

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
Навчально-науковий інститут матеріалознавства
та зварювання імені Є.О. Патона

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 “Матеріалознавство”

Освітньо-професійна програма “Інжиніринг та комп’ютерне моделювання в матеріалознавстві”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

“ ____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу здобувачу ВО

Велькевичу Максиму Ігоровичу

1. Тема роботи “Створення функціональних покриттів на сталі Х12МФ електроіскровим легуванням Zr та Nb”, керівник роботи доцент, к.т.н., Лобачова Галина Геннадіївна, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1733-с.
2. Термін подання здобувачем ВО роботи _____
3. Вихідні дані до роботи: літературні дані, результати переддипломної практики, результати особистих експериментів.
4. Зміст роботи: вступ; літературний огляд; матеріали та методика досліджень; експериментальна частина; економічна частина; охорона праці; висновки; список використаних джерел.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 1 презентація (20 слайдів)

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно економічна частина	Нараєвський С.В., доцент		
Охорона праці	Левченко О.Г., зав. каф., професор		
Нормоконтроль	Шаповалова Н.А., ст.викл.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Видача завдання	19.05.2024	
	Огляд літератури	09.05.2024	
	Освоєння методик дослідження	16.05.2024	
	Виконання експериментальних досліджень	23.05.2024	
	Отримання результатів, їх аналіз	30.05.2024	
	Оформлення дипломної роботи	06.06.2024	
	Попередній захист	04.06.2024	
	Захист на засідання ЕК	20.06.2024	

Здобувач ВО

Максим ВСЬКЕВИЧ

Керівник

Галина ЛОБАЧОВА

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота : 89 сторінок, 34 рисунків, 37 літературних джерел

ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ, ЗМІЦНЕНИЙ ШАР, НІОБІЙ,
ПОКРИТТЯ, СТАЛЬ Х12МФ, ЦИРКОНІЙ

Об'єкт досліджень: легований шар на сталі Х12МФ після електроіскрового легування Zr-Nb, Nb-Zr, Zr-Nb-Zr-Nb та Nb-Zr-Nb-Zr.

Предмет дослідження: структурні зміни поверхневих шарів сталі Х12МФ, спричинені електроіскровим легуванням Zr та Nb.

Мета роботи: вивчити кінетику формування, мікроструктуру та властивості поверхневих шарів сталі Х12МФ після електроіскрового легування за схемами: Zr-Nb, Nb-Zr, Zr-Nb-Zr-Nb, Nb-Zr-Nb-Zr.

Методи досліджень: гравіметричний, рентгеноструктурний, мікроструктурний, електронно-мікроскопічний, мікродюрометричний аналіз, корозійні випробування.

Результати досліджень та їх новизна: Встановлено можливість формування електроіскрових покриттів товщиною (10 – 40) мкм на сталі Х12МФ варіюванням послідовності та кількості стадій нанесення Zr та Nb, що забезпечує підвищену мікротвердість поверхневого шару від 6,5 ГПа до 22 ГПа. Виявлено, що корозійна стійкість електроіскрових покриттів на сталі Х12МФ у 5 %-му розчині морської солі у (1,6 – 2) рази більше, ніж зразка без покриття.

Сфера застосування: авіаційна промисловість, турбіни, ріжучі інструменти, підшипники, компоненти двигунів, хімічна промисловість, енергетична промисловість, медичні імпланти.

ABSTRACT

Pre-Graduation Practice Report: 89 pages, 34 figures, 37 references

ELECTRIC-SPARK ALLOYING, HARDENED LAYER, NIOBIUM, COATING, STEEL KH12MF, ZIRCONIUM

Object of the study: The alloyed layer on X12MΦ steel after electro-spark deposition (ESD) using Zr-Nb, Nb-Zr, Zr-Nb-Zr-Nb, and Nb-Zr-Nb-Zr schemes.

Subject of the study: Structural changes in the surface layers of X12MF steel induced by electro-spark deposition of Zr and Nb.

Purpose of the work: To study the kinetics of formation, microstructure, and properties of the surface layers of X12MΦ steel after electro-spark deposition using the following schemes: Zr-Nb, Nb-Zr, Zr-Nb-Zr-Nb, and Nb-Zr-Nb-Zr.

Research methods: Gravimetric, X-ray structural, microstructural, electron microscopy, microhardness analysis, and corrosion testing.

Research results and novelty: The possibility of forming electro-spark coatings with thicknesses ranging from 10 to 40 microns on X12MΦ steel by varying the sequence and number of deposition stages of Zr and Nb has been established. These coatings exhibit increased microhardness of the surface layer, ranging from 6.5 GPa to 22 GPa. It was also found that the corrosion resistance of the electro-spark coatings on X12MΦ steel in a 5% seawater solution is 1.6 to 2 times higher than that of the uncoated sample.

Application area: Aviation industry, turbines, cutting tools, bearings, engine components, chemical industry, energy industry, medical implants.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	11
1.1 Загальні відомості про ЕІЛ	12
1.2 Нанесення зміцнених покриттів на сталі методом електроіскрового легування	14
1.3 Властивості та застосування цирконію та ніобію як електродних матеріалів для ЕІЛ.....	15
1.4 Висновки до розділу 1	20
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
2.1 Матеріали досліджень	22
2.2 Методика експерименту.....	22
2.3 Методи дослідження	24
2.3.1 Гравіметричний аналіз	24
2.3.2 Рентгеноструктурний аналіз	25
2.3.3 Мікроструктурний аналіз	26
2.3.4 Растрова електронна мікроскопія	28
2.3.5 МікродюрOMETричний аналіз	29
2.3.6 Корозійні випробування	32
2.4 Висновки до розділу 2	34
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	35
3.1 Формування електроіскрових покриттів на поверхні сталі X12МФ при послідовному нанесенні Zr-Nb та Nb-Zr.....	35
3.2 Мікротвердість та корозійна стійкість електроіскрових Zr-Nb та Nb- Zr покриттів на сталі X12МФ.....	49
3.3 Висновки до розділу 3	57

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	59
4.1 Науково-технічна актуальність НДР	59
4.2 Мета і завдання НДР	60
4.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження	61
4.3.1 Визначення заробітної плати науково-дослідницького персоналу	62
4.3.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску	64
4.3.3 Визначення вартості матеріалів для виконання НДР	64
4.3.4 Інші прямі невраховані витрати.....	65
4.3.5 Розрахунок накладних витрат	65
4.3.6 Розробка планової калькуляції собівартості НДР.....	65
4.4 Визначення очікуваних результатів НДР та розрахунок показників економічної ефективності.....	66
4.5 Висновки до розділу 4	69
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	70
5.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві	70
5.2 Аналіз параметрів приміщення.....	71
5.3 Аналіз освітленості приміщення	72
5.4 Аналіз мікроклімату приміщення	73
5.5 Аналіз наявності шуму в приміщенні	74
5.6 Виробниче випромінювання	75
5.7 Запиленість та загазованість	75
5.8 Електробезпека	77
5.9 Пожежна безпека	78
5.10 Висновки до розділу 5	80
ВИСНОВКИ	81
CONCLUSIONS.....	82

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	83
----------------------------------	----

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕІЛ — електроіскрове легування

$T_{\text{пл}}$ — температура плавлення

$T_{\text{кип}}$ — температура кипіння

λ — коефіцієнта теплопровідності

ЛШ – легований шар

ВСТУП

Електроіскрове легування (ЕІЛ) є ефективним та перспективним методом обробки металевих поверхонь. В процесі такої обробки забезпечується формування зміцненого покриття при використанні будь-яких електропровідних матеріалів. ЕІЛ є екологічно чистим, енерго- та ресурсозберігаючим процесом, простим в технічній реалізації на малогабаритному транспортабельному обладнанні.

Як альтернативний спосіб створення покриттів твердосплавними легувальними електродами виступає послідовне нанесення окремих елементів, ерозія яких є значно більшою, що посилює ефективність формування легованого шару. Сталеві деталі, що піддаються механічним і термічним навантаженням, часто зазнають корозії та зношування а, отже, потребують відновлення робочих поверхонь. Зважаючи на це, метод ЕІЛ стає у пригоді, дозволяючи створювати тверді та зносостійкі поверхневі шари на сталях, значно покращуючи їх експлуатаційні характеристики без необхідності заміни цілком всієї деталі, тим самим скорочуючи витрати вартісних матеріалів.

Останнім часом все більше вчених приділяють увагу створенню багатокомпонентних покриттів комбінуванням декількох матеріалів, що наносяться в процесі ЕІЛ. Поєднуючи характеристики кожного з використаних металів, існує можливість прогнозування багатофункціональності легованих шарів.

В даній роботі запропонована можливість формування зміцнених, корозійностійких електроіскрових покриттів на сталі Х12МФ шляхом послідовного нанесення цирконію та ніобію.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

У сучасних умовах виробництва та експлуатації деталей машин та механізмів постійно виникає проблема зносу через тертя, механічні навантаження та агресивні зовнішні умови. Зокрема, у таких галузях, як металургія, енергетика, авіація та автомобільна промисловість, часто вимагається заміна важливих деталей, таких як лопаті ротора, підшипники та інші компоненти, що піддаються значному зношуванню внаслідок тривалого механічного навантаження і тертя. Підвищення зносостійкості і міцності цих компонентів є важливою задачею для забезпечення надійності роботи технічних систем.

Для вирішення цієї проблеми застосовуються різноманітні методи зміцнення поверхонь деталей, зокрема, методи термічної обробки, нанесення покриттів та інші технології, що сприяють покращенню характеристик матеріалів. Одним з ефективних способів є електроіскрове легування (ЕІЛ), яке дозволяє значно змінити фізико-хімічні властивості поверхні матеріалу без необхідності в дорогих сплавах чи складних виробничих процесах. Цей метод, заснований на ерозії, використовує високочастотний електричний розряд для перенесення матеріалу з легуючого електроду на поверхню деталі. Це призводить до утворення зносостійкого шару, який має підвищену твердість, стійкість до корозії та покращені механічні характеристики.

ЕІЛ особливо ефективно для обробки сталей, оскільки воно дозволяє отримати високоякісні покриття на дешевих металах, що значно підвищує їхню зносостійкість і служить для відновлення зношених деталей. Це дозволяє не лише подовжити строк служби компонентів, а й знизити витрати на заміну частин та ремонтні роботи. Важливим аспектом є також можливість зменшення коефіцієнта тертя, що робить цей метод актуальним у роботах, де деталі піддаються інтенсивному тертю або іншим фізичним впливам.

1.1 Загальні відомості про ЕІЛ

Метод електроіскрового легування (ЕІЛ), розроблений Борисом Романовичем Лазаренком у 1943 році, став значущою інновацією в технології поверхневої обробки матеріалів [1]. Він полягає в перенесенні матеріалу з анода (легуючого матеріалу) на поверхню катода (оброблюваного виробу) через іскровий електричний розряд. Однією з головних особливостей цього процесу є створення міцного зчеплення між покриттям і основною поверхнею, де утворюється проміжний шар, що забезпечує дифузійні процеси між елементами катода та анода.

Процес електроіскрового легування може мати два варіанти:

створення покриття, міцно зчепленого з основним матеріалом, з формуванням між ними дифузійного шару;

збагачення поверхні катода елементами матеріалу анода без утворення окремого покриття.

Перевагою методу є можливість локального нанесення покриттів лише на певні ділянки поверхні, що не потребує захисту інших частин виробу. Крім того, технологія ЕІЛ передбачає використання компактного та простого в конструкції обладнання, що забезпечує легкість транспортування та експлуатації.

Фізичний процес електроіскрового легування наступний [2]: коли електричний розряд пробиває проміжок між анодом та катодом, матеріал між ними перестає бути діелектриком і виникає імпульсний електричний розряд. Цей розряд викликає ерозію матеріалу анода, і частинки цього матеріалу відкидаються на поверхню катода. Кількість матеріалу, що переноситься, залежить від параметрів електричного кола та налаштувань процесу.

