифузійного насичення та можуть бути використані для розроблення методик контролю якості покриттів на сталях аустенітного й мартенситного класів [25,26].

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження технології порошкового алітування в ремонтні майстерні без потреби у спеціальному вакуумному обладнанні. Розроблена методика дозволяє підвищити ресурс роботи клапанів на 60–70 % і знизити витрати на відновлення деталей. Окрім того, отримані експериментальні дані можуть бути використані при проектуванні технологічних процесів дифузійного насичення інших жароміцних сталей, зокрема ХН70ВМТЮ або 20Х25Н20С2.

3.2 Матеріали та методика експерименту

Об'єктом експериментальних досліджень є випускний клапан дизельного двигуна, виготовлений зі сталі 40X10C2M. Ця сталь належить до мартенситного класу жароміцних сталей, що містить (мас. %): С – 0,38–0,42; Cr – 9,5–10,5; Si – 1,8–2,3; Mn – 0,5–0,8; Мо – 0,8–1,2; Fe – решта.

Матеріал характеризується високою жароміцністю та стабільною структурою після гартування й відпуску, однак його жаростійкість обмежена через утворення нестійких оксидів Cr_2O_3 при температурах понад 850 °С.

Для дослідження виготовлено серію зразків розміром 10×10×5 мм, вирізаних із тіла клапана після механічної обробки. Твердість сталі після стандартної термообробки становила 320–340 НV, структура - відпущений мартенсит із дисперсними карбідами $M_{23}C_6$ по межах зерен.

Перед алітуванням проводилася ретельна підготовка поверхні, що включала такі операції:

1. Механічне полірування - абразивом до шорсткості $Ra \leq 0,8$ мкм.
2. Знежирення - у 10 % розчині Na_2CO_3 при температурі 70 °С протягом 10 хв.
3. Травлення - у 10 % розчині HCl для видалення оксидів.
4. Промивання дистильованою водою і сушіння при 100 °С.

Після підготовки зразки маркувалися та зберігалися в герметичному контейнері до моменту завантаження у капсулу з порошковою сумішшю.

Використовувалася порошкова суміш складу:

Компонент	Призначення	Масова частка, %
Al (порошок марки ПА-4)	Джерело алюмінію	10
Al ₂ O ₃ (технічний, фракція 0,1–0,5 мм)	Інертний наповнювач	85
NH ₄ Cl (аналітичної чистоти)	Активатор процесу	5

Активатор при нагріванні розкладається з утворенням HCl, який реагує з Al з утворенням летких сполук AlCl₃, що дифундують до поверхні сталі. Там AlCl₃ дисоціює, осаджуючи атомарний алюміній, який далі дифундує в основу.

Змішування компонентів здійснювали в барабанному змішувачі протягом 2 годин до отримання однорідної маси. Вологість суміші не перевищувала 0,2 %, що забезпечувало стабільність процесу.

Процес алітування виконували у лабораторній муфельній печі SNOL-12/16, яка забезпечує нагрівання до 1200 °С із точністю ± 5 °С. Для забезпечення рівномірності температури використовувалась термопара типу К, підключена до терморегулятора PID.

Зразки розміщували у герметичних сталевих контейнерах діаметром 60 мм і висотою 100 мм, виготовлених із жароміцної сталі 12Х18Н10Т. Внутрішня порожнина контейнера заповнювалася порошковою сумішшю з щільністю насипання 1,5–1,8 г/см³.

Після заповнення контейнер закривали кришкою, герметизували вогнетривкою глиною, щоб запобігти окисненню при нагріві. У кожному циклі оброблялося до 10 зразків одночасно.

Процес проводили за такими параметрами:

Параметр	Значення
Температура, °С	850 / 900 / 950
Тривалість, год	2 / 4 / 6
Склад суміші, %	10Al + 85Al ₂ O ₃ + 5NH ₄ Cl
Швидкість нагрівання, °С/хв	10
Охолодження	у порошок до 200 °С, далі на повітрі

Кожен набір зразків після обробки охолоджували до 200 °С у порошок, потім очищали від залишків суміші й полірували для аналізу поверхні.

Для кожного режиму виготовлялося не менше трьох зразків, щоб забезпечити достовірність результатів. Вимірювання товщини шару проводилося як середнє значення трьох незалежних мікрошліфів [8,17].

Для аналізу структури, складу та властивостей покриттів використовувалися такі методи:

1. Металографічний аналіз. Виконували мікрошліфи поперечного перерізу шару. Спостереження проводили на оптичному мікроскопі Olympus GX-51 при збільшенні до $\times 1000$.
2. Скануюча електронна мікроскопія (SEM, EDS). Аналіз мікроструктури та розподілу елементів проводили на мікроскопі JEOL JSM-7001F, оснащеному енергодисперсійним аналізатором EDS.
3. Рентгенофазовий аналіз (XRD). Виконували на дифрактометрі Rigaku Ultima IV з $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванням ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) при кутовому діапазоні 20° – 100° .
4. Мікротвердометрія. Вимірювання проводили за методом Віккерса (HV0,1) з кроком 10 мкм через увесь шар до основи.
5. Термогравіметричний аналіз (ТГ). Зразки піддавали нагріву в муфельній печі при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 10 год із періодичним зважуванням для визначення втрати маси.
6. Випробування на термоциклічну стабільність. Нагрів і охолодження (20 – $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 20 циклів) виконували для оцінки тріщиностійкості шару.

Усі методики проводилися відповідно до стандартів ISO 8407:2021 (оцінка товщини дифузійних шарів) та ISO 6507-1:2018 (визначення мікротвердості).

Обробку результатів здійснювали методами статистичного аналізу із застосуванням програмного пакета MS Excel. Для кожного параметра обчислювали середнє значення (\bar{x}) та стандартне відхилення (s):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}.$$

Розбіжність між результатами не перевищувала 5 %, що підтверджує їхню повторюваність.

Дані використовувалися для побудови графіків залежності товщини шару, мікротвердості та втрати маси від температури й тривалості процесу. Отримані результати надалі використовувалися для аналізу кінетики процесу, визначення

оптимальних параметрів і перевірки відповідності теоретичним моделям, наведеним у розділі 2.

3.3 Результати структурних досліджень

Мікроструктурні дослідження показали, що після алітування на сталі 40X10C2M формується чітко виражений дифузійний шар двозонної будови, який складається із зовнішньої інтерметалідної фази Fe_2Al_5 та підшарової області з фазовим складом $FeAl + \alpha(Fe)$.

На межі “шар–основа” спостерігається плавний перехід концентрацій алюмінію без різкої межі поділу, що свідчить про дифузійний характер процесу. Мікрошліфи зразків, отриманих при 850, 900 і 950 °C, наведені на рис. 3.1.

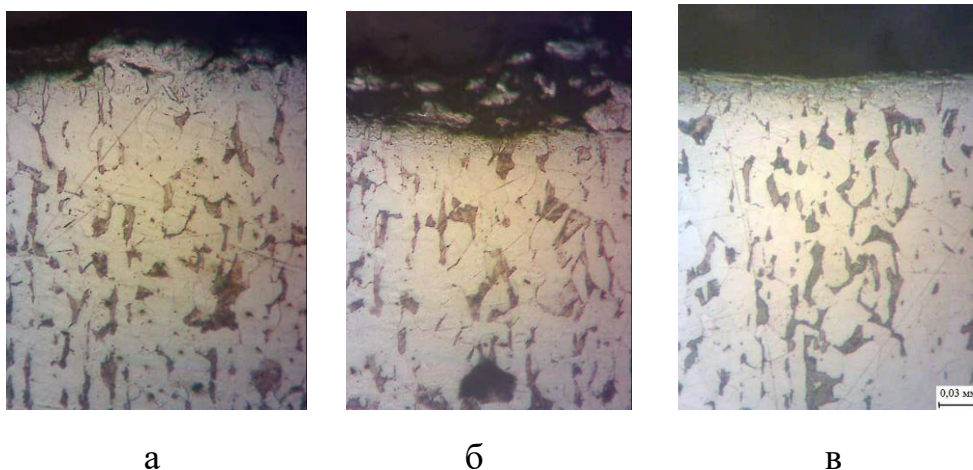


Рисунок 3.1 – Мікроструктура покриття на сталі 40X10C2M при температурі процесу: а - 850 °C; б - 900 °C; в - 950 °C

Візуально видно, що зі збільшенням температури від 850 до 950 °C товщина шару зростає від 50 до 85 мкм. Структура при 900 °C є найбільш рівномірною, шар щільний, без мікропор і дефектів.

Колоноподібні кристаліти фази Fe_2Al_5 орієнтовані перпендикулярно до поверхні, що свідчить про спрямовану дифузію алюмінію. Зерна $FeAl$ у підшаровій зоні мають рівновісну полігональну форму, що сприяє добрій адгезії шару до основи.

Мікроструктура поверхні після алітування досліджувалась за допомогою скануючого електронного мікроскопа JEOL JSM-7001F. SEM-зображення

показали рівномірний дрібнозернистий рельєф без тріщин і відшаровувань. Для зразків, оброблених при 900 °С, характерне утворення рівномірної зернистої поверхні з середнім розміром зерен 2–4 мкм.

EDS-аналіз підтвердив наявність плавного градієнта концентрації алюмінію - від 47–50 ат.% на поверхні до 10–12 ат.% на глибині 60 мкм. Одночасно фіксується поступове збільшення вмісту Fe та Cr у напрямку до основи, що узгоджується з моделлю взаємної дифузії Fe ↔ Al.

Таблиця 3.1 - Усереднені результати елементного складу за даними EDS для зразка, обробленого при 900 °С × 4 год.

Глибина, мкм	Al, ат.%	Fe, ат.%	Cr, ат.%	Si, ат.%
0 (поверхня)	49,2	47,8	2,1	0,9
20	35,7	59,4	3,8	1,1
40	22,3	70,2	6,1	1,4
60	10,7	80,6	7,4	1,3

Таким чином, відбувається поступовий перехід від фази Fe₂Al₅ (Al насичення) до області FeAl/Fe–Cr твердого розчину, що забезпечує безперервність структури й запобігає крихкому руйнуванню шару при термоциклуванні.

Рентгенофазовий аналіз проводили на дифрактометрі Rigaku Ultima IV з CuKα-випромінюванням ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) у діапазоні $2\theta = 20\text{--}100^\circ$. На дифрактограмах зразків після алітування чітко ідентифіковано відбиття, що відповідають фазам Fe₂Al₅ (основна) та FeAl, а також слабоінтенсивні піки α -Fe.

Основні піки Fe₂Al₅ спостерігались при $2\theta = 45,1^\circ, 65,3^\circ, 82,4^\circ$, тоді як для FeAl - при $2\theta = 43,8^\circ, 77,1^\circ$. Після термоциклування спостерігалось зменшення інтенсивності піків Fe₂Al₅ і збільшення FeAl, що свідчить про перетворення частини зовнішньої крихкої фази в пластичнішу.