ЕІЛ є ефективним методом для створення покриттів з високими механічними властивостями, такими як твердість, зносостійкість і корозійна стійкість, що робить його перспективним для широкого застосування в промисловості.

Основною умовою успішного результату після обробки методом ЕІЛ є правильний вибір анода за його фізичними та хімічними властивостями, стійкістю до ерозії та параметрами обробки, що відповідають необхідним характеристикам поверхні. Досягнення позитивних результатів при ЕІЛ обробці залежить від ретельного вибору анода з урахуванням його хімічних і фізичних властивостей, корозійної стійкості та параметрів обробки, що впливають на кінцеві характеристики модифікованого шару [3].

Метод ЕІЛ дозволяє змінити певні властивості поверхні, зокрема підвищити її корозійну стійкість, зносостійкість, жаростійкість та твердість деталей машин, формуючи необхідні хімічні сполуки і шари з потрібною шорсткістю [4].

Основна мета електроіскрового легування полягає у вивченні впливу імпульсного електричного розряду на електропровідні матеріали анода та катода. У процесі легування утворюється електричний розряд, який формує видозмінені шари біля поверхні катода. Ці шари з'являються під впливом імпульсів та теплових фізичних навантажень на область розряду. Під дією теплових навантажень на поверхні анода відбуваються некеровані процеси, такі як дифузні, термомеханічні, мікрометалургійні, що сприяють перемішуванню матеріалів катода та анода, забезпечуючи високу адгезію модифікованого шару. Формування поверхні після легування визначається складом, структурою, властивостями матеріалів анода та технічними характеристиками процесу електроіскрового легування [5].

Коли анод і катод (як показано на рис. 1.1) наближаються один до одного, напруженість електричного поля між ними зростає. При досягненні певної критичної відстані між електродами, ця напруженість стає достатньою для виникнення іскрового електричного розряду (ІЕР). Під час цього процесу, завдяки енергії, що надходить від генератора імпульсів, на поверхні виникають та розширюються осередки плавлення і випаровування, що призводить до електричної ерозії матеріалу електродів. [6,7]

Потік електронів, що потрапляють на поверхню анода, виділяє велику кількість енергії, яка сприяє ерозії анода. Частинки матеріалу, що відриваються, осідають на розплавленій поверхні катода та дифундують у його глибину, що змінює характеристики приповерхневої зони катода. В результаті на поверхні оброблюваної деталі (катода) утворюється модифікований шар з новими фізичними та механічними властивостями.

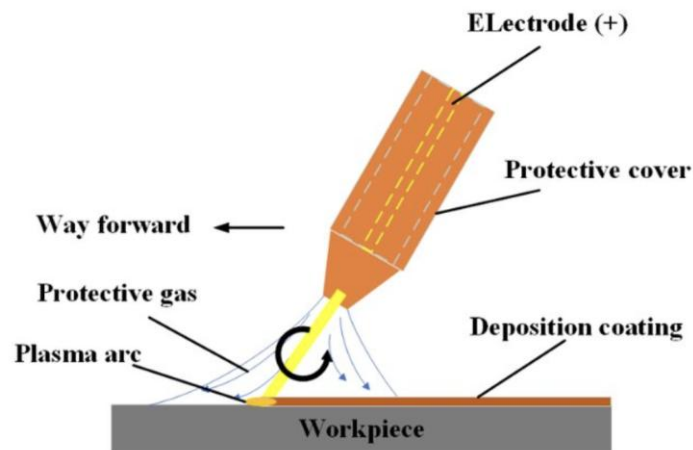


Рисунок 1.1 – Схема процесу ЕІЛ [3]

Застосування різних анодів, з огляду на їхні фізико-хімічні властивості та фазовий стан компонентів під час ЕІЛ, дозволяє регулювати процес легування шляхом налаштування параметрів імпульсних розрядів. Це дає можливість отримувати покриття з заданими характеристиками поверхневого шару [8].

1.2 Нанесення зміцнених покриттів на сталі методом електроіскрового легування

Розмір перших двох зон залежить від температур плавлення ($T_{пл}$) та кипіння ($T_{кип}$) та точного коефіцієнта теплопровідності (λ). Чим більші $T_{пл}$, $T_{кип}$ та λ , тим менша зона плавлення та кипіння. Полярне перенесення матеріалу анода на катод дозволяє створювати на поверхні катода змінені шари, які

з'являються під час взаємодії не лише електродів між собою, а й з середовищем.

Для покращення властивостей робочих поверхонь деталей, таких як зносостійкість, міцність і корозійна стійкість, широко застосовуються методи нанесення зміцнюючих або захисних покриттів [9]. Одним з таких методів є електроіскрове легування (ЕІЛ), яке дозволяє ефективно наносити покриття на металеві деталі, використовуючи різні струмопровідні матеріали. Під час процесу електроіскрового легування поверхня деталі зазнає значних змін у фізичних, хімічних та механічних властивостях, а також у розмірах та рельєфі. В результаті цього процесу утворюється модифікований поверхневий шар, в якому можуть бути виявлені інтерметалідні сполуки, карбіди, оксиди, нітриди та мікрокристалічні структури, що значно підвищує твердість поверхні.

Одними з ключових характеристик цього процесу є міцність і товщина утвореного покриття [10]. Структура і властивості покриття безпосередньо залежать від умов, в яких проходить процес нанесення покриття. Важливим чинником, який визначає якість покриття, є енергія розряду, яка на пряму впливає на шорсткість та товщину сформованого шару. Для забезпечення високоякісного та достатньо товстого покриття застосовують кілька підібраних анодів та відповідне середовище легування, що дозволяє досягти оптимальних властивостей покриття [10].

1.3 Властивості та застосування цирконію та ніобію як електродних матеріалів для ЕІЛ

З літератури [11] відомо, що якість покриття зумовлюється характером масоперенесення під час дії електроіскрового розряду. При цьому важливу роль виконує взаємна розчинність матеріалів аноду і катоду. Для металів, які утворюють з залізом інтерметалічні сполуки (Ta, Nb) коефіцієнт перенесення маси є незначними. У випадку формування розчинів з обмеженою розчинністю (Ti, Zr, Mo, W), коефіцієнт перенесення маси, суцільність ЛШ та його товщина

– мінімальні; в таких покриттях присутні видимі дефекти. Отже, чим більша схильність матеріалу аноду до утворення твердих розчинів з матеріалом катоду, тим міцніший зв'язок з основою [11].

Цирконій (Zr) та ніобій (Nb) є важливими перехідними металами, що мають низку унікальних фізико-хімічних властивостей, які роблять їх надзвичайно корисними для матеріалознавства та широкого кола промислових застосувань. Обидва метали мають високу температуру плавлення (1855 °C для цирконію і 2477 °C для ніобію), що робить їх ідеальними для застосування в умовах високих температур, таких як аерокосмічна промисловість, атомна енергетика та оборонні технології [12, 13].

Цирконій характеризується низьким коефіцієнтом термічного розширення, чудовою корозійною стійкістю і є біосумісним, що дозволяє застосовувати його для створення медичних імплантатів і протезів. Висока стійкість до хімічних впливів, особливо в агресивних середовищах, робить цирконій ідеальним для використання в умовах, де потрібна довговічність матеріалу, зокрема у виробництві сплавів, що працюють у корозійно активних середовищах.

Ніобій, подібно до цирконію, має високу температуру плавлення, чудову корозійну стійкість, а також механічні властивості, які роблять його важливим компонентом у виробництві суперсплавів для високотемпературних і високонавантажених систем. Ніобій володіє здатністю поліпшувати характеристики сталі та інших металів, роблячи їх більш міцними і стійкими до високих температур.

Взаємодія цирконію та ніобію з іншими металами, такими як залізо (Fe) і хром (Cr), суттєво змінює властивості матеріалів, зокрема, їх твердість, зносостійкість і термостійкість. Це дозволяє створювати сплави, які мають значно кращі експлуатаційні характеристики, що робить цирконій і ніобій важливими елементами для легування сталей і виробництва зносостійких покриттів [14].

Діаграма стану системи Zr-Nb (рис. 1.2) показує, як при різних масових частках Nb у сплаві цирконій утворює дві основні фази: α -Zr та β -Zr. α -Zr та β -Zr є двома основними фазами цирконію, які змінюються при різних температурах і концентраціях Nb. Фаза α -Zr є стабільною при низьких температурах, а β -Zr стабільна при високих температурах. β -Nb – це фаза, яка утворюється при високих температурах, коли масова частка ніобію в сплаві збільшується. Перехід між α -Zr та β -Zr відбувається при певній температурі, що залежить від масової частки Nb. Змішування Zr та Nb утворює сплави, що мають підвищену термостійкість і механічну міцність, особливо при високих температурах [15].

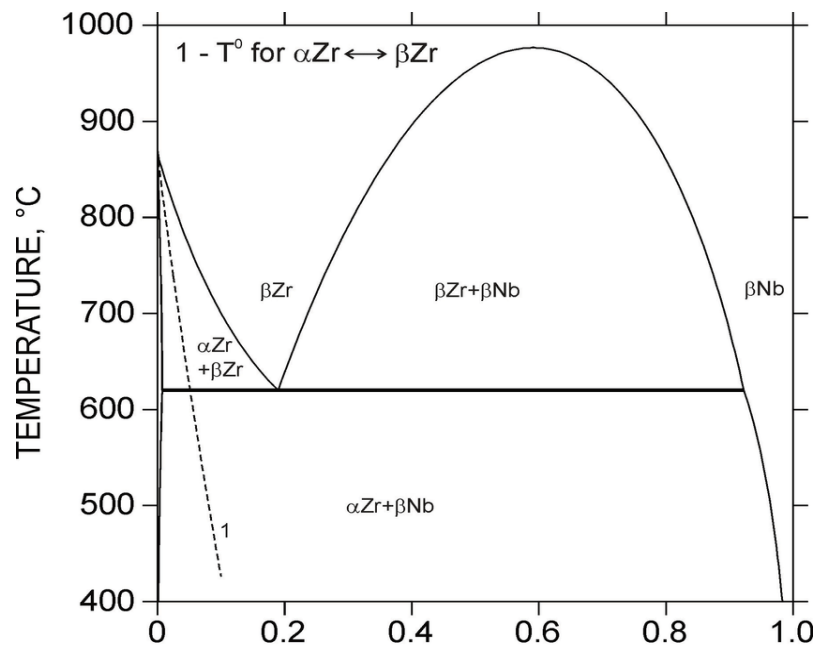


Рисунок 1.2 – Діаграма стану системи Zr-Nb [15]

Діаграма стану системи Zr-Nb-Fe (рис 1.3) демонструє взаємодію трьох елементів – цирконію (Zr), заліза (Fe) та ніобію (Nb) – і показує, як змінюються фази при різних концентраціях цих металів. Вона включає такі фази, як α -Fe та β -Fe, а також сплави типу $(\text{Zr}_{1-x}\text{Nb}_x)\text{Fe}_2$ та $(\text{ZrNb})_2\text{Fe}$, які утворюються при певних пропорціях елементів. Ці сплави можуть мати значні зміни в механічних властивостях, таких як твердість і стійкість до корозії, що робить їх важливими для застосування у зносостійких покриттях [16].