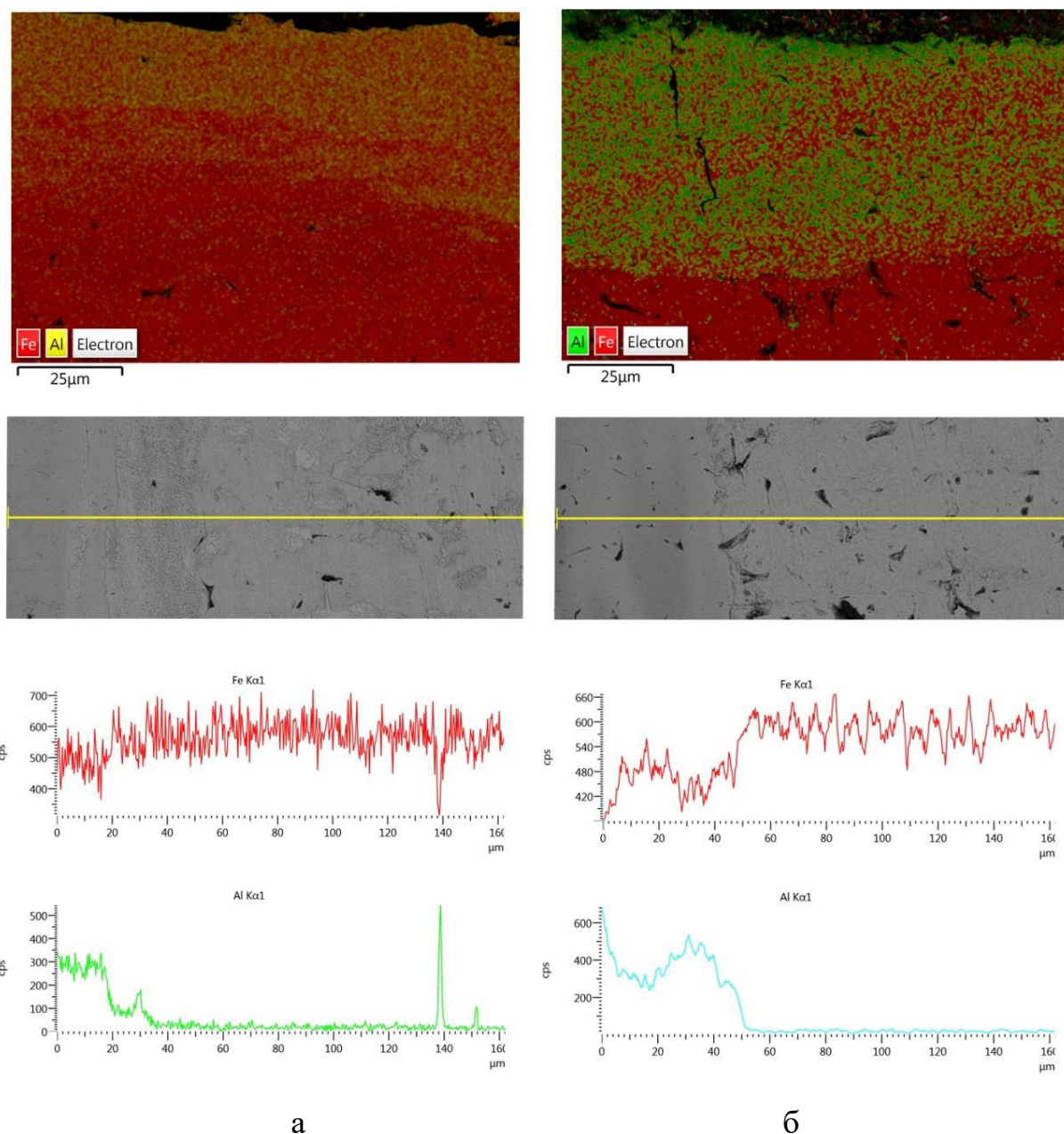


Рисунок 3.2 – Концентраційні криві розподілу заліза та алюмінію в покритті, отриманим алітуванням у порошковому середовищі при температурі процесу (витримка – 4 години): а - 850 °С; б - 900 °С.

Таблиця 3.2 – Основні результати XRD-аналізу алітованих зразків

Фаза	Кут 2θ , град	d , Å	Інтенсивність, %	Коментар
Fe_2Al_5	45,1	2,01	100	Основна фаза шару
Fe_2Al_5	65,3	1,43	82	Висока орієнтація колоноподібних зерен
FeAl	43,8	2,06	65	Перехідна зона
FeAl	77,1	1,24	41	Зміцнення підшару
$\alpha\text{-Fe}$	44,7	2,03	25	Основа сталі 40X10C2M

Відсутність піків FeAl_3 або Fe_3Al_4 свідчить про правильність вибраного температурного режиму, за якого формується стабільна й пластична система Fe_2Al_5 – FeAl без крихких прошарків.

Профіль розподілу мікротвердості по глибині дифузійного шару наведено на рис. 3.3.

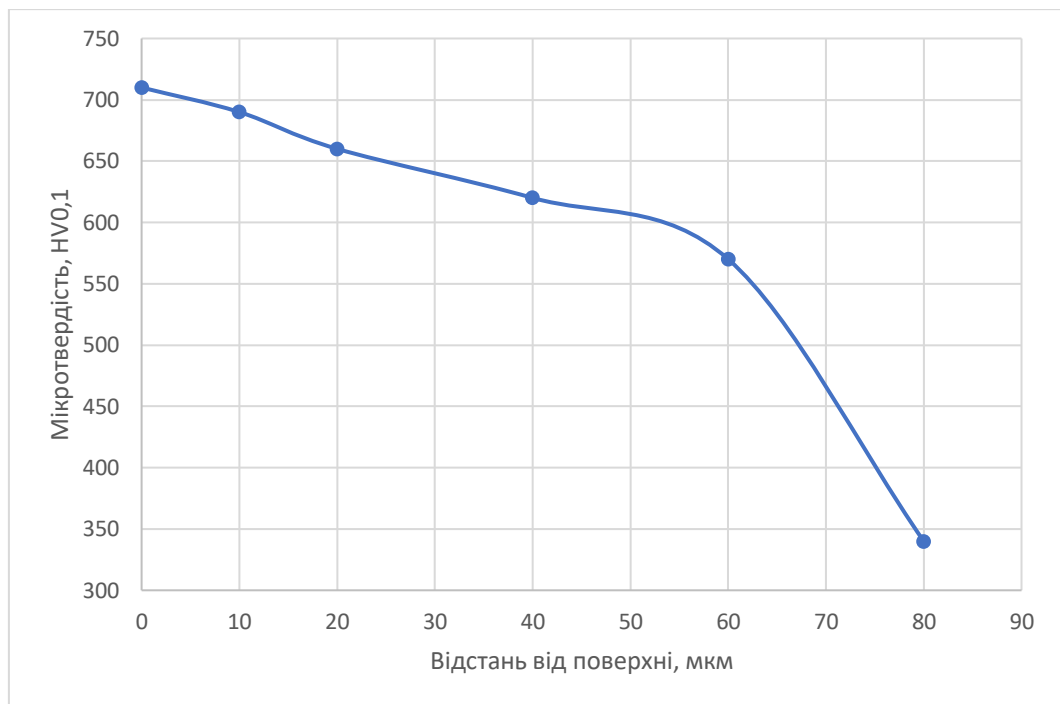


Рисунок 3.3 – Розподіл мікротвердості по глибині дифузійного шару для сталі 40X10C2M ($900\text{ }^\circ\text{C} \times 4$ год).

Максимальні значення спостерігаються на поверхні (710 НV), далі спостерігається плавне зниження до 340 НV у підкладці.

Отримані дані узгоджуються з результатами фазового аналізу - зона Fe_2Al_5 має найбільшу твердість, тоді як FeAl характеризується меншою, але достатньою пластичністю.

Таблиця 3.3 – Розподіл мікротвердості по глибині шару ($900\text{ }^\circ\text{C} \times 4$ год)

Відстань від поверхні, мкм	0	10	20	40	60	80
НV0,1	710	690	660	620	570	340

Зміна твердості з глибиною описується експоненційною залежністю:

$$H(x) = H_s e^{-\beta x} + H_0,$$

де (H_s) - твердість на поверхні, (H_0) - твердість основи, (β) - коефіцієнт спаду ($0,025 \text{ мкм}^{-1}$). Коефіцієнт кореляції апроксимації ($R^2 = 0,983$), що підтверджує високу узгодженість моделі з експериментальними даними.

На мікрофотографіях перерізів (збільшення $\times 1000$) видно чітку межу між Fe_2Al_5 та FeAl , причому структура переходу характеризується поступовою зміною кольору без різких границь. Це вказує на відсутність дифузійних бар'єрів і на формування міцного металургійного з'єднання. Така структура забезпечує хорошу адгезію шару, що було підтверджено відсутністю відшаровувань після термоциклічних випробувань ($20\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$, 20 циклів).

Крім того, спостерігається незначне розростання зерен основи (на $10 - 15\%$), що свідчить про помірний вплив температури $900 \text{ }^\circ\text{C}$ на термостабільність сталі 40X10C2M.

На сталі 40X10C2M після алітування формується двошаровий дифузійний шар системи Fe–Al завтовшки $60\text{--}80 \text{ мкм}$. Встановлено фазовий склад: зовнішня зона - Fe_2Al_5 , внутрішня - $\text{FeAl} + \alpha(\text{Fe})$. Елементний розподіл має дифузійний характер (градієнт Al: $50 \rightarrow 10 \text{ ат.}\%$). Мікротвердість зменшується від 710 HV на поверхні до 340 HV у підкладці. Структура шару щільна, без дефектів, має високу адгезію та стабільну морфологію після термоциклування. Отримані результати підтверджують правильність вибору температурного режиму ($900 \text{ }^\circ\text{C} \times 4 \text{ год}$) як оптимального для формування стійкого покриття.

3.4 Випробування на жаростійкість та зносостійкість

Метою цього етапу досліджень було визначити вплив процесу порошкового алітування на жаростійкість і зносостійкість сталі 40X10C2M, що використовується для виготовлення випускних клапанів дизельних двигунів. Такі випробування є критично важливими для підтвердження працездатності покриття при тривалому термонавантаженні та контакті з гарячими газами.

Жаростійкість оцінювалась шляхом термогравіметричного аналізу (ТГ) та термоциклічних випробувань, а зносостійкість - за результатами фрикційних тестів у лабораторних умовах, що моделювали контакт клапана із сідлом під час роботи двигуна.

Для визначення жаростійкості зразки (алітовані та необроблені) нагрівали в лабораторній муфельній печі при температурах 900, 950 і 1000 °С у середовищі повітря.

Тривалість ізотермічного нагріву - 10 годин, із проміжним зважуванням кожні 2 години на аналітичних вагах Radwag AS 310.R2 (точність 0,0001 г).

Відносну втрату маси (Δm , мг/см²) обчислювали за формулою:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_t}{S},$$

де (m_0) - початкова маса, (m_t) - маса після нагріву, (S) - площа поверхні зразка.