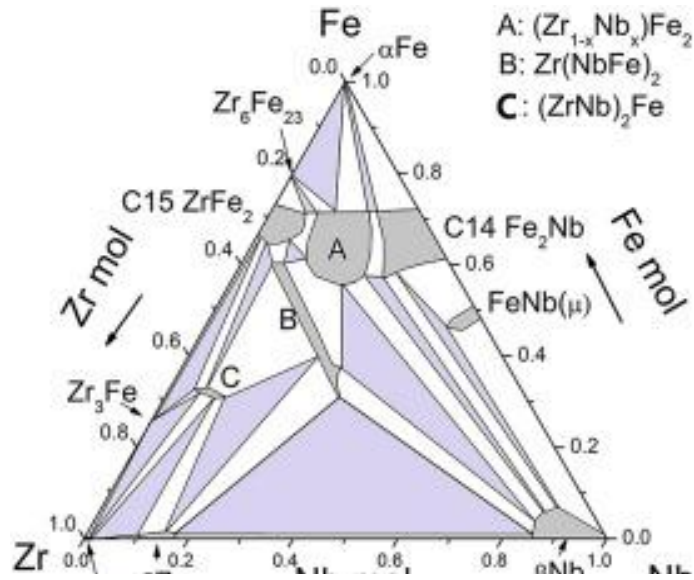


Рисунок 1.3 – Діаграма стану системи Zr-Nb-Fe [17]

Діаграма Zr-Fe-Nb також виявляє фази, що утворюються при високих температурах, як-от FeNb, що вказує на важливість налаштування співвідношення елементів для досягнення оптимальних характеристик сплаву.

Діаграма стану Zr-Nb-Cr (рис 1.4) показує взаємодію трьох елементів: заліза (Fe), ніобію (Nb) та хрому (Cr) при температурі 700 °C [18].

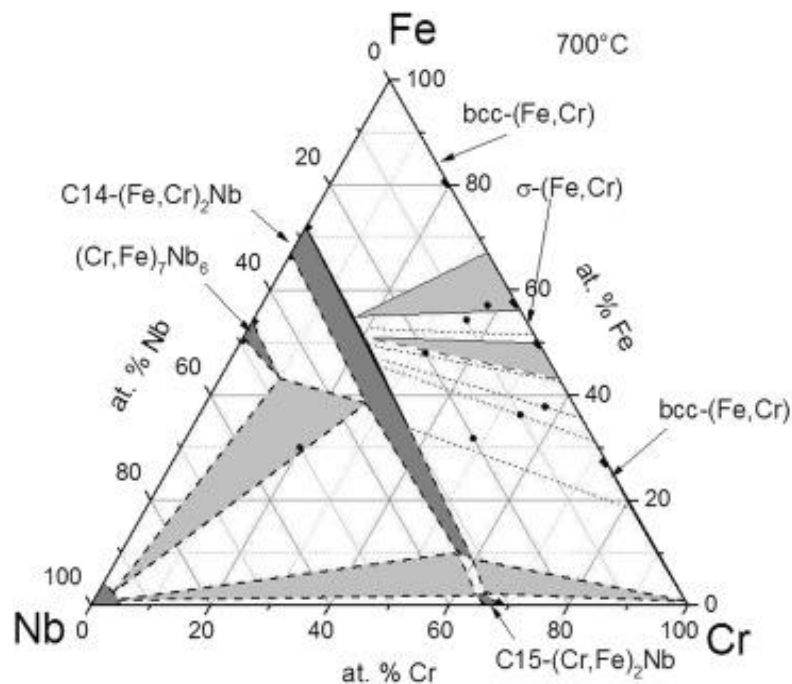


Рисунок 1.4 – Діаграма стану системи Zr-Nb-Cr [18]

Зокрема, у системі можна побачити фази $bcc-(Fe,Cr)$ та $\sigma-(Fe,Cr)$, які вказують на характер кристалічної ґратки при різних концентраціях елементів. Фази $C14-(Fe,Cr)_2Nb$ та $C15-(Cr,Fe)_2Nb$ виникають при високих концентраціях хрому та ніобію [19].

Одним із прикладів застосування цирконію та ніобію є робота [20], в якій досліджено застосування сплавів цирконій-ніобій у ядерній енергетиці для створення паливних елементів в реакторах під тиском. Ці сплави відзначаються високою корозійною стійкістю в умовах високих температур та нейтронного опромінення, що робить їх ідеальними для використання в ядерних реакторах. Встановлено, що сплави $Zr-Nb$ забезпечують чудову механічну міцність і стійкість до агресивних середовищ, що робить їх надійним матеріалом для виготовлення компонентів, які піддаються екстремальним умовам. Ці результати підкреслюють важливість цирконію та ніобію для створення матеріалів, які володіють не тільки високими механічними характеристиками, але й стійкістю до корозії та високих температур, що є ключовими вимогами для сучасних технологій.

Згідно з останніми дослідженнями [21], цирконієві сплави, зокрема $Zr-Nb$ та $Zr-Mo$, знаходять дедалі більше застосування у біомедичній сфері завдяки своїй низькій магнітній сприйнятливості та високій біосумісності. Завдяки цьому вони використовуються для виготовлення імплантатів, таких як стоматологічні, ортопедичні та хірургічні вироби. Проблеми, що виникають при використанні металевих імплантатів, зокрема в медичних процедурах, таких як магнітно-резонансна томографія (МРТ), пов'язані з артефактами на зображеннях, спричиненими різницею в магнітній сприйнятливості між металами та живими тканинами. Проте цирконій з його низькою магнітною сприйнятливістю вирізняється з-поміж інших металів, таких як титанові та кобальтові сплави, і є оптимальним для медичних застосувань.

Сплави на основі цирконію, зокрема $Zr-Nb$, відзначаються не тільки низькою магнітною сприйнятливістю, але й високою корозійною стійкістю,

що робить їх ідеальними для використання в агресивних середовищах, таких як людський організм. Введення ніобію в цирконієві сплави знижує магнітну сприйнятливість, покращуючи їх здатність до біологічної інтеграції та запобігаючи можливим ускладненням під час медичних процедур, включаючи МРТ. Додавання молібдену до цирконієвих сплавів також сприяє подальшому зниженню магнітної сприйнятливості, що робить ці матеріали найбільш перспективними для виготовлення медичних імплантатів, здатних поєднувати високу механічну міцність, біосумісність і низький рівень магнітних впливів. Таким чином, сплави на основі цирконію, як Zr-Nb, продовжують набирати популярності у біомедичному використанні завдяки своїй високій зносостійкості, біосумісності та здатності до зниження магнітних артефактів в медичних зображеннях, що сприяє їх широкому застосуванню в різних галузях медицини.

Автори роботи [6] вивчали структуру та властивості біосумісних покриттів зі сплаву Zr-Nb, одержані мікроплазмовим напиленням. Поверхня таких Zr-Nb покриттів є пористою: наявні відкриті макропори (до 300 мкм) та мікропори (до 10 мкм). Рентгенофазовим аналізом виявлено, що Zr-Nb покриття складаються з фаз α -твердого розчину Zr, оксиду (ZrO_2), нітриду (ZrN) і карбіду ($ZrNbC_2$). Корозійна стійкість мікроплазмового Zr-Nb покриття на поверхні існуючих ендопротезів зі сплаву Ti_6Al_4V в розчині 0,9 % NaCl, що імітує середовище людського організму, надає змогу рекомендувати його у майбутньому для підвищення стійкості до корозії та остеоінтеграції між кісткою та імплантатом [6].

1.4 Висновки до розділу 1

Проведений літературний огляд підтвердив, що електроіскрове легування є високоефективним і технологічно перспективним методом формування зміцнених та функціональних покриттів на металевих поверхнях, зокрема на інструментальних сталях типу X12МФ. Вивчено фундаментальні фізико-хімічні

процеси, що відбуваються під час ЕІЛ, а також проаналізовано основні теоретичні моделі, які описують механізми масопереносу та структуротворення легованих шарів. Особливу увагу приділено властивостям цирконію та ніобію, їх хімічним і фізичним характеристикам, а також широкому спектру застосувань у різних галузях промисловості, зокрема у біомедицині, що підкреслює потенціал цих елементів для створення біосумісних функціональних покриттів. Зокрема, цирконій і ніобій характеризуються високою корозійною стійкістю, низькою магнітною сприйнятливістю та покращеними механічними властивостями, що робить їх оптимальними компонентами для зміцнення поверхневих шарів. Розглянуто методологічні підходи до ЕІЛ, включаючи моделі Лазаренка та Верхотурова, які дозволяють глибше розуміти вплив технологічних параметрів на якість покриттів. Загалом, отримані дані створюють міцну теоретичну базу для подальших експериментальних досліджень та оптимізації процесу нанесення функціональних покриттів на сталь X12МФ методом електроіскрового легування.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали досліджень

Матеріалом дослідження в роботі обрана сталь X12МФ, яка є високовуглецевим легованим матеріалом, що має широкий спектр застосувань у виробництві інструментів, зокрема для виготовлення різальних і штампувальних інструментів [22].

Склад сталі X12МФ: вуглець (1,45 – 1,65) %, кремній (0,1 – 0,4) %, марганець (0,15 – 0,45) %, нікель (до 0,4) %, сірка (до 0,03) %, фосфор (до 0,03) %, хром (11 – 12,5) %, молібден (0,4 – 0,6) %, ванадій (0,15 – 0,3) % і мідь (до 0,3) % [22]. Вона є важливим матеріалом для виробництва інструментів, що піддаються високим механічним навантаженням і агресивним середовищам, оскільки має високу твердість та зносостійкість.

Досліджувані зразки сталі X12МФ мали вигляд паралелепіпеду зі сторонами 10 мм, 13 мм та висотою 5 мм.

Перед початком процесу ЕІЛ всі поверхні зразків були попередньо оброблені на шліфувальному папері зернистістю Р600.

2.2 Методика експерименту

Для здійснення процесу ЕІЛ використовувалась лабораторна установка «ЭЛИТРОН 26А» (рис. 2.1), яка складається з корпусу та вібраційної ручки, в якій закріплюється матеріал аноду.

Принцип роботи установки для електроіскрового легування полягає в накопиченні електричної енергії на обкладинках конденсатора, яка після цього миттєво звільняється між електродами. Комутація розрядного ланцюга відбувається через вібраційний пристрій [23].



Рисунок 2.1 — Фотографія приладу “ЭЛИТРОН 26А”

Установка «ЭЛИТРОН–26А» оснащена генератором імпульсів, контакти якого підключені до оброблюваної деталі (катода) та електрода, розміщеного в електродотримачі електромагнітного вібратора (анод) [24]. Система установки складається з трьох основних компонентів: понижуючого трансформатора, випрямлячів, конденсаторів та вібратора. Більшість таких установок функціонує на випрямленому пульсуючому струмі з живленням від промислової мережі змінного струму напругою 220 В. [25]

Процеси ЕІЛ відбувалися за таких електричних параметрів: $I = 1,5 \text{ А}$; $U = 60 - 70 \text{ В}$; $\nu = 50 \text{ Гц}$.

В якості легуючих анодів було обрано перехідні метали: Zr (до 99,9 мас.%) та Nb (до 99,9 мас.%). Вибір в якості анодів Zr та Nb обумовлений їх високою розчинністю один в одному, що дозволяє створювати стабільні покриття з покращеними механічними властивостями, такими як твердість і зносостійкість [26], а також їх здатністю формувати карбіди та інші зміцнюючі фази при взаємодії з поверхнею сталі X12МФ.

ЕІЛ здійснювалося послідовним нанесенням цирконію та ніобію за схемами: Zr–Nb; Nb–Zr; Zr–Nb–Zr–Nb; Nb–Zr–Nb–Zr.

Тривалість легування становила 5,25 хв., а саме: при використанні Zr–аноду – 4,5 хв (270 с), Nb-аноду – 0,75 хв. (45 с), т.б. загальний час легування двостадійних процесів складав 315 с, а чотирьохстадійних – 630 с. Різниця тривалості обробки кожним з двох електродів обрана з міркувань створення різного вмісту ніобію та цирконію у покритті.

2.3 Методи дослідження

В роботі було використано такі методи дослідження: гравіметричний, мікроструктурний, рентгеноструктурний, рентгеноспектральний, мікродюрOMETричний аналіз, електрона мікроскопія, випробування на зносостійкість та корозійну стійкість.

2.3.1 Гравіметричний аналіз

Для вивчення кінетики формування покриттів під час проведення ЕІЛ використовувався гравіметричний аналіз [27]. Цей метод полягає у вимірюванні маси електродів до початку обробки та під час її проведення. Зміна маси контролювалася на кожному етапі процесу з певними інтервалами за допомогою електронних лабораторних вагів «AXIS AD 50» (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд електронних лабораторних вагів «AXISAD50»

На основі даних зміни маси зразка та легувальних анодів побудовані графіки залежності приросту маси катоду та ерозії анодів від тривалості обробки.

Розрахунки приросту маси катоду (Δm_k) та ерозії аноду (Δm_a) проводили за формулою 2.1 та 2.2 [27]:

$$\Delta m_k = m_k(t_n) - m_k(t_{n-1}), \quad (2.1)$$

$$\Delta m_a = m_a(t_n) - m_a(t_{n-1}), \quad (2.2)$$

де t_n – час n -го вимірювання маси;

t_{n-1} – час попереднього вимірювання маси;

Коефіцієнт масоперенесення розраховується з відношення :

$$K = \left| \frac{\sum \Delta m^k}{\sum \Delta m^a} \right| \cdot 100\% \quad (2.3)$$

Отже для отримання усередненого значення масопереносу маємо за час t :

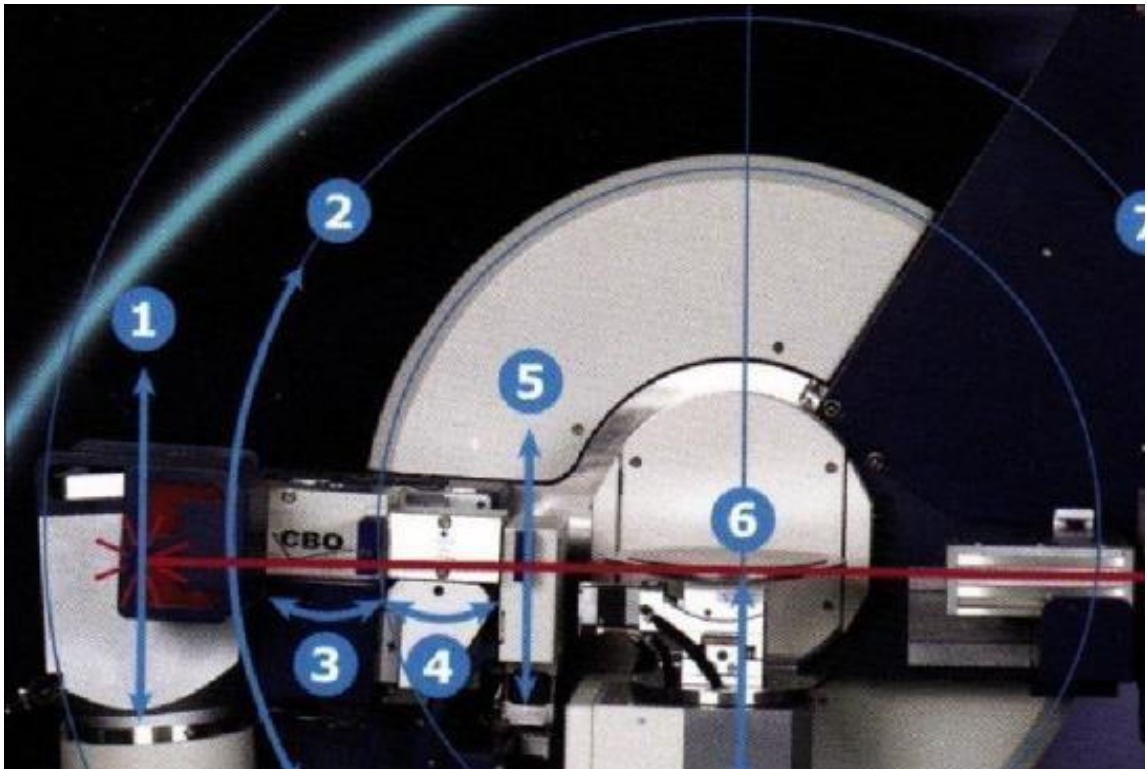
$$K_C = \frac{\sum_{t=0}^{i=n} K_i}{n} \quad (2.4)$$

де n – кількість вимірів за час t .

До часових характеристик відносяться такі якісні величини: t_x – поріг крихкого руйнування нанесеного шару – час, якому відповідає максимальне значення Δm^k .

2.3.2 Рентгеноструктурний аналіз

Рентгеноструктурний аналіз виконано за допомогою дифрактометра «Ultima IV» компанії «Rigaku», що дозволило провести: якісний фазовий аналіз покриттів; кількісний визначення фазового складу; вимірювання періоду кристалічної ґратки; оцінку розміру кристалітів; а також оцінку ступеня кристалічної досконалості. Дослідження здійснювались у мідному монохроматизованому випромінюванні (інтервал кутів 2θ – від 10° до 100° , крок – $0,04^\circ$) при напрузі 30 кВ і струмі 30 мА. Схематичне зображення камери дифрактометра Rigaku Ultima IV наведено на рисунку 2.3



1 – висота джерела випромінювання; 2 – кут нахилу джерела; 3 – поперечна оптична пучка; 4 – кристалічна оптика; 5 – висота щілини; 6 – поверхня зразка для дослідження; 7 – кут переміщення детектора.

Рисунок 2.3 – Схема установки «Rigaku Ultima IV» [28]

2.3.3 Мікроструктурний аналіз

Для підготовки поперечних шліфів зразків сталі Х12МФ, що оброблялись методом електроіскрового легування, використовувалася спеціальна установка для закріплення зразків. Для цього застосовувався прилад Simplimet 1000 (рис. 2.4), в якому зразки закріплювались у термореактивній смолі – бакеліті. Цей процес забезпечив надійну фіксацію зразків, що дозволило отримати рівні шліфи без деформацій, а також уникнути утворення тріщин чи розшарувань у матеріалі під час подальшої обробки. Процес закріплення зразків у бакеліті є важливим етапом, оскільки він запобігає механічним ушкодженням зразків, що можуть виникнути при механічному шліфуванні.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд установки «Buehler SimpliMet1000»

Після закріплення зразків було виконано шліфування за допомогою шліфувального верстата Buehler Vector (рис 2.5), що використовувався для шліфування зразків з поступовим зменшенням розміру абразивних часток абразивного паперу. Початково застосовувалося грубе шліфування, після чого переходили до більш дрібного паперу для досягнення гладкої поверхні.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд установки «Buehler Vector»

Для досягнення дзеркальної поверхні, що є необхідною для подальшого металографічного аналізу, на завершальному етапі використовувалась полірувальна паста на основі оксиду хрому III. Полірування

проводилося на воді, що дозволяло досягти максимальної рівності поверхні та зменшити шорсткість, що є важливим для точних вимірювань під мікроскопом.

Отриману поверхню шліфу протравлювали 5% розчином азотної кислоти в етиловому спирті, що дозволяло виділити структуру матеріалу для подальшого аналізу під мікроскопом.

Фотографії мікроструктур одержані цифровою камерою з використанням металографічного тринокулярного мікроскопу «iScope IS.1053-PLMi» (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Металографічний тринокулярний мікроскоп
«iScope IS.1053-PLMi» [29]

2.3.4 Растрова електронна мікроскопія

Дослідження структури та хімічного складу поверхні зразків після електроіскрового легування (ЕІЛ) виконувалися за допомогою растрового електронного мікроскопа “РЭМ-106И” (рисунок 2.7). Для отримання детальної топографії поверхні застосовували відбиті електрони. Електронний пучок з розміром зонду від 2 до 5 нанометрів систематично сканував поверхню зразка, утворюючи растрове зображення.



Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд растрового електронного мікроскопа “РЭМ-106И”

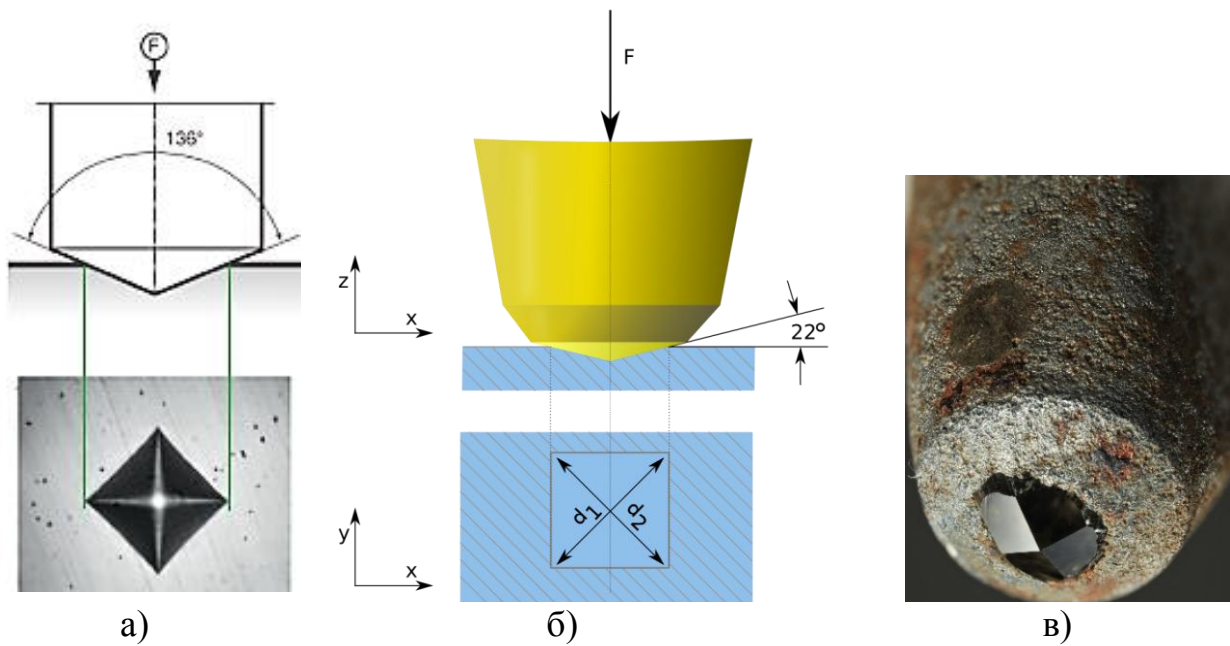
Роздільна здатність мікроскопа була в межах 3–5 нанометрів, що дозволяло досліджувати нанометрові структури поверхневих шарів. Для зйомки використовувалася прискорювальна напруга 200 кіловольт. Збільшення мікроскопа варіювалося від 2500 до 3000 разів.

2.3.5 МікродюрOMETричний аналіз

Для оцінки мікротвердості покриття, отриманого методом ЕІЛ, застосовувався мікродюрOMETричний аналіз. Твердість покриття за методом Віккерса визначається за розміром відбитка, який утворюється під дією навантаження, що наочно представлено на рис. 2.8 (а). Для вимірювання відбитка використовуються діагоналі d_1 та d_2 , як показано на рис. 2.8 (б). Алмазна чотиригранна піраміда з кутом при вершині 136° (рис. 2.8 (в)) використовується для створення відбитка.

Діагональ відбитка d вимірюється за допомогою мікроскопа, встановленого на мікротвердомірі. Мікротвердість шліфів визначали за допомогою приладу ПМТ–3 (рис. 2.9). Процес вимірювання мікротвердості здійснюється шляхом вдавнення стандартної алмазної піраміди з квадратною

основою та двограним кутом при вершині 136° при навантаженні 20 г протягом 8-10 секунд [30].



а) – схема занурення індентора з кутом при вершині в 136° та ідеальний відбиток індентора на поверхні сплаву з рівними діагоналями; б) – схема занурення індентора та вимір діагоналей відбитку; в) – вигляд індентора з алмазною пірамідкою

Рисунок 2.8– Схема визначення твердості за Віккерсом [30]



Рисунок 2.9 – Вигляд приладу ПМТ-3.