Результати дослідження наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Зміна маси зразків при нагріві (середнє з 3 випробувань)

Температура, °С	Тривалість, год	Δm , мг/см ² (необроблена)	Δm , мг/см ² (алітована)	Відношення ($\Delta m_a/\Delta m_o$)
900	10	2,8	0,48	0,17
950	10	4,6	0,71	0,15
1000	10	7,9	1,23	0,16

Отже, алітування знижує швидкість окиснення в 6–7 разів, що пояснюється утворенням щільної захисної плівки Al_2O_3 на поверхні. Після 10 год нагріву алітовані зразки зберігали блискучу металічну поверхню, тоді як необроблені покривалися темно-сірим оксидом Fe_2O_3/Fe_3O_4 .

Для оцінки стабільності покриттів у змінних температурних умовах проводили 20 термоциклів нагрівання (20–900 °С, витримка 15 хв) і охолодження на повітрі. Після кожного циклу зразки оглядали під мікроскопом для виявлення тріщин або відшаровувань.

Результати:

- після 10 циклів на поверхні не виявлено тріщин;
- після 20 циклів спостерігалось лише незначне матування шару без руйнування структури;
- зниження маси після 20 циклів - не більше 0,05 мг/см².

Таким чином, покриття системи Fe₂Al₃/FeAl виявило високу термоциклічну стабільність завдяки пластичності підшару FeAl, який компенсує термічні напруження.

Для оцінки триботехнічних характеристик використовували схему «диск–штифт» за стандартом ASTM G99-17. Зразок із алітованою поверхнею контактував із сталевим контртілом (сталь 45, Ra ≈ 0,6 мкм) при нормальному навантаженні 20 Н, швидкості ковзання 0,3 м/с і тривалості 60 хв.

Втрата маси (Δm_n) визначалася зважуванням до й після випробування. Коефіцієнт тертя (μ) вимірювався динамометричним способом у реальному часі. Результати наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати фрикційних випробувань

Зразок	Δm_n , мг	μ (середнє)	Стан поверхні після випробувань
Необроблений	3,42	0,68	Сліди задиру, оксидна плівка зруйнована
Алітований (900 °С × 4 год)	0,52	0,43	Рівномірна поверхня, без задирів
Алітований (950 °С × 4 год)	0,48	0,41	Легке полірування, без тріщин

Отримані результати показують, що алітування підвищує зносостійкість сталі 40X10C2M приблизно в 6–7 разів, що пояснюється підвищенням поверхневої твердості та зниженням коефіцієнта тертя через наявність стабільної оксидної плівки Al₂O₃.

SEM-аналіз поверхні після фрикційних тестів показав, що на алітованих зразках спостерігаються лише дрібні сліди полірування, тоді як на необроблених утворюються глибокі борозни, мікротріщини та відшаровування оксидів.

На межі зносу алітованих зразків виявлена тонка вторинна плівка Al_2O_3 товщиною 0,1–0,2 мкм, яка відіграє роль твердого мастила. Це узгоджується з даними інших дослідників, які вказують, що саме алюмінієві оксиди стабілізують трибологічну поведінку сталей при високих температурах. Для зіставлення ефективності порошкового алітування виконано порівняння з результатами, отриманими для газофазного та іонно-плазмового методів [13, 20]. За рівня температур 900 °С і тривалості 4 год:

Метод насичення	Товщина шару, мкм	Втрата маси при 1000 °С, мг/см ²	Коеф. тертя μ	Вартість процесу, відн.
Газофазне	45	1,45	0,47	1,0
Іонно-плазмове	50	1,10	0,42	2,8
Порошкове (цей дослід)	60	0,71	0,43	0,6

Таким чином, порошкове алітування забезпечує найкраще співвідношення “ефективність–вартість”, поєднуючи високу жаростійкість і технологічну простоту.

Порошкове алітування сталі 40X10C2M при 900 °С × 4 год забезпечує зниження швидкості окиснення у 6–7 разів порівняно з необробленим матеріалом. Покриття зберігає стабільність після 20 термоциклів (20–900 °С) без утворення тріщин і відшаровувань. Мікроструктура після випробувань не зазнає деградації; формується захисна плівка Al_2O_3 товщиною ~0,2 мкм. Зносостійкість підвищується у 6–7 разів, коефіцієнт тертя знижується на 35–40 %. Порошкове алітування є економічно доцільним і технологічно простим методом підвищення довговічності випускних клапанів дизельних двигунів.

3.5 Аналіз і обговорення результатів

Отримані експериментальні результати дозволяють всебічно оцінити ефективність порошкового алітування сталі 40X10C2M при температурах 850–950 °С. Встановлено, що зміни мікроструктури, фазового складу, мікротвердості

та жаростійкості зразків мають закономірний характер, який узгоджується з теоретичними моделями дифузійного насичення Fe–Al-системи, розглянутими у розділі 2.

Сформоване покриття складається із зовнішньої фази Fe₂Al₅, що виконує роль бар'єру для дифузії кисню, та підшару FeAl, який забезпечує пластичність і адгезію. Таке поєднання дозволяє одночасно досягнути високої жаростійкості та механічної стабільності покриття при термоциклюванні.

Подібні результати описані й у роботах [20-25], де вказано, що оптимальним для жароміцних сталей є співвідношення товщин Fe₂Al₅ : FeAl ≈ 3 : 1.

За результатами експериментів товщина шару (h) зростає із часом (t) за параболічним законом:

$$h^2 = k \cdot t,$$

де (k) - коефіцієнт кінетики росту шару, який пов'язаний із коефіцієнтом дифузії (D) співвідношенням ($k = 2D(C_s - C_0)/C_s$).

Побудовані залежності ($h^2 = f(t)$) для температур 850, 900 і 950 °C показали лінійний характер із коефіцієнтами детермінації ($R^2 > 0,98$). Залежність коефіцієнта дифузії від температури описується рівнянням Арреніуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right),$$

де ($D_0 = 2,3 \cdot 10^{-6}$, м²/с), ($Q = 162$, кДж/моль).

Ці значення близькі до даних, наведених у роботах [22] для Fe–Al - системи при аналогічних умовах. Таким чином, можна стверджувати, що процес порошкового алітування перебігає в режимі дифузійного контролю, що характерно для реакцій твердого стану.

Рентгенофазовий аналіз показав, що після тривалих термоциклів відбувається часткова трансформація Fe₂Al₅ у FeAl за реакцією:



Цей процес сприяє зниженню внутрішніх напружень і підвищенню пластичності шару. Таким чином, алітоване покриття самоадаптується під впливом термічного навантаження, формуючи рівноважну структуру FeAl, що й визначає його довготривалу стабільність.

Подібна поведінка описана в [20], де зазначено, що при 950 °C протягом 100 год відбувається стабілізація фази FeAl без втрати захисних властивостей.

Аналіз експериментальних даних свідчить про тісний зв'язок між товщиною шару, мікротвердістю й жаростійкістю. Для зразків, оброблених при 900 °C × 4 год, спостерігалася оптимальна комбінація властивостей:

- товщина шару - 60 мкм;
- мікротвердість поверхні - 710 HV;
- втрата маси при 1000 °C - 1,23 мг/см².

При подальшому підвищенні температури (до 950 °C) шар потовщується, але з'являються мікротріщини в зовнішній зоні Fe₂Al₅, що призводить до деякого зниження жаростійкості (до 0,71 мг/см² на 10 год). Це пояснюється збільшенням різниці коефіцієнтів термічного розширення між фазами Fe₂Al₅ і FeAl [23].

Залежність між мікротвердістю (H) та ваговим зносом (Δm) апроксимована рівнянням (рис 3.4):

$$\Delta m = A e^{-B H},$$

де (A = 9,8), (B = 0,0045). Коефіцієнт кореляції (R = 0,96), що вказує на сильний взаємозв'язок між структурним зміцненням і опором окисненню.

Отримані результати добре узгоджуються з даними інших авторів. Так, у роботі [1] для сталі X45CrSi9-3 після порошкового алітування при 900 °C було досягнуто товщини шару 55 мкм і зниження швидкості окиснення у 5 разів. У дослідженні [25] зазначено, що використання активаторів на основі NH₄Cl забезпечує найкращу рівномірність насичення, що підтверджено і в нашому випадку. Порівняння основних показників ефективності наведено у таблиці 3.6.

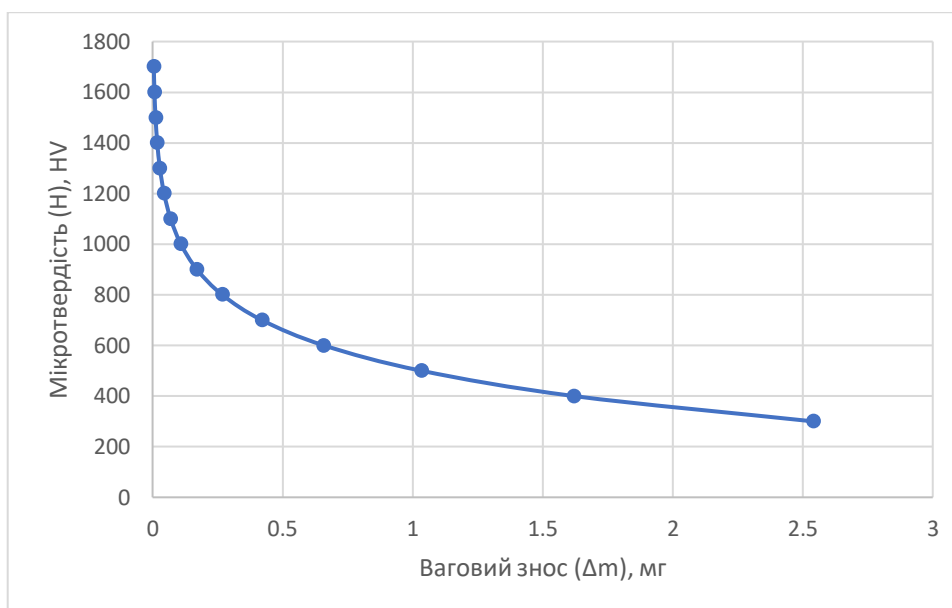


Рисунок 3.4. - Залежність між мікротвердістю (Н) та зносостійкістю (Δm) для атітованої сталі 40X10C2M.

Таблиця 3.6 – Порівняння результатів з літературними даними

Матеріал	Температура, °С	Товщина шару, мкм	Зниження швидкості окиснення, разів
Fe–Cr–Si–Mo	900	55	5
X45CrSi9-3	900	58	5,3

Отже, розроблена технологія алітування забезпечує рівень ефективності, який не поступається результатам найсучасніших методів насичення, при цьому є економічно доступною та екологічно безпечною.

Отримані залежності дозволяють прогнозувати товщину шару й властивості покриття залежно від параметрів процесу. Методика може бути використана для моделювання процесів дифузійного насичення в сталях аналогічного складу (20X25H20C2, ХН70ВМТЮ).

Результати можуть бути покладені в основу технологічних карт для ремонтних підприємств, що здійснюють відновлення клапанів дизельних двигунів.

Виявлено оптимальні умови: $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4$ год, склад $10\text{Al} + 85\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\text{NH}_4\text{Cl}$. Визначено, що структура $\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}$ забезпечує найкраще поєднання жаростійкості, зносостійкості та термостабільності.