Мікротвердість у ГПа визначали за величиною діагоналі відбитка [30], використовуючи табличні дані, що надаються приладом. Зона легованого шару та зона термічного впливу оцінювались за допомогою кривих розподілу мікротвердості, які дозволяють точно визначити глибину та характеристики змін у матеріалі після обробки. Для розрахунку значення мікротвердості використовувалася наступна формула:

$$H_{\mu} = 1854 \times P \div (d_{\text{сер}} \times 0,3), \quad (2.5)$$

де H_{μ} – значення мікротвердості;

P – навантаження на індентор (точність визначення маси гирі вагою 20 г складає $\pm 0,1$ мг);

$d_{\text{сер}}$ – середнє значення довжини діагоналі, яке розраховується за формулою :

$$d_{\text{сер}} = (d_{i1} + d_{i2}) \div 2, \quad (2.6)$$

де d_{i1} , d_{i2} – відповідно довжини діагоналей чотирьохкутного відбитка, мкм.

Найбільша основна похибка окуляр-мікрометра на всьому діапазоні вимірювань складає ± 2 мкм у відповідності з паспортом. Похибка вимірювання середнього значення довжини діагоналей відбитка визначається за формулами :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{\text{сер}} - (d_{i1} + d_{i2})/2)^2}{n-1}}, \quad (2.7)$$

де n – кількість вимірювань,

Таким чином, значення мікротвердості визначається за формулою:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.8)$$

$$H_{\mu} = \frac{1,854 \cdot P}{(d_{cp} \pm \sigma_0)^2}, \quad (2.9)$$

де σ_0 – довірчий інтервал.

Відносна похибка вимірювання δH_{μ} визначається :

$$\delta H_{\mu} = \left| \frac{H_{\mu}(d_{cp}) - H_{\mu}(d_{cp} \pm \sigma_0)}{H_{\mu}(d_{cp})} \right| \times 100\%, \quad (2.10)$$

Абсолютна похибка :

$$\Delta H_{\mu} = H_{\mu}(d_{cp}) - H_{\mu}(d_{cp} \pm \sigma_0), \quad (2.11)$$

Коефіцієнт зміцнення ($K_{зм.}$) був визначений як співвідношення найбільшого значення мікротвердості легованого шару ($H_{лш}$) до мікротвердості основи ($H_{осн}$).

$$K_{зм} = \frac{H_{лш}}{H_{осн}}. \quad (2.12)$$

2.3.6 Корозійні випробування

Одним із ключових завдань дослідження була оцінка корозійної стійкості отриманих покриттів у агресивних середовищах, зокрема в 5%-му розчині морської солі. Перед початком випробувань зразки проходили ретельну підготовку: їх очищували від забруднень, знежирювали, висушували при кімнатній температурі та зважували з високою точністю. Потім зразки поміщали у скляні реактори для експозиції в контрольованих умовах. Тривалість тестування становила 1000 годин, після чого продукти корозії акуратно видаляли, а зразки знову зважували для визначення масових втрат.

Для комплексної оцінки глибини корозійного пошкодження застосовувалися як якісні, так і кількісні методи: візуальний огляд поверхні,

мікроскопічний аналіз для виявлення морфології корозійних утворень, а також ваговий метод для точного вимірювання втрати маси зразка.

Кількісна оцінка корозійної стійкості проводилася за допомогою п'ятибальної шкали, що характеризує швидкість втрати маси на одиницю площі та часу, виражену в грамах на квадратний см на годину ($\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{год})$) [31]:

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, \quad (2.13)$$

де Δm – втрата маси зразка при випробуванні, г;

S – загальна площа поверхні зразка, м^2 ;

τ – час випробування, год.

Віднімаючи вагу зразка після випробування від початкової ваги і відносячи різницю до загальної площі поверхні зразка (у м^2) і однієї години випробування, отримують показник корозії за втратою ваги, $\text{г} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$, і перераховують його на втрату ваги, $\text{г} / (\text{м}^2 \cdot \text{рік})$.

Перерахунок обох показників (K і $v_{\text{кор}}$) [31] проводять за формулою:

$$v_{\text{кор}} = 8,76 \cdot \frac{K}{\rho}, \quad (2.14)$$

де $v_{\text{кор}}$ – швидкість корозії, $\text{мм}/\text{рік}$;

ρ – густина, $\text{г}/\text{см}^3$;

K – швидкість корозії, $\text{г} / (\text{м}^2 \cdot \text{рік})$.

За розрахунками $v_{\text{кор}}$ можна дізнатися до якої групи відносяться покриття за своєю корозійною стійкістю. Характеристики корозійної стійкості (КС) конструкцій в США Національна асоціація інженерів-корозіоністів (National Association of Corrosion Engineers (NACE) International) використовує 5 бальну шкалу корозійної стійкості [31] (табл. 2.1)

Таблиця – 2.1 – десятибальна шкала корозійної стійкості [31]:

Бал	Швидкість корозії, мм/рік	Група стійкості
1	<0,1	Дуже стійкі
2	0,1 – 1,0	Стійкі
3	1,1 – 3,0	Зниженої стійкості
4	3,1 – 10,0	Малостійкі
5	>10,1	Нестійкі

2.4 Висновки до розділу 2

Обґрунтовано вибір матеріалу дослідження (сталь Х12МФ) та матеріалів легувальних анодів (цирконію та ніобію) з урахуванням їх взаємної розчинності, здатності до утворення зміцнюючих фаз, таких як карбіди та інтерметаліди.

Здійснено процеси послідовного нанесення Zr та Nb в процесі ЕІЛ сталі Х12МФ. Для дослідження властивостей поверхні після легування застосовано комплексну методику, що включала: гравіметричний, рентгеноструктурний, мікроструктурний, електронно–мікроскопічний, мікродюрOMETричний аналіз та корозійні випробування.

З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Формування електроіскрових покриттів на поверхні сталі Х12МФ при послідовному нанесенні Zr-Nb та Nb-Zr

За допомогою гравіметричного аналізу вивчалася кінетика формування покриття в процесі послідовного нанесення Zr-Nb та Nb-Zr на поверхню сталі Х12МФ під час ЕІЛ. Графіки сумарного приросту маси катоду та сумарної ерозії анодів наведено на рисунках 3.1 та 3.2.

Графік сумарного приросту катоду знаходиться весь час в додатній області протягом 320 с легування, що свідчить про постійне перенесення матеріалу.

Як видно з графіку (рис. 3.1), поступове збільшення приросту маси катоду. Водночас для анода Zr помітне лінійне зменшення маси, що відповідає його ерозії в ході процесу обробки. Ерозія Nb-аноду відбувається різко за суттєво менших проміжків часу нанесення на цирконієве покриття на сталі, одержане протягом першої стадії легування.

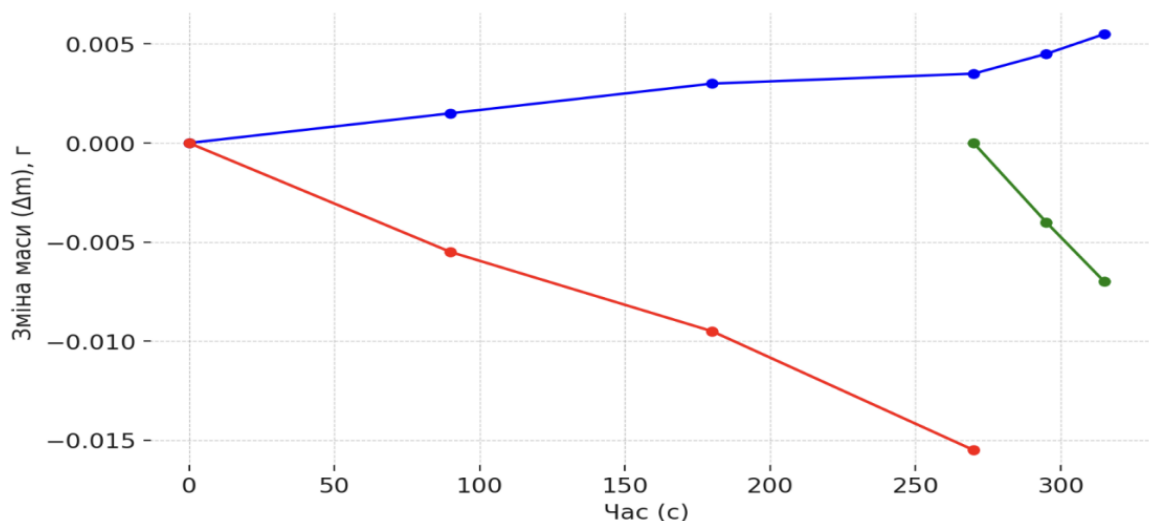


Рисунок 3.1 – Кінетика масоперенесення в процесі ЕІЛ сталі Х12МФ у послідовності Zr-Nb

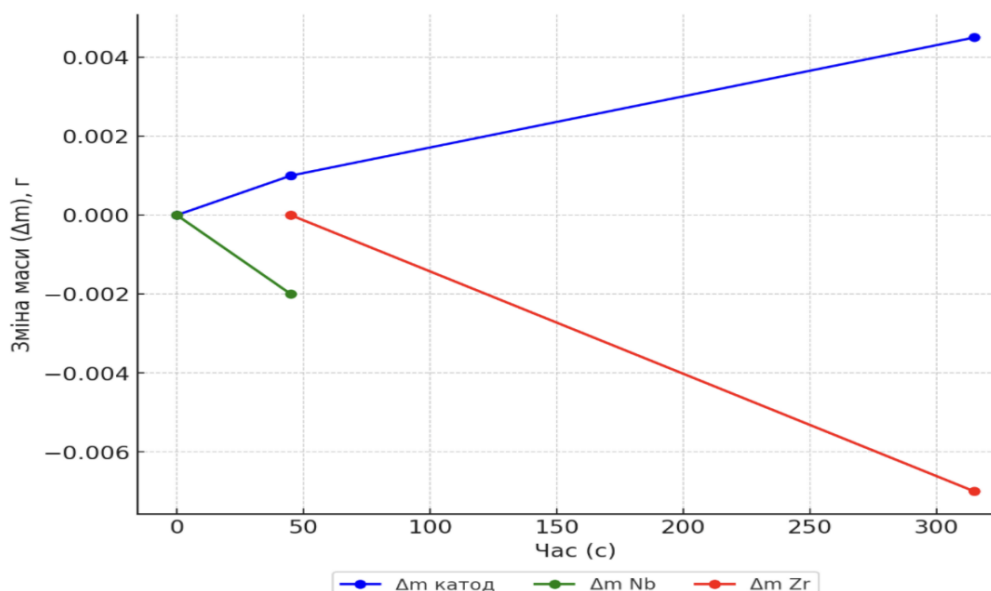


Рисунок 3.2 – Кінетика масоперенесення в процесі ЕІЛ сталі X12МФ у послідовності Nb-Zr

На рисунку 3.2 видно, що зміна маси катода під час обробки у послідовності Nb-Zr відбувається поступово та стабільно, що свідчить про безперервний процес перенесення матеріалу та формування покриття. Водночас зміни маси анодів різняться: маса Nb-аноду швидко знижується на початковому етапі, що вказує на інтенсивну ерозію та активний перенос ніобію, тоді як маса Zr-аноду змінюється більш плавно.

Для чотирьохстадійних процесів (Zr-Nb-Zr-Nb, Nb-Zr-Nb-Zr) перші дві стадії відтворюють кінетичні криві процесів Zr-Nb та Nb-Zr (рис. 3.3, 3.4). Крива ерозії цирконієвого аноду має більш плавне спадання порівняно з ніобієвим електродом. Така поведінка свідчить про стабільність формування покриття з цирконієм, що є важливим для забезпечення однорідності легованого шару та покращення його механічних властивостей, зважаючи на необмежену розчинність металів анодів між собою.

Криві приросту маси анодів обох процесів ЕІЛ, що складаються з чотирьох стадій демонструють нарощування покриття протягом всієї обробки – криві знаходяться у додатній області.