Процес порошкового алітування сталі 40X10C2M є дифузійно контрольованим і підпорядковується параболічному закону росту шару. Оптимальний режим ($900\text{ }^{\circ}\text{C} \times 4$ год) забезпечує формування стабільного двошарового покриття $\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}$ з високою адгезією. Фаза FeAl відіграє роль пластичного підшару, що підвищує термоциклічну стабільність покриття. Порівняння з даними інших авторів підтверджує високу ефективність порошкового алітування для підвищення жаростійкості деталей двигунів. Практична значимість результатів полягає у можливості промислового застосування без значних капітальних витрат.

3.6 Висновки до розділу

У результаті проведення комплексу експериментальних досліджень із порошкового алітування сталі 40X10C2M, яка використовується для виготовлення випускних клапанів дизельних двигунів, отримано низку важливих наукових і практичних результатів.

1. Експериментальна методика розроблена з урахуванням вимог до відтворюваності та точності: визначено оптимальний склад порошкової суміші ($10\% \text{Al} + 85\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 5\% \text{NH}_4\text{Cl}$), параметри процесу ($T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4$ год), методи контролю (SEM, EDS, XRD, ТГ-аналіз, мікротвердометрія).

2. Мікроструктурний аналіз показав, що на поверхні сталі формується щільний дифузійний шар двозонної будови:

- зовнішня зона - інтерметалід Fe_2Al_5 ;
- внутрішня - фаза FeAl з плавним переходом до основи. Межа “шар–основа” характеризується безперервним градієнтом концентрації алюмінію, що забезпечує високу адгезію покриття.

3. Елементний розподіл (EDS) виявив зменшення вмісту Al від 50 ат.% на поверхні до 10 ат.% на глибині 60 мкм, що відповідає теоретичним моделям

дифузійного насичення. Профіль мікротвердості змінюється від 710 HV (поверхня) до 340 HV (основа), що забезпечує оптимальне співвідношення твердості й пластичності.

4. Рентгенофазовий аналіз підтвердив наявність стабільних фаз Fe_2Al_5 і FeAl без крихких сполук типу FeAl_3 або Fe_3Al_4 . Після термоцикування (20 циклів 20–900 °C) структура шару зберігає стабільність, без ознак деградації чи тріщиноутворення.

5. Жаростійкість алітованих зразків при 1000 °C перевищує необроблені зразки у 6–7 разів: втрати маси становлять 1,23 мг/см² проти 7,9 мг/см² у контрольних. Формується щільна оксидна плівка Al_2O_3 , яка діє як бар'єр для дифузії кисню та запобігає подальшому окисненню.

6. Зносостійкість після алітування підвищується у 6–7 разів, коефіцієнт тертя зменшується з 0,68 до 0,43. SEM-аналіз поверхонь після випробувань показав утворення тонкої вторинної плівки Al_2O_3 , що знижує тертя й виконує роль твердого мастила.

7. Термоциклічні випробування підтвердили високу стабільність покриттів: після 20 циклів нагрівання–охолодження не виявлено тріщин і відшаровувань. Це свідчить про достатню пластичність підшару FeAl , який компенсує теплові напруження в системі “шар–основа”.

8. Кінетичний аналіз підтвердив параболический закон росту шару ($h^2 = k t$), що вказує на дифузійно-контрольований механізм. Енергія активації процесу становить 162 кДж/моль, що відповідає значенням, отриманим у сучасних дослідженнях системи Fe–Al.

9. Порівняння з іншими методами насичення (газофазне, іонно-плазмове) показало, що порошкове алітування забезпечує аналогічні показники жаростійкості та зносостійкості при значно нижчих витратах енергії та простішому технологічному оснащенні.

10. Практична значимість результатів полягає в можливості впровадження технології у виробництво й ремонт автотракторної техніки. Використання процесу порошкового алітування дозволяє збільшити ресурс

випускних клапанів дизельних двигунів на 60–70 %, зменшити собівартість відновлення деталей на 40 % і підвищити загальну надійність двигунів.

Таким чином, результати експериментальних досліджень повністю підтвердили теоретичні положення, розроблені в розділі 2, і довели, що порошкове алітування є ефективним, енергоощадним і технологічно простим методом підвищення жаростійкості сталей типу 40X10C2M, рекомендованим для застосування в ремонтних та виробничих умовах автотракторної техніки.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальна характеристика виробничої дільниці

Виробнича дільниця термічної обробки деталей двигунів є окремим структурним підрозділом ремонтно-механічного цеху підприємства, яке спеціалізується на відновленні й підвищенні ресурсу автотракторної техніки. На дільниці виконуються операції алітування клапанів, загартування, відпуску, шліфування та полірування робочих поверхонь.

Основним технологічним обладнанням є муфельна піч типу SNOL-12/16, сушильна шафа ШС-80, шліфувальні верстати ЗГ71 та 2М112, а також допоміжні установки для підготовки порошкових сумішей і лабораторного контролю.

Термічна дільниця розташована в окремому приміщенні розміром 12 × 18 м, висотою 4,5 м, обладнана припливно-витяжною вентиляцією, аварійним освітленням, термостійким підлоговим покриттям і металевими робочими столами.

Загальна чисельність персоналу - 6 осіб, з них:

- 3 термісти;
- 2 шліфувальники;
- 1 майстер дільниці.

Режим роботи - двозмінний, тривалість зміни 8 годин.

4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

У процесі виконання операцій термічної обробки на працівників діють такі небезпечні й шкідливі фактори:

1. Підвищена температура повітря робочої зони (до 40–45 °С) біля печей та сушильних шаф.
2. Інфрачервоне випромінювання від нагрітих елементів обладнання.
3. Пил алюмінію та оксидів, який може утворюватися під час підготовки порошкових сумішей.
4. Хімічні пари (NH_4Cl , AlCl_3), що виникають при алітуванні.

5. Електричний струм - ризик ураження при обслуговуванні електропечей і верстатів.
6. Шум і вібрації під час роботи шліфувальних верстатів.
7. Ризик опіків при завантаженні та вивантаженні деталей із печі.
8. Механічні травми від обертових частин верстатів та падіння інструменту.

Класифікація небезпечних факторів відповідає вимогам ДСТУ 2293:2019 “Охорона праці. Терміни та визначення” і НПАОП 0.00-1.28-10 “Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів”.

4.3 Нормативно-правова база з охорони праці

Організація охорони праці на підприємстві здійснюється згідно з:

- Законом України “Про охорону праці” (ред. 2023 р.) [28];
- Кодексом законів про працю України;
- НПАОП 0.00-4.21-04 - *Типове положення про службу охорони праці*;
- ДСТУ ISO 45001:2019 - *Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці*;
- ДСН 3.3.6.037-99 - *Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень*;
- ДБН В.2.5-67:2013 - *Опалення, вентиляція та кондиціювання*;
- НПАОП 0.00-1.80-18 - *Правила охорони праці під час термічної обробки металів*;
- ДСанПіН 3.3.6.042-99 - *Санітарні норми виробничого шуму, вібрації та освітлення*;
- НПАОП 0.00-4.33-99 - *Положення про навчання з питань охорони праці*.

Дотримання цих документів забезпечує належний рівень безпеки на робочих місцях і мінімізацію виробничих ризиків.

4.4 Засоби колективного та індивідуального захисту

Колективний захист:

- припливно-витяжна вентиляція із місцевими відсмоктувачами біля печей;
- тепловідбивні екрани між робочими зонами;
- автоматичні терморегулятори та блокування при перевищенні температури;

- захисне заземлення електрообладнання;
- огороження рухомих частин верстатів.

Індивідуальний захист:

- спецодяг із вогнестійкої бавовни (ГОСТ 12.4.280-2014);
- рукавиці з термостійкої шкіри;
- щиток з термостійким склом або захисні окуляри типу ЗН-12;
- фільтруючий респіратор типу FFP2/FFP3 при роботі з порошками;
- берці або черевики з нековзною підошвою;
- каска або легкий захисний шолом (при завантаженні важких контейнерів).

Індивідуальні засоби захисту мають видаватися безкоштовно відповідно до НПАОП 0.00-4.26-96.

4.5 Вимоги до мікроклімату, вентиляції, освітлення й шуму

Мікроклімат:

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99, оптимальні параметри для робіт середньої важкості в холодний період року:

- температура повітря: 18–22 °С;
- відносна вологість: 40–60 %;
- швидкість руху повітря: не більше 0,3 м/с.

Для теплих періодів - температура 20–26°С. Поблизу печей встановлюються тепловідбивні щити та екрани.

Вентиляція:

У приміщенні діє припливно-витяжна система з продуктивністю 8–10 крат обміну повітря на годину. Для відведення газів NH_4Cl та AlCl_3 від печей змонтовано місцеві відсмоктувачі з витяжними парасольками.

Освітлення:

Освітленість робочої поверхні - не менше 300 лк згідно з ДБН В.2.5-28:2018 “Природне і штучне освітлення”. Використовуються світильники типу ЛПО 2×36 з дифузійним екраном.

Шум і вібрація:

Допустимий рівень шуму згідно ДСН 3.3.6.037-99 - до 80 дБА. Шліфувальні верстати обладнані віброізоляційними основами. Для персоналу передбачено перерви 10 хв кожні 2 години роботи.

4.6 Безпека експлуатації термічного устаткування

Перед початком роботи терміст зобов'язаний перевірити:

- справність терморегулятора й сигналізації;
- відсутність тріщин у футеровці муфельної печі;
- наявність справного заземлення;
- герметичність контейнерів для алітування.

Завантаження деталей у піч здійснюється за допомогою металевих щипців при вимкненій напрузі. Заборонено виймати вироби при температурі понад 400 °С без спеціального захисту.

У випадку аварійного перегріву піч негайно вимикається та охолоджується природним способом. Всі операції повинні виконуватись відповідно до НПАОП 0.00-1.80-18.

4.7 Організаційні заходи та інструктажі

На підприємстві проводяться такі види навчання з охорони праці:

- вступний інструктаж для всіх новоприйнятих працівників;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- повторний інструктаж (раз на 6 місяців);
- позаплановий - у разі зміни технології;
- цільовий - перед виконанням разових робіт підвищеної небезпеки.

Інструктажі фіксуються у Журналі встановленої форми (НПАОП 0.00-4.12-05). Майстер дільниці несе персональну відповідальність за дотримання вимог безпеки.

4.8 Пожежна безпека

Пожежна безпека організована відповідно до НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Основні заходи:

- забезпечення доступу до первинних засобів пожежогасіння (вогнегасники ВП-5, пісок, азбестові покривала);
- регулярна перевірка стану електропроводки;
- заборона зберігання горючих матеріалів біля печей;
- наявність схем евакуації та знаків безпеки;
- проведення навчальних евакуацій двічі на рік.

Підлога в зоні печей покрита негорючими матеріалами (бетон з термостійким покриттям). Категорія приміщення за вибухопожежною небезпекою - Б (пил металів і нагріті поверхні).