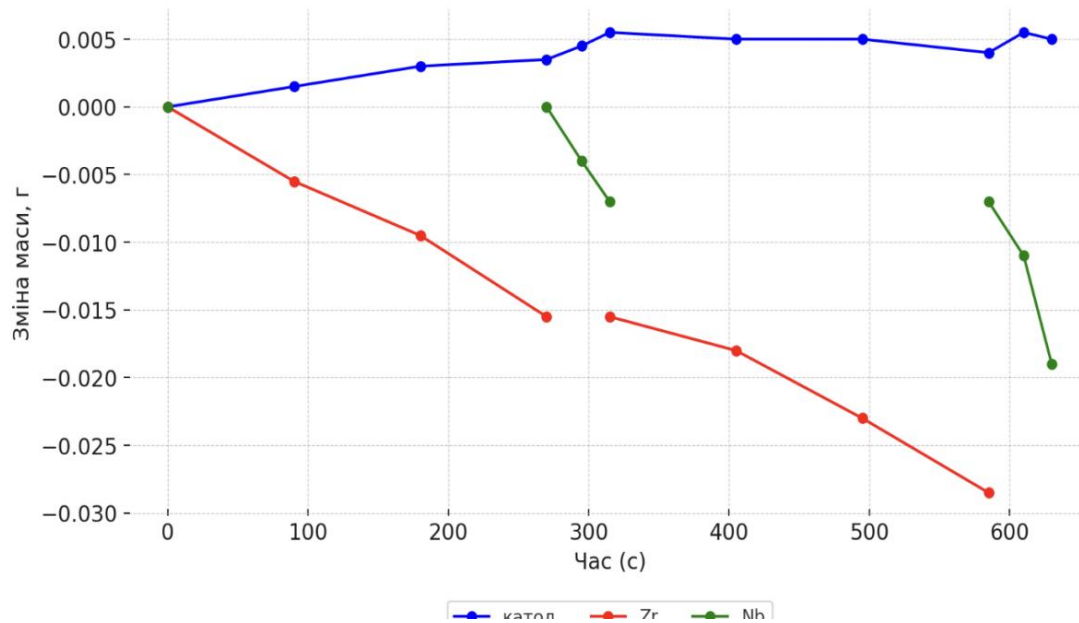


Рисунок 3.3 – Кінетика масоперенесення в процесі ЕІЛ сталі X12МФ у послідовності Zr-Nb-Zr-Nb

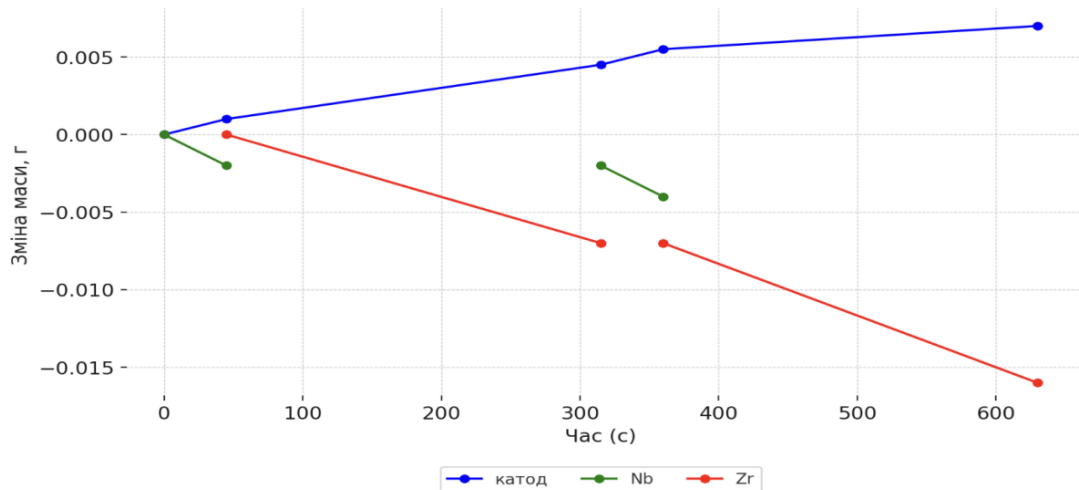
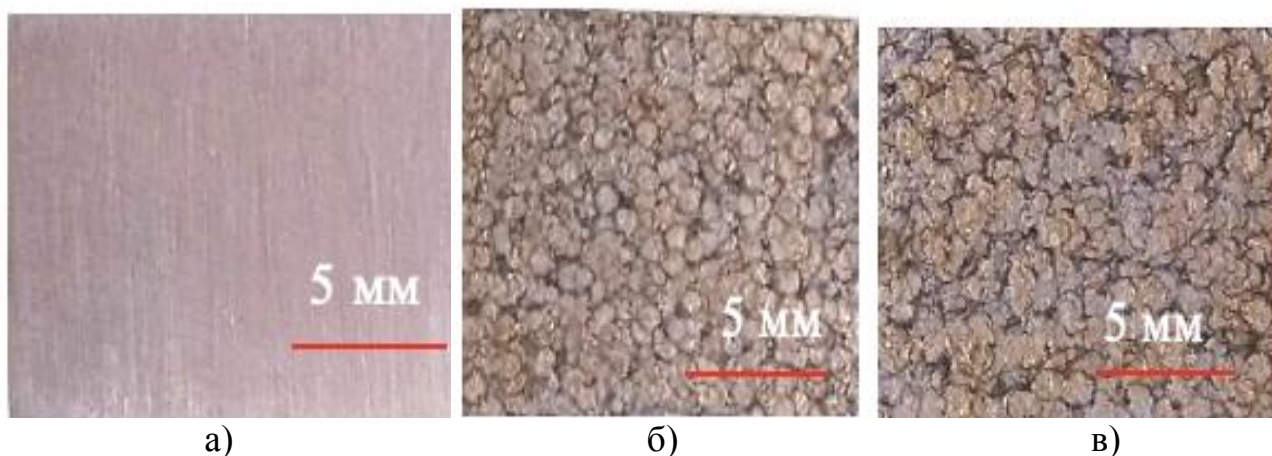


Рисунок 3.4 – Кінетика масоперенесення в процесі ЕІЛ сталі X12МФ у послідовності Nb-Zr-Nb-Zr

Прямим свідченням формування покриттів є модифікована поверхня сталі X12МФ. Фотографії поверхонь ілюструють суттєві зміни у морфології поверхні: початкова гладка поверхня необробленої сталі (рис. 3.5 (а)) набуває характерного структурованого шорсткого рельєфу після ЕІЛ, що свідчить про утворення покриттів. В залежності від послідовності нанесення цирконію та ніобію загальних вигляд їх різняться (рис. 3.5 (б), рис. 3.5 (в)).



а) – необроблена поверхня; б) – після ЕІЛ Zr-Nb; в) – після ЕІЛ Nb-Zr

Рисунок 3.5 – Загальний вигляд поверхні сталі X12МФ до та після нанесення покриттів

Рентгеноструктурний аналіз зразків з нанесеними покриттями дозволив встановити фазовий склад та мікроструктурні параметри у приповерхневій зоні кожного з них. Після проведення ЕІЛ за схемою Zr-Nb у поверхневому шарі сталі X12МФ зареєстровано фази: α -Fe, диоксиду цирконію ZrO_2 , та комплексного нестехіометричного карбіду $CrFe_7C_{0,45}$ (рис. 3.6; табл. 3.1). Крім того, присутність ZrO_2 вказує на можливе утворення оксидної плівки на поверхні, яка може значно підвищити корозійну стійкість покриття. Присутність карбіду $CrFe_7C_{0,45}$ вказує на утворення змішаних карбідних фаз між хромом та залізом. Такі фази можуть утворюватися через високі температури, що досягаються під час електроіскрового розряду, що призводить до активного переносу матеріалів на поверхню катода. Взаємодія між цирконієм, хромом та залізом може викликати утворення нестехіометричних фаз, які забезпечують певну механічну міцність покриття. Зокрема, карбід $CrFe_7C_{0,45}$ є результатом взаємодії вуглецю з хромом та залізом в умовах високої температури. Взаємодія між елементами в результаті електроіскрового процесу дозволяє формувати покриття з підвищеними експлуатаційними властивостями.

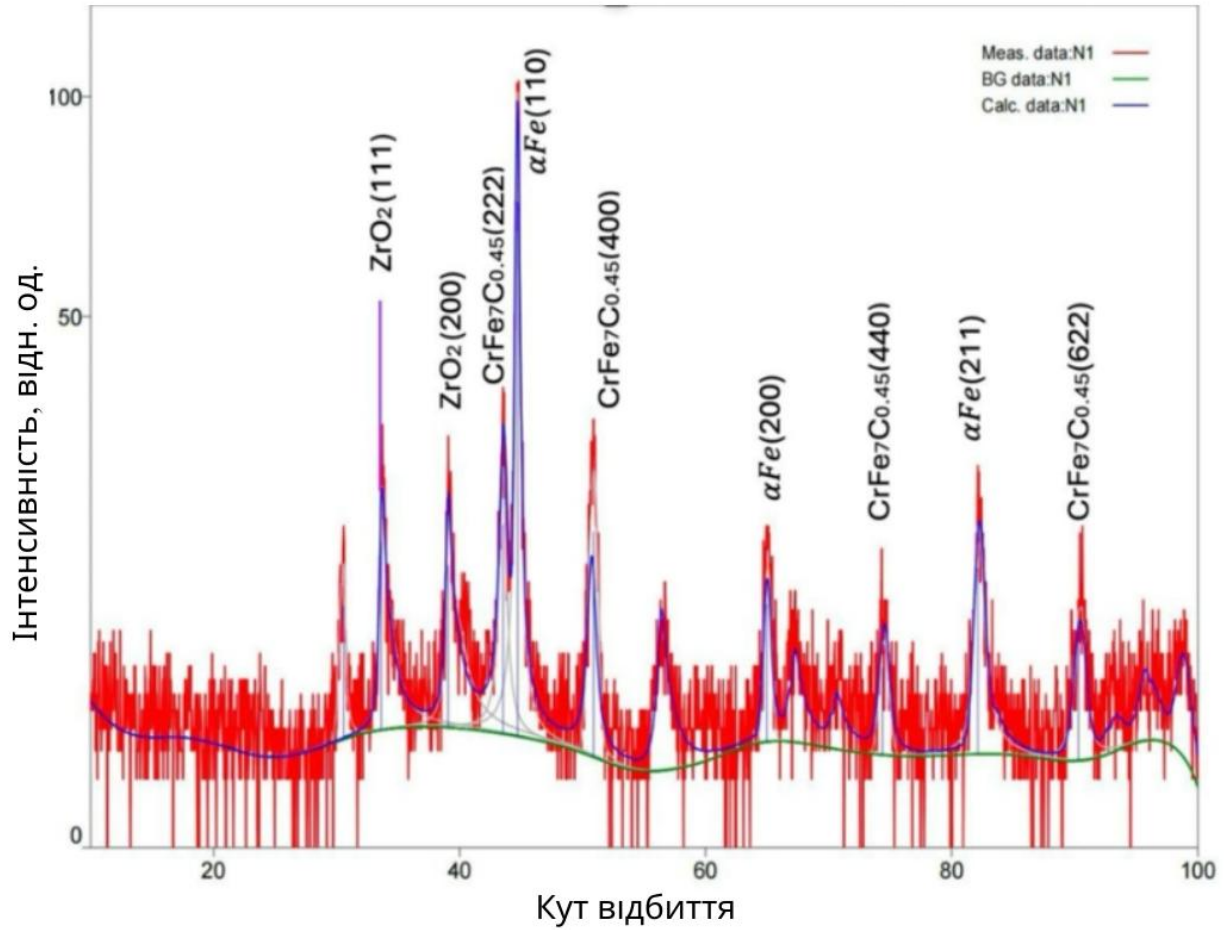


Рисунок 3.6 — Дифрактограма поверхневого шару сталі X12МФ після ЕІЛ у послідовності Zr-Nb

Таблиця 3.1 – Фазовий склад поверхневого шару після ЕІЛ у послідовності Zr-Nb

No.	Інтенсивність, відн. од.	$2\theta^\circ$	$d/n, \text{\AA}$	Фаза (HKL)
1	14	33,64	2,6617	ZrO ₂ (111)
2	12	39,05	2,3047	ZrO ₂ (200)
3	16	43,51	2,0782	CrFe ₇ C _{0,45} (222)
4	72	44,708	2,025	α -Fe(110)
5	16	50,89	1,793	CrFe ₇ C _{0,45} (400)
6	8	64,99	1,434	α -Fe(200)
7	4,2	74,4	1,274	CrFe ₇ C _{0,45} (440)
8	12	82,12	1,1727	α -Fe(211)
9	7	90,31	1,0864	CrFe ₇ C _{0,45} (622)

Збільшений період кристалічної ґратки фази α -Fe (2,8725 Å) (табл. 3.2) є свідченням наявності (окрім заліза) інших компонентів в основі легованої сталі, що вказує на взаємодію заліза з легуючими елементами, такими як цирконій та ніобій, під час процесу електроіскрового легування. Це може бути результатом дифузії атомів легуючих елементів у основний матеріал, що сприяє утворенню нових фазових структур та покращує експлуатаційні властивості сталі.