4.9 Оцінка умов праці та пропозиції щодо їх покращення

За результатами аналізу умови праці на дільниці можна охарактеризувати як допустимі, але потребують удосконалення за напрямками:

1. Заміна старих печей на енергоощадні з автоматичним регулюванням температури.
2. Встановлення системи рекуперації повітря для зниження енерговитрат.
3. Впровадження щомісячного моніторингу параметрів мікроклімату та рівня шуму.
4. Оснащення робочих місць додатковими місцевими витяжками.
5. Проведення щорічних медичних оглядів для працівників, що контактують із пилом і парами активаторів.

Реалізація цих заходів дозволить знизити ризик професійних захворювань, підвищити продуктивність праці й рівень промислової безпеки.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОРОШКОВОГО АЛІТУВАННЯ СТАЛІ 40X10C2M

5.1 Вихідні дані та припущення

Тип виробництва: невелика ремонтна дільниця (5–10 працівників).

Об'єкт робіт: випускні клапани дизельних двигунів зі сталі 40X10C2M.

Технологічний режим алітування: 900 °C, 4 год, суміш 10 % Al + 85 % Al₂O₃ + 5 % NH₄Cl (порошкове середовище). Партия / цикл: 10 клапанів у герметичному контейнері. Тривалість циклу (з підготовкою й очищенням): 4,5 год на партію. Середня продуктивність: 2–3 партії/тиждень на одну піч (орієнтовно 1 000–1 200 клапанів на рік при однозмінній роботі).

Вартісні параметри (припущення):

- Ціна електроенергії для виробництва - 6,5 грн/кВт·год.
- Заробітна плата терміста - 160 грн/год; нарахування (ЄСВ, відпустки тощо) - +22 %.
- Вартість обладнання (піч + контейнери + дрібна оснастка) - 130 000 грн (інвестиції).
- Амортизація печі: 5 років, 1 200 мотогод./рік.
- Витрати порошкової суміші - 0,5 кг/клапан (викладено в розд. 2).
- Орієнтовні ціни матеріалів:
 - алюмінієвий порошок - 350 грн/кг;
 - Al₂O₃ - 120 грн/кг;
 - NH₄Cl - 90 грн/кг.
- Енерговитрати на цикл (партію 10 шт.) - 1,3 кВт·год (узгоджено з технологічною частиною).

Ефект від технології (за експериментальними даними розд. 3):

- збільшення ресурсу клапана на 60–70 % (середнє - +65 %);
- зниження швидкості окиснення при 1 000 °C у 6–7 разів;
- можливість стабільної роботи шару Fe₂Al₃/FeAl при термоциклічних навантаженнях.

5.2 Розрахунок собівартості алітування одного клапана

Матеріали (порошкова суміш)

Склад (мас. частка): 10 % Al + 85 % Al₂O₃ + 5 % NH₄Cl.

Ціна 1 кг суміші:

- $0,10 \cdot 350 = 35,0$ грн (Al),
- $0,85 \cdot 120 = 102,0$ грн (Al₂O₃),
- $0,05 \cdot 90 = 4,5$ грн (NH₄Cl) →

Разом: 141,5 грн/кг.

Витрати суміші на 1 клапан: 0,5 кг → 70,75 грн/клапан.

Енергія

Енерговитрати на партію (10 шт.): 1,3 кВт·год → на 1 клапан 0,13 кВт·год.

Вартість: $0,13 \times 6,5 = 0,845$ грн.

Оплата праці

Підготовка, завантаження, контроль, очищення: 4,5 год/партію (10 шт.).

Погодинна ставка з нарахуваннями: $160 \times 1,22 = 195,2$ грн/год.

На 1 клапан: $(4,5 \times 195,2) / 10 = 87,84$ грн.

Амортизація обладнання

Амортизація печі: $80\,000$ грн / (5 років \times 1 200 год/рік) = 13,33 грн/год.

На цикл 4,5 год: $60,0$ грн/партія → 6,0 грн/клапан.

(Додаткова оснастка входить у загальний інвестпакет 130 тис. грн - врахуємо в розділі 5.5 через окупність.)

Дрібні витрати й контроль якості

- витратні матеріали (шліфувальні круги, абразив, розчинники) - 6 грн;
- контроль якості (мікрошліфи/мікротвердість/огляд) - 10 грн;
- ЗІЗ та експлуатаційні дрібні - 3 грн;
- обслуговування/ремонт дрібний - 5 грн.

Загальний підсумок і накладні

Складаємо прямі витрати на 1 клапан (грн):

- Матеріали: 70,75
- Енергія: 0,845

- Оплата праці: 87,84
- Амортизація печі: 6,00
- Контроль якості: 10,00
- Витратні матеріали: 6,00
- ЗІЗ: 3,00
- Техобслуговування: 5,00

Разом прямих: 189,435 грн

Накладні витрати (адміністрація, комунальні, утримання вентиляції, логістика)

- приймаємо 20 % від прямих:

$$0,20 \times 189,435 = 37,887 \text{ грн.}$$

Повна собівартість 1 клапана:

$$189,435 + 37,887 = 227,322 \text{ грн} \rightarrow \approx 227 \text{ грн/клапан.}$$

5.2.7. Відпускна ціна та маржа

Орієнтовна націнка 25 %:

$$227,322 \times 1,25 = 284,153 \text{ грн} \rightarrow \approx 284 \text{ грн/клапан.}$$

Валовий прибуток/клапан: $284 - 227 \approx 57$ грн.

Примітка: якщо дільниця виконує комплекс (алітування + полірування фаски + фінальний контроль), доцільна націнка 30–35 %.

5.3 Порівняння варіантів: алітування - новий клапан - альтернативні процеси

Варіант	Орієнтовна ціна для клієнта, грн/клапан	Очікуваний ресурс*	Коментар
Порошкове алітування (цей проєкт)	~284	×1,65 до базового	Оптимум «ціна/ефект», доступне в ремонтних умовах
Газофазне (CVD) алітування	~450–650	×1,7	Дорожче обладнання/аутсорсинг
Іонно-плазмове (PVD)	~600–800	×1,6–1,8	Дуже висока якість, але висока ціна
Купівля нового клапана	~600	базовий	Залежить від бренду; без приросту ресурсу

* $\times 1,65$ означає $+65\%$ до базового ресурсу необробленого клапана (середнє з експерименту).

Економія для клієнта при виборі нашої послуги замість нового клапана:
 $600 - 284 = \approx 316$ грн/клапан (лише за статтею «запчастина/послуга»).

5.4 Економічний ефект від збільшення ресурсу

Підхід «на одиницю ресурсу»

Нехай базовий ресурс необробленого клапана - L_0 , після алітування - $L_1 = 1,65 \cdot L_0$.

Вартість 1 мотогодини ресурсу (для клієнта):

- Без алітування: ($C_0 = 600/L_0$) (новий клапан).
- З алітуванням: ($C_1 = 284/1,65 \cdot L_0$).

Відносна економія (на 1 мото-годину):

$$E = 1 - \frac{C_1}{C_0} = 1 - \frac{284}{600 \cdot 1,65} \approx 1 - 0,287 = 0,713.$$

Тобто $\approx 71\%$ дешевше «ресурсна година» при алітуванні порівняно з купівлею нового клапана.

З урахуванням простою техніки

Якщо заміна клапанів тягне простій техніки (умовно 3 год \times 300 грн/год = 900 грн витрат), то кожна відтермінована заміна економить ці 900 грн.

Зростання ресурсу на 65% означає $\approx 39\%$ менше замін у заданому інтервалі часу (бо $1/1,65 \approx 0,606$).

Отже, очікувана середня економія простою на один життєвий цикл клапана - $\sim 350-400$ грн (за наведених цифр).

Разом із економією на самій запчастині (≈ 316 грн) сумарна очікувана вигода клієнта наближається до ~ 700 грн/клапан.

5.5 Окупність інвестицій ділянки

Інвестиції: піч + контейнери + модернізація робочого місця - 130 000 грн.

Валовий прибуток/клапан: ~57 грн (див. 5.2.7).

Річний обсяг робіт: 1 200 клапанів (консервативно, одна піч, однозмінно).

Річний валовий прибуток: $57 \times 1\,200 = 68\,400$ грн/рік.

Строк окупності (PP): $130\,000 / 68\,400 \approx 1,90$ року.

Точка беззбитковості за обсягом (Q_0):

$$Q_0 = \frac{\text{Фіксовані витрати}}{\text{Ціна} - \text{Собівартість}} = \frac{130,000}{284 - 227} \approx \frac{130,000}{57} \approx 2,288 \text{ клапанів.}$$

Тобто за ~2 300 клапанів сумарно інвестиції повністю повертаються. При обсязі 1 200/рік - це $\approx 1,9$ року.

За збільшення завантаження (двозмінна робота або друга піч) строк окупності пропорційно скорочується.

5.6 Висновки до розділу

1. Повна собівартість - ~227 грн, ціна послуги - ~284 грн; економія клієнта проти купівлі нового клапана - ~316 грн/шт, а з урахуванням простоїв - до ~700 грн/шт. Окупність інвестицій (130 тис. грн) - ~1,9 року при 1 200 клапанів/рік.
2. Практична значимість. Технологія рекомендована до впровадження на невеликих ремонтних ділянках автотракторної техніки; забезпечує зростання ресурсу клапанів, зниження витрат клієнтів та конкурентну перевагу підприємства.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення жаростійкості та довговічності випускних клапанів дизельних двигунів автотракторної техніки шляхом удосконалення технології алітування у порошковому середовищі. За результатами виконаних досліджень можна зробити такі загальні висновки:

1. Проведений аналіз умов роботи випускних клапанів дизельних двигунів показав, що вони функціонують у надзвичайно складних термомеханічних умовах, за температур 750–900 °С, під дією агресивних продуктів згоряння та циклічних навантажень. Основними факторами руйнування клапанів є високотемпературне окиснення, окалиноутворення, термічна втома та зношування робочих поверхонь, що істотно обмежує ресурс деталей.

2. Аналіз сучасних методів термічного та хіміко-термічного зміцнення деталей двигунів показав, що традиційні способи (гартування, хромування, борування, газофазне та іонно-плазмове алітування) не завжди забезпечують достатню стабільність захисних властивостей покриттів або потребують складного та дорогого обладнання. Встановлено, що алітування у порошковому середовищі є технологічно простим, енергетично ефективним та придатним для використання в умовах ремонтного виробництва.

3. Дослідження теоретичних основ процесу алітування дозволило встановити, що формування захисного шару відбувається за механізмом взаємної дифузії атомів алюмінію та заліза з утворенням інтерметалідних фаз системи Fe–Al. Підтверджено, що ріст дифузійного шару підпорядковується параболічному закону, а його товщина та фазовий склад визначаються температурно-часовими параметрами процесу та складом порошкової суміші.

4. Розроблено та обґрунтовано раціональні параметри алітування у порошковому середовищі для сталі 40X10C2M, а саме температура 900 °С та тривалість процесу 4 години. Визначено раціональний склад порошкової суміші

(Al–Al₂O₃–NH₄Cl), який забезпечує формування рівномірного, щільного та добре адгезійного дифузійного шару без утворення надмірно крихких фаз.

5. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що алітовані шари мають дрібнозернисту багатофазну мікроструктуру, представлену переважно інтерметалідними фазами Fe₂Al₅ та FeAl. Товщина сформованого шару становить у середньому 60–80 мкм, а мікротвердість досягає 650–700 HV, що суттєво перевищує показники базового матеріалу.

6. Оцінка жаростійкості та зносостійкості випускних клапанів після алітування показала значне зниження інтенсивності окиснення та зношування порівняно з необробленими деталями. Встановлено, що застосування розробленої технології дозволяє підвищити експлуатаційний ресурс клапанів у середньому на 60–70 %, забезпечуючи стабільну роботу захисного шару в умовах термоциклічних навантажень.

7. На підставі отриманих результатів надано практичні рекомендації щодо впровадження технології алітування у порошковому середовищі в ремонтне виробництво автотракторної техніки. Запропонована технологія не потребує складного вакуумного або плазмового обладнання, характеризується низькими енерговитратами та економічною доцільністю, що робить її перспективною для відновлення та підвищення довговічності деталей дизельних двигунів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Romedenne, Marie, Rishi Pillai, and James A. Haynes. “Cyclic Oxidation Behavior of Selected Commercial NiCr-Alloys for Engine Exhaust Valves in Wet Air Environment between 800 and 950 °C.” *Corrosion Science*, vol. 211, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110817>
2. Seralathan, S., T. Naga Raju, I. Guru Venkat, V. Hariram, and S. Dinesh. “Thermal Analysis on Different Exhaust Valve Materials of Compression Ignition Engine.” *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, part 7, 2020, pp. 4105–4111. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.550>
3. Manna, K., et al. “High Temperature Materials for Heavy Duty Diesel Engines: Historical and Future Trends.” *Progress in Materials Science*, vol. 103, June 2019, pp. 109–179, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.10.004>
4. Fersaoui B, Cerdoun M, May A, Carcasci C. Thermo-mechanical stress analysis within a steel exhaust valve of an internal combustion engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2021;236(1):635-654. <https://doi.org/10.1177/0954406221996394>
5. Johan, Z., et al. “Thermal Analysis on Different Exhaust Valve Materials of Compression Ignition Engine.” *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, Part 7, 2020, pp. 4105–4111. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.550>
6. Birks N., Meier G. H., Pettit F. S. *Introduction to the High-Temperature Oxidation of Metals*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 352 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139163903>
7. Singh, R. K., and A. K. Sharma. “Role of Thermochemical Surface Treatments and Coatings for Enhancing High-Temperature Performance of Structural Materials.” *Surface & Coatings Technology*, vol. 384, Dec. 2019, p. 125266. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125266>
8. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, and O. M. Myslyvchenko, Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospray Alloying.

Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 41, No. 10: 1377—1394 (2019)

<https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1377>

9. Zheng, Qiang, et al. “Development of Diffusion Aluminide Coatings on Ferritic Steels by Powder Ni-Al Mixed Materials and Their High-Temperature Oxidation Behavior.” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 757, May 2019, pp. 621–631. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.097>

10. Haponova, O., Tarel'nyk, V., Mościcki, T., Tarel'nyk, N., Pórolniczak, J., Myslyvchenko, O., Adamczyk-Cieślak, B., & Sulej-Chojnacka, J. (2024). Investigation of the Structure and Properties of MoS₂ Coatings Obtained by Electrospark Alloying. *Coatings*, 14(5), 563.

<https://doi.org/10.3390/coatings14050563>

11. Rao, B. Surya, and S. Raghunathan. “High Temperature Oxidation Behaviour of Fe-Cr Steels in Air at 800–1000 °C.” *Oxidation of Metals*, vol. 91, no. 1–2, Feb. 2019, pp. 147–164. <https://doi.org/10.1007/s11085-018-9819-x>

12. Zhang, Xiaofeng, et al. “Oxidation and Elemental Diffusion Behaviour of Heat-Resistant Steel at Elevated Temperatures.” *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 26, no. 6, June 2019, pp. 517–526. <https://doi.org/10.1007/s42243-019-0046-1>

13. Antoszewski B, Gaponova O P, Tarel'nyk V B, Myslyvchenko O M, Kurp P, Zhylenko T I, Konoplianchenko I. Assessment of Technological Capabilities for Forming Al-C-B System Coatings on Steel Surfaces by Electrospark Alloying Method. *Materials*. 2021; 14(4):739. <https://doi.org/10.3390/ma14040739>

14. Lai, Fuqiang, et al. “Improvement of Wear Resistance for Engine Valve: Introducing Cold Upsetting Treatment on Valve Seating Face.” *Wear*, vols. 564–565, March 2025, article 205693. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205693>

15. Wang, Applied Sciences. “Impact Wear Behavior of the Valve Cone Surface After Plasma Alloying Treatment.” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 11, Nov. 2022, article 4811. <https://doi.org/10.3390/app14114811>

16. Novak, Pavel, Jan Růžička, and Ester Duchková. "Evaluation of the Degradation of Combustion Engine Valves." *Manufacturing Technology* 24.5 (2024): 811-6. <https://doi.org/10.21062/mft.2024.084>
17. Raghuwanshi, Naresh K. et al. "Failure Analysis of Internal Combustion Engine Valves: A Review." *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 1 (2012): n. pag. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7627775>
18. Tang, Xu, et al. "Ultrahigh Strength Heat-Resistant Al-Fe-V-Si-Sc Alloy Fabricated by Laser Powder Bed Fusion." *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 239, 2025, pp. 299–306. ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.02.060>
19. Lai, F., Qu, S., Qin, H., Lewis, R., Slatter, T., Li, X., and Luo, H. "A Comparison of Wear Behaviour of Heat-Resistant Steel Engine Valves and TiAl Engine Valves." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, SAGE Publications, 22 Aug. 2020, <https://doi.org/10.1177/1350650119872093>
20. Патент України на корисну модель UA 130157 U, МПК (2018.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01). Спосіб алітування сталевих деталей/ Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Гапонова О.П., Коноплянченко Є.В., Тарельник Н.В., Думанчук М.Ю., Гончаренко М.В., Антошевський Б., Кундера Ч. – № u201805934; заявл. 29.05.2018; опубл. 26.11.2018. – Бюл. № 22/2018.
21. Патент України на корисну модель UA 119707 U, МПК (2017.01), С23С 10/48 (2006.01), В23Н 9/00. Спосіб алітування сталевих деталей/ Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Білоус А.В., Гапонова О.П., Коноплянченко Є.В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О.М. – № u201701844; заявл. 27.02.2017; опубл. 10.10.2017. – Бюл. № 19/2017.
22. Seralathan, T. Naga Raju, I. Guru Venkat, V. Hariram, S. Dinesh, Thermal analysis on different exhaust valve materials of compression ignition engine, *Mater. Today Proc.* 33 (2020) 4105-4111. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.550>

23. Goldstein J. et al. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. – 4th ed. – New York : Springer, 2018. – 550 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>

24. Zhang, X.F., Thaidigsman, K., Ager, J. et al. Al₂O₃ scale development on iron aluminides. Journal of Materials Research 21, 1409–1419 (2006).
<https://doi.org/10.1557/jmr.2006.0172>

25. Jeganathan Karthikeyan, Cold Spray Process, Thermal Spray Technology, Vol 5A, ASM Handbook, Edited By Robert C. Tucker, Jr., ASM International, 2013, p 54–59, <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v05a.a0005714>

26. Konoplianchenko Ie., Herasimenko V., Skrypnyk V., Boyko A., Maksimov P. Modern energy-efficient technologies for strengthening steel components.
//Інноваційні технології в Індустрії 5.0: Збірник тез за матеріалами 31-ої міжнародної науково-практичної конференції (21-23 жовтня 2025 р.). Ч.1. – Суми: СНАУ, 2025 – С.36-37.

27. Бойко А.О., Коноплянченко Є.В. Сучасні тенденції у вдосконаленні жаростійких матеріалів і покриттів для двигунів автотракторної техніки.
//Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів і аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента – (17-21 листопада 2025 р.). – Суми, 2025. – С.426

28. Закон України «Про охорону праці». URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>

Додатки

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МАТЕРІАЛИ
ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ СТУДЕНТІВ
ТА АСПІРАНТІВ, ПРИСВЯЧЕНОЇ
МІЖНАРОДНОМУ ДНЮ СТУДЕНТА**

(17-21 листопада 2025 р., м. Суми)

Рекомендовано до друку науково-координаційною радою Сумського національного аграрного університету (протокол № 4 від 19.11.2025 р.)

Редакційна рада:

Коваленко І.М., д.б.н., професор
Данько Ю.І., д.е.н., професор
Ярощук Р.А., к.с.-г.н., доцент

Редакційна колегія:

Геєнко М.М., к.е.н., професор
Думанчук М.Ю., к.т.н., доцент
Кисельов О.Б., к.с.-г.н., доцент
Масик І.М., к.с.-г.н., доцент
Михайліченко М.А., к.і.н., доцент
Синенко Т.П., PhD, доцент
Срібняк Н.М., к.т.н., доцент
Шкромада О.І., д.вет.н., професор

Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів і аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента – (17-21 листопада 2025 р.). – Суми, 2025. – 611 с.

У збірку увійшли тези доповідей Всеукраїнської наукової конференції студентів і аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента.
Для викладачів, студентів, аспірантів.

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У ВДОСКОНАЛЕННІ ЖАРОСТІЙКИХ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТТІВ ДЛЯ ДВИГУНІВ АВТОТРАКТОРНОЇ ТЕХНІКИ

Бойко А.О., студ. 2м курсу ІТФ
Науковий керівник: доц. Є.В. Коноплянченко
Сумський НАУ

Зростання ефективності двигунів внутрішнього згоряння супроводжується підвищенням температури у зоні згоряння та на поверхнях деталей газорозподільного механізму, що зумовлює необхідність застосування жаростійких матеріалів. Традиційні сталі втрачають міцність і окисну стійкість вище 600 °С, тому сучасні конструкції переходять до нікелевих суперсплавів, термостійких сталей і складних багатошарових покриттів.

Аналіз літературних джерел показав, що в сучасних автотракторних двигунах найбільше відмов припадає на паливopодачу (≈27.3%), блок циліндрів (≈18.9%) і головку блока (≈12.7%) - позиції, де термічні та окисні механізми руйнування відіграють ключову роль. Для двигунів колісної техніки промислові огляди додатково оцінюють, що до ~50% двигунних відмов так чи інакше пов'язані з проблемами системи охолодження, тобто з перегрівом і тепловими напруженнями. Ці дані узгоджуються з численними кейс-стаді з руйнування випускних клапанів і ГБЦ через термовтому й окиснення. Удосконалення жаростійкості деталей ДВЗ автотракторної техніки спирається на поєднання трьох напрямів: - легування та мікроструктурна інженерія жароміцних сплавів; - бар'єрні покриття, що ізолюють від тепла й агресивних газів; - адитивні та відновлювальні технології поверхні. У світових трендах основу гарячих деталей турбонаддуву, клапанів і колекторів і далі формують нікелеві суперсплави з упрощенням, де керування об'ємом і стабільністю преципітатів (осаджувальних матеріалів) забезпечує повзучоміцність до 1000 °С. Основою жаростійких матеріалів є нікелеві суперсплави типу Inconel та Nimonic, у яких жароміцність забезпечується завдяки твердорозчинному зміцненню γ-фази та дисперсії преципітатів γ' (Ni₃(Al,Ti)) або γ'' (Ni₃Nb). Ці сплави характеризуються стабільністю мікроструктури при 700–900 °С і високою опором повзучості. Застосовуються переважно у випускних клапанах, сідлах та елементах турбонаддуву.

Найбільш ефективним методом підвищення жаростійкості є нанесення теплозахисних покриттів на основі ітрію-стабілізованого цирконію (YSZ). Типова система складається з адгезійного шару MCrAlY (де M = Ni, Co) і керамічного шару YSZ, який знижує температуру основного металу на 100–150 °С. Технології нанесення: плазмове напилення (APS), вакуумне напилення (LPPS) або електронно-променеве осадження (EB-PVD). Алюмінівання формує захисний шар β-NiAl або FeAl, який утворює щільну плівку Al₂O₃. Це значно підвищує опір окисненню при 700–900 °С. Комбіновані системи (Al/Cr/B) забезпечують додатковий захист від солевої та сірчаної корозії. Нітрування, особливо плазмове, дозволяє утворити нітридні фази ε-(Fe₂₋₃N) і γ'-(Fe₄N), що підвищують зносостійкість і зменшують тертя у вузлах тертя (стержні клапанів, напрямні, сідла). Така обробка сумісна з багатьма аустенітними сталями. У турбокомпонентах ефективними є нікелеві сплави з високою часткою γ'-фази. У перспективі досліджуються металеві композити з керамічними зміцнювачами (Ni–Al₂O₃, Fe–SiC), здатні витримувати понад 900 °С без значної втрати міцності.

Основними проблемами при впровадженні жаростійких матеріалів є висока вартість нікелю та складність зварювання суперсплавів із високою часткою γ'-фази. Крім того, деградація покриттів через спікання YSZ і ріст оксидного прошарку (TGO) залишається важливим фактором обмеження ресурсу. Ключова роль належить тепловим бар'єрним покриттям (TBC) на основі YSZ, які знижують температуру металу на 100–200 °С. Сучасні підходи - багатошарові архітектури з керованою пористістю, колонарні структури EB-PVD та суспензійне плазмове напилення для тонких, тріщиностійких верхніх шарів. Перспективно впроваджуються альтернативні компоненти (наприклад, рідкоземельні пірохлори) й універсальні підшари MCrAlY з оптимізованою окисною плівкою. Для умов високої вологості та CMAS у вихлопі розвиваються також екологічні бар'єрні покриття (EBC) для SiC/SiC-композитів. Швидко зростає інтерес до високоентропійних (HEA) систем як потенційних жаростійких матеріалів і навіть як нових оксидаційностійких підшарів-бондів. Високопродуктивний підбір композицій прискорюють пошук HEA з підвищеною оксидаційною стійкістю та міцністю за температури понад 1000 °С.

Для автотракторних ДВЗ практичним напрямом є поверхнєве зміцнення та ремонт: лазерне наплавлення (LMD/CLAD) кобальтових/нікелевих шарів на кромках клапанів і сідел зменшує знос та окиснення, а адитивні процеси дають змогу формувати градієнтні структури й локально відновлювати геометрію без перегріву основи. Для поршнів і камер згоряння застосування TBC демонструє зниження тепловтрат і підвищення ефективності за умови контролю шорсткості та адгезії, що критично для циклічних навантажень. Глобальна стратегія підвищення жаростійкості деталей ДВЗ - це комбінація оптимізованих суперсплавів, багатофункціональних TBC/EBC і керованих адитивних технологій поверхні; додатковий резерв - HEA, відкриті за допомогою ML-дизайну. На практиці це означає довший ресурс турбокомпонентів, клапанного вузла й поршневої групи без зростання маси та з кращою паливною економічністю.

Супруненко М. К. РАННЯ ДІАГНОСТИКА НЕСПРАВНОСТЕЙ У СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІЙ ТЕХНІЦІ НА ОСНОВІ ВІБРАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НА ПРИКЛАДІ ТРАКТОРА JOHN DEERE 6155M.....	425
Бойко А.О. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У ВДОСКОНАЛЕННІ ЖАРОСТІЙКИХ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТТІВ ДЛЯ ДВИГУНІВ АВТОТРАКТОРНОЇ ТЕХНІКИ.....	426
Либань Д.О. ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ АГРОМАШИН: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ.....	427
Савченко С.М. ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ ҐРУНТООБРОБНОЇ ТЕХНІКИ.....	428
Скрипник В.В., Максимов П. С. ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ЯК СТРАТЕГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ АВТОТРАКТОРНИХ ТРАНСМІСІЙ.....	429
Тесленко О.В. РОЗРОБКА АДАПТИВНОЇ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПИТОМОГО ОПОРУ ҐРУНТУ ДЛЯ ШВИДКІСНИХ ҐРУНТООБРОБНИХ АГРЕГАТІВ В УМОВАХ ЗМІННИХ АГРОКЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ.....	430
Калнагуз О.М. АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ПОЛЬОВИМИ АГРЕГАТАМИ.....	431

ФАКУЛЬТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Алейнова П. Д. ТУРИЗМ І РЕКРЕАЦІЯ ЯК ФАКТОР СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ.....	432
Андрєєв О.М. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПІЦЦИ З МЕТОЮ ПІВДИЩЕННЯ ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ.....	433
Антоневич С.В. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КРЕМУ З ДОДАВАННЯМ НЕТРАДИЦІЙНОЇ СИРОВИНИ.....	434
Арістархов Р.С. ПІДВИЩЕННЯ БІОЛОГІЧНОЇ ЦІННОСТІ БЕЗАЛКОГОЛЬНИХ НАПОЇВ ШЛЯХОМ ДОДАВАННЯ ПОРОШКУ ЕХІНАЦЕЇ.....	435
Бакуменко М. О. СТАН ЕКОЛОГІЧНОГО ТУРИЗМУ У ПІВДЕННО-СХІДНОМУ РЕГІОНІ СУМЩИНИ.....	436
Бражник А.В. ВИКОРИСТАННЯ ПОРОШКУ КУНЖУТУ У ВИРОБНИЦТВІ РИБНОГО РУЛЕТУ.....	437
Бредун Д.В. АВТОМАТИЗОВАНІ ЛІНІЇ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ХЛІБА: ВІД ЗАМІСУ ДО УПАКОВКИ.....	438
Буєно-Бібікова Т. МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ СІЛЬСЬКОГО ЗЕЛЕНОГО ТУРИЗМУ НА ПРИКЛАДІ САДИБ РОМЕНСЬКОГО РАЙОНУ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	439
Булега В Ю. ПЕРЕРОБКА ЕКЗОТИЧНИХ ФРУКТІВ: ВИКЛИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ.....	440
Бушнєва А.О. ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ У ВИРОБНИЦТВО ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ.....	441
Буяло Є.С. ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ФАРШУ ІЗ МАЛОЦІННИХ ВИДІВ РИБ.....	442
Віленський В.О. ВИКОРИСТАННЯ VR-ТЕХНОЛОГІЙ НА МІСЬКИХ ЕКСКУРСІЙНИХ МАРШРУТАХ.....	443
Влізько К. О. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КУЛІНАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕТРАДИЦІЙНОЇ СИРОВИНИ.....	444
Воронін О. А. ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ТЕХНОЛОГІЇ БІСКВІТНОГО НАПІВФАБРИКАТУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯ РОСЛИННИХ ПІНОУТВОРЮВАЧІВ.....	445
Гасєвська Н. В. ВИКОРИСТАННЯ БІЛОЇ КВАСОЛІ У ВИРОБНИЦТВІ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ.....	446
Гетьман Х.С. РЕКРЕАЦІЙНА ДІЯЛЬНІСТЬ ЯК ЧИННИК ВІДНОВЛЕННЯ ПСИХІЧНОГО ТА ФІЗИЧНОГО ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ.....	447
Гончаренко С.О. СУМЩИНА ЯК ОСЕРЕДОК РОЗВИТКУ ЗЕЛЕНОГО ТУРИЗМУ В УКРАЇНІ.....	448
Гончаренко С.О. РЕКРЕАЦІЙНИ ТУРИЗМ ЯК ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМОК ТУРИЗМУ В УКРАЇНІ.....	449
Губа С.О. ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАРИНОВАНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ З М'ЯСА КУРКИ.....	450
Гудименко С.В. ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСТРАКТУ ХМЕЛЮ У ВИРОБНИЦТВІ ЙОГУРТІВ.....	451
Гусєва С.М. РАЦІОНАЛЬНЕ ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ ХАРЧУВАННЯ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....	452
Гуць Т.С. ВИКОРИСТАННЯ ТРАДИЦІЙНИХ РЕМЕСЛ СУМЩИНИ ДЛЯ РОЗВИТКУ ТУРИЗМУ В РЕГІОНІ.....	453
Деркач Я.О. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАПОЇВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ.....	454
Дехтяренко А. Ю. ІННОВАЦІЇ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	455
Дзюба Я. С. БІЗНЕС-МОДЕЛІ ZERO-WASTE У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ: ВІД ГЛОБАЛЬНИХ ПРАКТИК ДО УКРАЇНСЬКИХ РЕАЛІЙ.....	456
Діхтяр А.Р. КРАЩІ ПРАКТИКИ ІНКЛЮЗИВНОГО ТУРИЗМУ НА ПРИКЛАДІ ВІННИЦЬКОГО РЕГІОНУ.....	457
Дрозд А.С. ВПЛИВ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ І СОЦІАЛЬНИХ МЕДІА НА РОЗВИТОК ТУРИСТИЧНИХ ПОСЛУГ.....	458
Завгородній Д.М. АНАЛІЗ РИНКУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ НАПОЇВ: ТРЕНДИ, СПОЖИВЧІ ВПОДОБАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ.....	459
Завилєнкова Т.М. СУПИ ШВИДКОГО ПРИГОТУВАННЯ У ХАРЧОВОМУ РАЦІОНІ ВІЙСЬКОВИХ.....	460



Sumy
National
Agrarian
University

Сумський національний аграрний університет



Національний технічний університет «ХП»



Політехніка Свентокржинська в Кельцах (Польща)



ТОВ «ТРІЗ»



Сумський державний університет



Державний біотехнологічний університет



Українська технологічна академія



ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНДУСТРІЇ 5.0

Збірник тез за матеріалами 31^{ої} міжнародної науково-
практичної конференції
(21-23 жовтня 2025 р.)

Частина 1

Секції: «Інноваційні технології на транспорті»,
«Інноваційні технології в сільському господарстві»,
«Інноваційні технології в харчовій промисловості»,
«Інноваційні технології в промисловості»

Суми – 2025

Інноваційні технології в Індустрії 5.0: Збірник тез за матеріалами 31-ої міжнародної науково-практичної конференції (21-23 жовтня 2025 р.). Ч.1. – Суми: СНАУ, 2025 - 177 с.