Таблиця 3.2 – Параметри та вміст фаз поверхневого шару після ЕІЛ у послідовності Zr-Nb

Параметри структури та вміст фаз	Фази		
	α -Fe	ZrO ₂	CrFe ₇ C _{0,45}
Період ґратки a, Å	2,8725	4,627	7,209
D, Å	453	132,3	93,75
$\frac{\Delta d}{d}$, %	0,43	0,7	0,25
Вміст	47,1	30,2	22,7

Обернена послідовність нанесення матеріалів анодів на сталь (Nb-Zr) приводить до формування фаз: аустеніту γ -Fe, сполуки FeCr та оксидів цирконію ZrO, ZrO₂ (рис. 3.7; табл. 3.3). Можна помітити, що при зміні послідовності стадій легування з Zr-Nb на Nb-Zr поряд з ZrO₂ з'являється модифікація – ZrO, але зменшується загальний вміст цих оксидів у покритті (4,3 % та 2,77 % відповідно) проти 30,2 % ZrO₂ для першого процесу. При цьому розмір ОКР збільшується для ZrO₂ зі значення 132,3 Å до 284 Å; для ZrO – становить 170 Å.

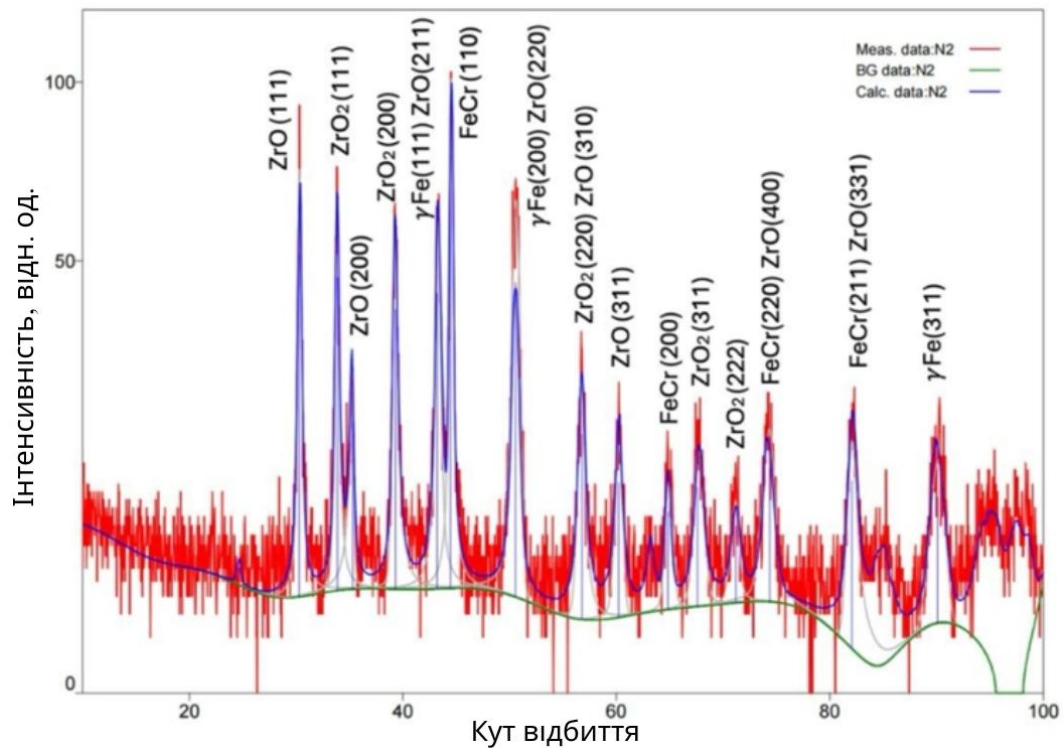


Рисунок 3.7 — Дифрактограма поверхневого шару сталі X12МФ після ЕІЛ у послідовності Nb-Zr

Таблиця 3.3 – Фазовий склад поверхневого шару після ЕІЛ у послідовності Nb-Zr

No.	Інтенсивність, відн. од.	$2\theta^\circ$	$d/n, \text{\AA}$	Фаза (hkl)
1	49	30,28	2,949	ZrO (111)
2	43	33,89	2,643	ZrO ₂ (111)
3	17	35,31	2,540	ZrO (200)
4	37	39,31	2,2898	ZrO ₂ (200)
5	40	43,206	2,0922	γ-Fe(111) ZrO(211)
6	74	44,481	2,0351	FeCr (110)
7	43	50,56	1,8038	γ-Fe(200) ZrO(220)
8	16	56,80	1,6195	ZrO ₂ (220) ZrO (310)
9	10	60,21	1,536	ZrO (311)
10	7	64,84	1,4369	FeCr (200)
11	9	67,62	1,3843	ZrO ₂ (311)
12	5	71,19	1,3235	ZrO ₂ (222)
13	11	74,36	1,2746	FeCr(220) ZrO(400)
14	12	82,07	1,1732	FeCr(211) ZrO(331)
15	9	90,11	1,0883	γ-Fe(311)

При зміні послідовності стадій легування з Zr-Nb на Nb-Zr поряд з ZrO_2 з'являється ZrO , зменшуючи загальний вміст оксидів до 4,3 % та 2,77 % (табл. 3.4) відповідно, порівняно з 30,2 % ZrO_2 для першого процесу. Розмір ОКР для ZrO_2 збільшується з 132,3 Å до 284 Å, а для ZrO становить 170 Å. Збільшення кількості стадій процесу з двох до чотирьох у схемі Zr-Nb-Zr-Nb викликає утворення фаз FeCr, ZrO та NbZrC_2 (рис. 3.8; табл. 3.5).

Таблиця 3.4 – Параметри та вміст фаз поверхневого шару після ЕІЛ у послідовності Nb-Zr

Параметри структури та вміст фаз	Фази			
	ZrO	ZrO_2	$\gamma\text{-Fe}$	FeCr
Період ґратки a, Å	5,089	4,585	3,6233	2,874
D, Å	170	284	168,23	249,9
$\frac{\Delta d}{d}$, %	0,52	0,51	0,426	0,482
Вміст	2,77	4,3	14,7	78,3

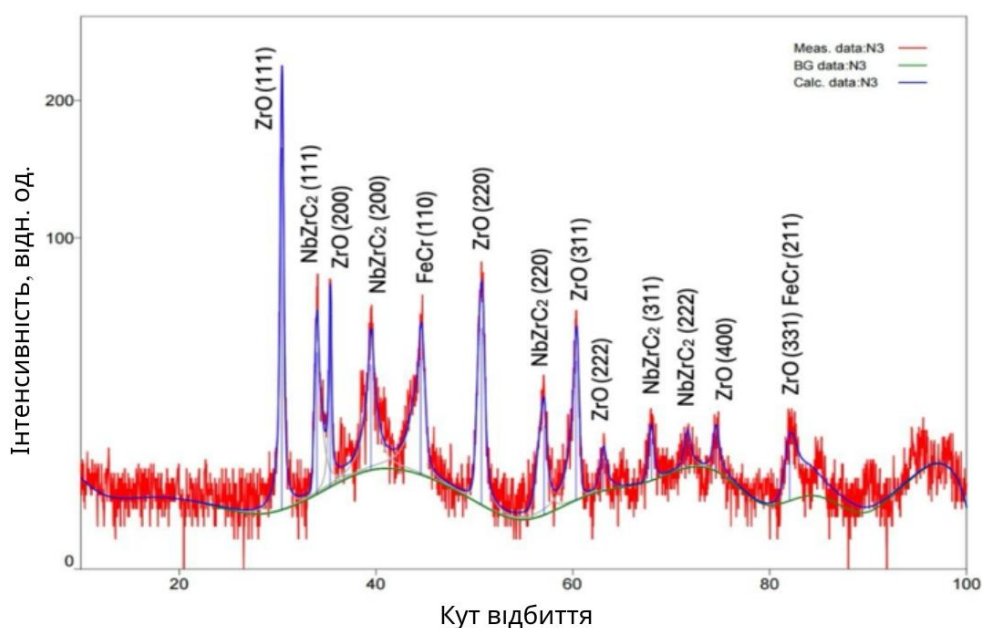


Рисунок 3.8 – Дифрактограма поверхневого шару сталі X12МФ після ЕІЛ у послідовності Zr-Nb-Zr-Nb

Таблиця 3.5 – Фазовий склад поверхневого шару після ЕІЛ у послідовності Zr-Nb-Zr-Nb

№.	Інтенсивність, відн. од.	$2\theta^\circ$	$d/n (\text{\AA})$	Фаза (HKL)
1	159	30,429	2,9351	ZrO (111)
2	38	34,00	2,635	NbZrC ₂ (111)
3	53	35,327	2,5386	ZrO (200)
4	29	39,49	2,2800	NbZrC ₂ (200)
5	32	44,56	2,032	FeCr (110)
6	49	50,72	1,7985	ZrO (220)
7	16	57,07	1,6124	NbZrC ₂ (220)
8	35	60,33	1,5329	ZrO (311)
9	5,6	63,1009	1,47211	ZrO (222)
10	8	68,01	1,3773	NbZrC ₂ (311)
11	5,8	71,6233	1,31644	NbZrC ₂ (222)
12	7,2	74,5265	1,27219	ZrO (400)
13	9	82,05	1,1735	ZrO (331) FeCr (211)

У випадку обробки у послідовності Nb-Zr-Nb-Zr на дифрактограмі спостерігаються лінії фаз: FeCr, оксиду ZrO₂ та комплексних карбідів (NbZrC₂, CrFe₇C_{0,45}) (рис. 3.9; табл. 3.6).