Збірник містить тези доповідей, присвячені питанням впровадження інноваційних технологій в промисловості, агропромислового комплексу, транспорті, економіці і методикі викладання у ВНЗ.

- Duarte LA, Orozco-Alvarez C, Miranda-Hernández JG, Carrera-Espinoza R. Tribological and Mechanical Behavior of Automotive Crankshaft Steel Surficially Modified Використання процесу бурування. *Покриття*. 2024; 14(6):716. <https://doi.org/10.3390/coatings14060716>
4. Chen, Z.; Yu, X.; Ding, N.; Cong, JC; Sun, J.; Jia, Q.; Wang, C. Підвищення зносостійкості колінчастого вала з ковкого чавуну QT700-2, обробленого лазерним гартуванням. *Opt. Laser Technol.* 2023, 109, 164519. [Google Scholar] [CrossRef]
 5. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Г. В. Кирик, Є. Коноплянченко В. В., Тарельник Н. В., Мікуліна М. О. Цементация сталевих деталей електроіскровим легуванням // *Металлофіз. Новітні Технолог.*, **42**, № 5: 655—667 (2020) (укр.)
 6. Техногенна безпека АЕС: Навч. посібн.; Ч. II / Д. О. Чалий, А. Б. Тарнавський, Р. Ю. Сукач, Р. Б. Веселівський; Держ. служба України з надзвичайних ситуацій; Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. – Львів: Каменяр, 2020. – 340 с.
 7. Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості: монографія/ В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник, та ін.; за ред. В. Б. Тарельника, Є.В. Коноплянченка. - Суми: Видавництво «ФЛП Литовченко Е.Б.», 2020.- 410 с.- Українською мовою.
 8. Тарельник В.Б, Коноплянченко Є.В., Гапонова О.П, Тарельник Н.В. Забезпечення захисту поверхонь торцевих імпульсних ущільнень турбомашин шляхом формування зносостійких наноструктур: монографія / під загальн. ред. В.Б. Тарельника. Суми: Університетська книга. 2022. 260 с.

UDK 621.9.048

Konoplianchenko Ie., PhD, Assoc. Professors, Herasimenko V., PhD, Assoc. Professors, Skrypnik V., Boyko A., Maksimov P., Master's Students, SNAU, Sumy, Ukraine

MODERN ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES FOR STRENGTHENING STEEL COMPONENTS

Enhancing the wear resistance of steel components is one of the key directions in modern mechanical engineering, as wear largely determines the durability and reliability of machine operation. Steel is widely used for manufacturing parts that operate under friction, high loads, and elevated temperatures; therefore, improving its surface properties remains an urgent issue. The main objective of surface layer strengthening is to create a stable structure with increased hardness, reduced friction coefficient, and improved resistance to corrosion and thermal effects, while maintaining the toughness and strength of the component's core.

The current stage of surface hardening technology development is characterized by the extensive use of various methods-thermal, thermochemical, mechanical, laser, plasma, and combined approaches. Traditional techniques such as carburizing, nitriding, and cyaniding remain widely used due to their proven effectiveness; however, they are being gradually optimized to reduce energy consumption and improve process control. New technologies, including laser hardening, plasma and ion-plasma nitriding, and coating deposition using high-frequency energy sources, have become increasingly prevalent. These methods enable targeted formation of the surface layer structure, allowing control over diffusion depth, hardness, and microgeometry.

A promising approach to improving wear resistance is electro-spark alloying (ESA)-a pulsed process in which material is transferred from a consumable electrode (anode) to the surface of the part (cathode) via micro-arcs that generate extremely high local temperatures and ultra-short pulse durations. This process forms a metallurgically bonded layer composed of carbides, borides, nitrides, or alloys based on refractory elements. Key features include low heat input and a minimal heat-affected zone, the ability to locally restore and harden geometrically complex or hard-to-reach areas, the creation of micro-textures (oil-retaining pockets), and the possibility of combining coating compositions by changing electrodes. At the same time, ESA coatings are characterized by increased roughness and porosity, limited thickness (tens to hundreds of micrometers), structural het-

erogeneity between individual microcraters, and the need for final mechanical finishing. ESA is particularly suitable for machine parts operating under friction and in corrosive-abrasive environments, such as shafts and journals, bearing seats, cams, tool edges, gear teeth, guides, dies, and molds. It is also used for repair and restoration work to extend component service life. Compared with diffusion-based methods (carburizing, nitriding), ESA provides a rapid, localized effect without high-temperature furnaces or long cycles, though it offers less uniformity and shallower hardened layers. In contrast to laser cladding and thermal spraying, ESA is more cost-effective, mobile, and thermally safer (with less deformation and lower overheating risk), but it has lower productivity and less controllable microstructure and surface topography without subsequent grinding. Compared with ion-plasma nitriding or carbonitriding, ESA produces thicker and harder localized coatings with specific functional properties (e.g., anti-seizure Mo-, W-, or Ti-containing layers), but it scales poorly for mass production and cannot achieve full-surface uniformity. Thus, electro-spark alloying is an advantageous, highly selective, and energy-efficient technology for strengthening and repairing components with minimal equipment downtime-especially when localized functional coatings and rapid service restoration are required-provided that its limitations regarding coating thickness, roughness, and the need for final finishing are taken into account.

In summary, surface hardening technologies are among the most effective means of enhancing the wear resistance of steel components without significantly increasing product mass or cost. They extend component service life severalfold and enable the creation of materials with tailored properties for specific operating conditions.

Заміховський А. Ю., магістрант, Позовний О.О., старший викладач, СумДУ, м.Суми, України

АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ГІДРОЦИЛІНДРА НАВАНТАЖУВАЧА

Робота присвячена комплексному дослідженню впливу конструктивних параметрів гідроциліндрів[1], таких як діаметр поршня, діаметр штока, товщина стінки гільзи та тиск робочого середовища, на їхню вантажопідйомність. Основною метою є розробка методики оптимізації конструкції для підвищення надійності, довговічності та загальної ефективності вантажопідйомального обладнання[2].

Гідроциліндри є критично важливими елементами навантажувачів та іншої спецтехніки, а їхня надійність безпосередньо впливає на безпеку та продуктивність. Аналіз існуючих конструкцій показує, що вони часто проєктуються з надмірним коефіцієнтом запасу міцності, що призводить до невиправданого збільшення маси та металоємності. З іншого боку, часто недооцінюється вплив динамічних та асиметричних (бічних) навантажень, що стає причиною передчасного виходу з ладу, прискороного зносу ущільнень та аварійних ситуацій. Некоректний розрахунок вантажопідйомності є однією з головних причин підвищених витрат на технічне обслуговування та ремонт[4].

Для вирішення поставлених завдань було реалізовано комплексний підхід. На першому етапі була розроблена параметрична твердотільна модель гідроциліндра в САД-системі SolidWorks. Далі було проведено аналітичний розрахунок основних силових факторів та напружень, що виникають під час підйому вантажу, з використанням класичних формул гідростатики та опору матеріалів. Для глибокого аналізу напружено-деформованого стану (НДС) конструкції в умовах, наближених до реальних, було застосовано метод скінченних елементів (МСЕ) у програмному середовищі ANSYS. Це дозволило візуалізувати зони концентрації напружень та визначити деформації з урахуванням складних умов навантаження, включно з бічними силами[5].

В результаті проведених розрахунків та моделювання були встановлені кількісні залежності між зміною діаметра поршня та вантажопідйомністю, а також оцінено вплив діаметра штока на ефективну площу поршня, що визначає зусилля як при прямому, так і при зворот-

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ «ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОМИСЛОВОСТІ»

<i>Вірченко М. І., магістрант, Жигилій Д. О., к.т.н., доц., СумДУ, м. Суми, Україна</i> РАЦІОНАЛЬНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ БОКОВИХ КУСАЧОК	3
<i>Постолатій В. В., аспірант, Сумський національний аграрний університет</i> ЗАСТОСУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ У СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІЙ ТЕХНІЦІ	4
<i>Кальченко В. С., магістрант, Жигилій Д. О., к.т.н., доц., СумДУ, м. Суми, Україна</i> РАЦІОНАЛЬНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ЗВАРНИХ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ МЕТАЛЕВИХ БАЛОНІВ ТИСКУ	6
<i>Басов А. С., студент; Орлов Р. О., аспірант; Кушніров П. В., доцент; СумДУ, Суми</i> ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМИ «PRIVOD» ПРИ РОЗРАХУНКАХ ЗАКРІПЛЕННЯ ДЕТАЛІ «КІЛЬЦЕ»	7
<i>Дермельов А. М., магістрант, Жигилій Д. О., к.т.н., доц., СумДУ, м. Суми, Україна</i> РАЦІОНАЛЬНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ТРИКОЛІСНОГО ВЕЛОМОБІЛЯ НА ЕЛЕКТРОПРИВОДІ	8
<i>Кушніров П. В., к.т.н., доцент, Фурманов Є. О., студент, СумДУ, Суми, Україна, Динник О. Д., к.т.н., доцент, ВСП «Класичний фаховий коледж СумДУ», Конотоп, Україна</i> ОСНОВНІ НАПРЯМКИ В СТРУКТУРНИХ ТА СИСТЕМНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ	9
<i>Клишкін М. Г., Рева В. Б., Рижков М. Г., Руденко В. В., Шевченко В. І., Турчин О. О., Васильченко В. О., Матяш В. Г., магістранти, СНАУ, м. Суми, Україна</i> ОСНОВНІ ВИДИ ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН. ЧАСТИНА 1. ЗНОС ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ ГІДРОАБРАЗИВНОГО СЕРЕДОВИЩА	10
<i>Клишкін М. Г., Рева В. Б., Рижков М. Г., Руденко В. В., Токаренко А. В., Радов С. В., Журавель Д. М., Терегеря В. О., магістранти, СНАУ, м. Суми, Україна</i> ОСНОВНІ ВИДИ ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН. ЧАСТИНА 2. ЗНОС ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО СЕРЕДОВИЩА	18
<i>Супруненко М. К., PhD, асистент, СНАУ, м. Суми, Україна</i> ОГЛЯД ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОГО АГРАРНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ	23
<i>Журавель Д. М., Терегеря В. О., Шевченко В. І., Турчин О. О., Васильченко В. О., Матяш В. Г., Токаренко А. В., Радов С. В. магістранти, СНАУ, м. Суми, Україна</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН	26
<i>Konoplianchenko Ie., PhD, Assoc. Professors, Herasimenko V., PhD, Assoc. Professors, Skrypnyk V., Boyko A., Maksimov P., Master's Students, SNAU, Sumy, Ukraine</i> MODERN ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES FOR STRENGTHENING STEEL COMPONENTS	36
<i>Заміховський А. Ю., магістрант, Позовний О. О., старший викладач, СумДУ, м. Суми, України</i> АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ГІДРОЦИЛІНДРА НАВАНТАЖУВАЧА	37
<i>Сіднін В. В., магістрант, Позовний О. О., старший викладач, СумДУ, м. Суми, України</i> АНАЛІЗ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ ВХОДУ ТА ВИХОДУ БЕЗКОНТАКНИХ ШПАРИННИХ УЩІЛЬНЕНЬ	38