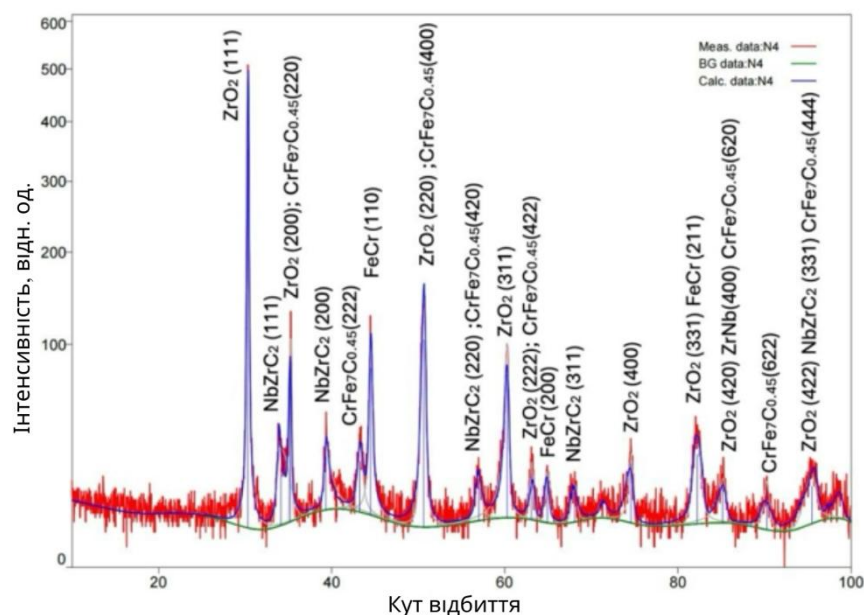


Рисунок 3.9 – Дифрактограма поверхневого шару сталі X12МФ після ЕІЛ у послідовності Nb-Zr-Nb-Zr

Таблиця 3.6 – Фазовий склад поверхневого шару після ЕІЛ у послідовності Nb-Zr-Nb-Zr

№.	Інтенсивність , відн. од.	$2\theta^\circ$	d/n (Å)	Фаза (HKL)
1	350	30,318	2,9456	ZrO ₂ (111)
2	16	34,14	2,624	NbZrC ₂ (111)
3	78	35,199	2,5475	ZrO ₂ (200); CrFe ₇ C _{0.45} (440)
4	18	39,34	2,2883	NbZrC ₂ (200)
5	16	43,24	2,091	CrFe ₇ C _{0.45} (222)
6	75	44,49	2,0348	FeCr (110)
7	101	50,63	1,8014	ZrO ₂ (220); CrFe ₇ C _{0.45} (400)
8	8	57,01	1,6140	NbZrC ₂ (220); CrFe ₇ C _{0.45} (420)
9	70	60,28	1,5341	ZrO ₂ (311)
10	13	63,06	1,4729	ZrO ₂ (222); CrFe ₇ C _{0.45} (422)
11	12	64,93	1,4350	FeCr (200)
12	6,7	68,0645	1,37634	NbZrC ₂ (311)
13	18	74,58	1,2714	ZrO ₂ (400)
14	22	82,22	1,1715	ZrO ₂ (331); FeCr (211)
15	9	85,17	1,1383	ZrO ₂ (420); ZrNb(400); CrFe ₇ C _{0.45} (620)
16	9,1	90,2601	1,08688	CrFe ₇ C _{0.45} (622)
17	9	95,47	1,0408	ZrO ₂ (422); NbZrC ₂ (331); CrFe ₇ C _{0.45} (620)

Детальний розгляд параметрів мікроструктури показав, що оксиди цирконію у покриттях присутні у достатньо великій кількості: 40,3 % ZrO (ЕІЛ за схемою Zr-Nb-Zr-Nb (табл 3.7) та 57,3 % ZrO₂ (ЕІЛ за схемою Nb-Zr-Nb-Zr (табл 3.8)). Періоди ґраток цих оксидів не надто відрізняються: 5,0832 Å (ZrO), та 5,0883 Å (ZrO₂), але розміри ОКР суттєво різняться: для ZrO – 54 Å, а для

ZrO_2 – 444 Å, що в останньому випадку приводить до викривлення кристалічної ґратки до 0,41 %.

Таблиця 3.7 – Параметри та вміст фаз поверхневого шару після ЕІЛ у послідовності Zr-Nb-Zr-Nb

Параметри структури та вміст фаз	Фази		
	ZrO	NbZrC ₂	FeCr
Період ґратки a, Å	5,083239	4,56507	2,873667
D, Å	54	-	-
$\frac{\Delta d}{d}, \%$	0	-	-
Вміст	40,3	33,9	25,8

Таблиця 3.8 – Параметри та вміст фаз поверхневого шару після ЕІЛ у послідовності Nb-Zr-Nb-Zr

Параметри структури та вміст фаз	Фази			
	FeCr	NbZrC ₂	CrFe ₇ C _{0,45}	ZrO ₂
Період ґратки a, Å	2,8729	4,5763	7,228	5,0883
D, Å	268	86,5	213	444
$\frac{\Delta d}{d}, \%$	0,32	0,44	0,63	0,41
Вміст	19,6	13,5	9,6	57,3

Утворений після обох багатостадійних процесів комплексний карбід NbZrC₂ має кубічну ґратку з періодом 4,565 Å та 4,5763 Å. Але вміст його залежить від послідовності нанесення Nb та Zr. Якщо останнім наносився цирконій, то вміст його складає 13,5 %, а якщо ніобій, то – 33,9 %.

Узагальнюючи дані рентгеноструктурного аналізу, одержані під час двохстадійних та чотирьохстадійних ЕІЛ, слід зазначити, що знайдені фази α -

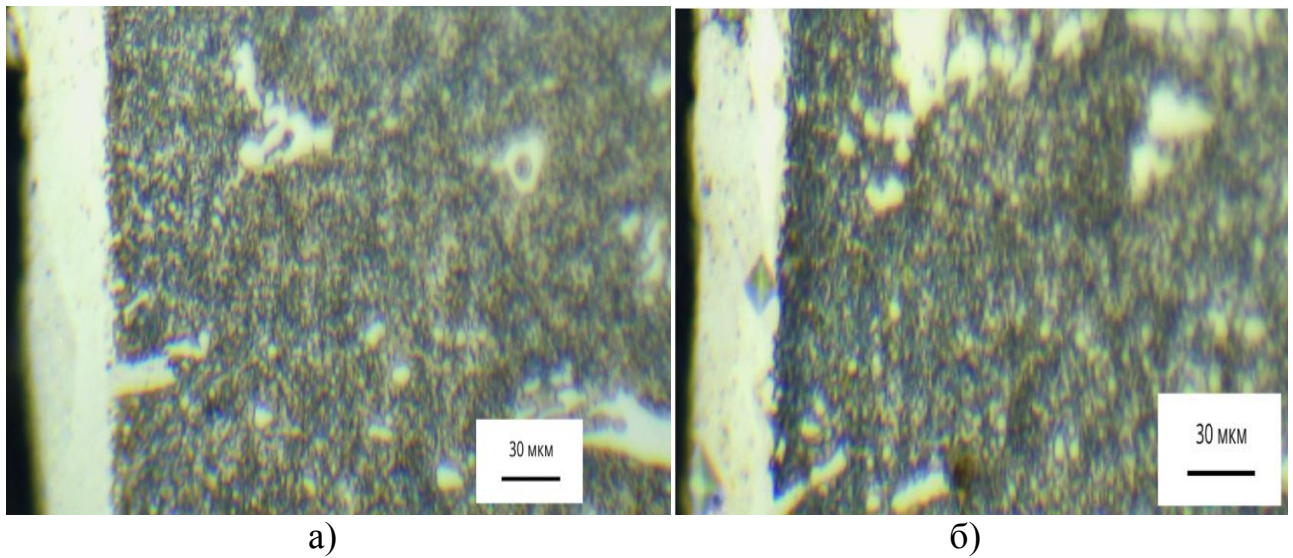
Fe, γ -Fe, FeCr, $\text{CrFe}_7\text{C}_{0,45}$, характерні для основи зразків, – сталі X12МФ. Їх різний вміст у поверхневих шарах після кожного з проведених процесів вказує на нерівномірний концентраційний розподіл, який можна пояснити екстремальними умовами самого процесу ЕІЛ. Під час дії розряду відбувається перемішування матеріалів легувальних анодів з матеріалом основи.

Появу комплексного карбіду NbZrC_2 лише для багатостадійних процесів можна пояснити недостатньою кількістю ніобію для формування будь-яких фаз за його участі під час двостадійних процесів обробки через короткотривалість його нанесення (45 с) у порівнянні з нанесенням цирконію (270 с). Збільшення кількості стадій до чотирьох подвоює тривалість нанесення Nb, але, зважаючи й на збільшення часу легування Zr-анодом, утворення самостійних карбідів ніобію не відбувається.

Наявність ZrO_2 та/або ZrO після усіх проведених процесів легування пояснюється високою здатністю цирконію до утворення оксидів, що виникають під час його взаємодії з повітрям, в якому здійснено ЕІЛ.

За результатами мікроструктурного аналізу поперечних шліфів після ЕІЛ виявлено леговані шари на поверхні сталі X12МФ протяжністю до 40 мкм. З фотографій мікроструктур двостадійних процесів (рис. 3.10) видно, що покриття щільно прилягає до основи, маючи перехідну зону термічного впливу, за яким розташовується основа.

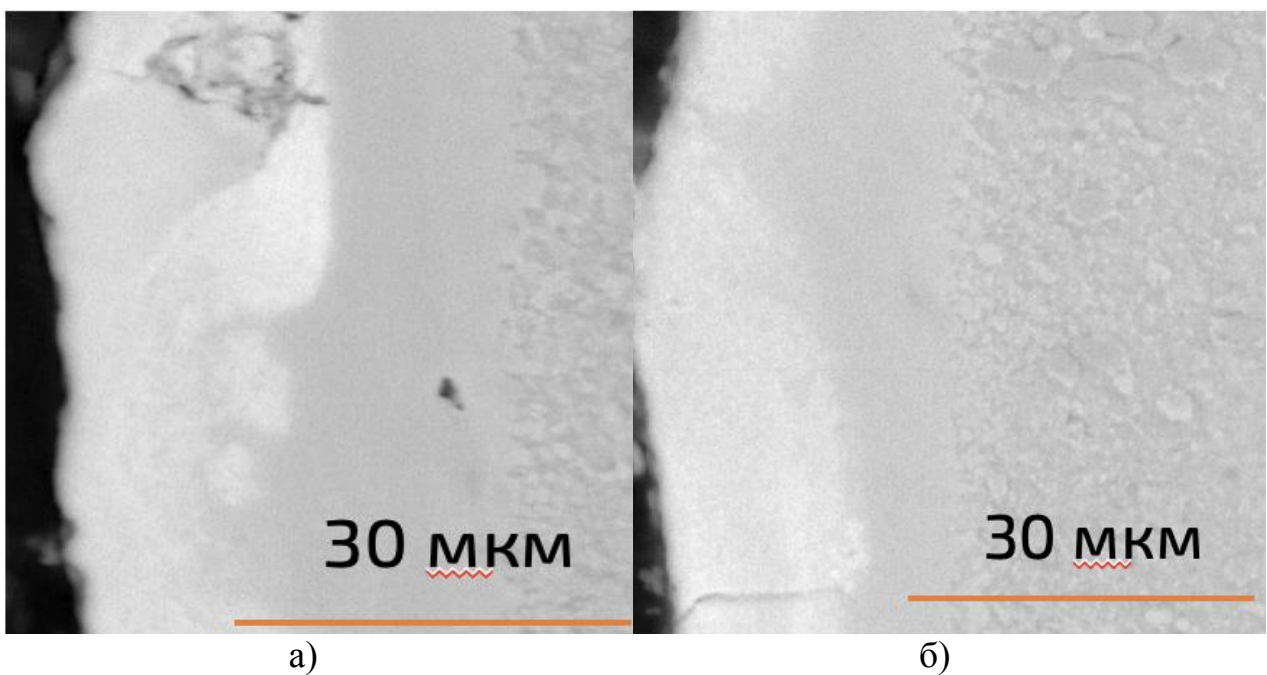
Покриття Zr-Nb є суцільним, товщиною 35 мкм, з різною травимістю ділянок за глибиною (рис. 3.10 (а)). Структура підшару виглядає однорідною та дрібнозернистою, що свідчить про зчеплення покриття з основою. Натомість, у покритті Nb-Zr (рис. 3.10 (б)), товщиною 25 – 30 мкм, спостерігаються незначні тріщинки та наявність зон з різною травимістю, що може вказувати на не рівномірний розподіл компонентів.



a) – Zr-Nb; б) – Nb-Zr

Рисунок 3.10 – Мікроструктура поверхневого шару сталі X12МФ після ЕІЛ

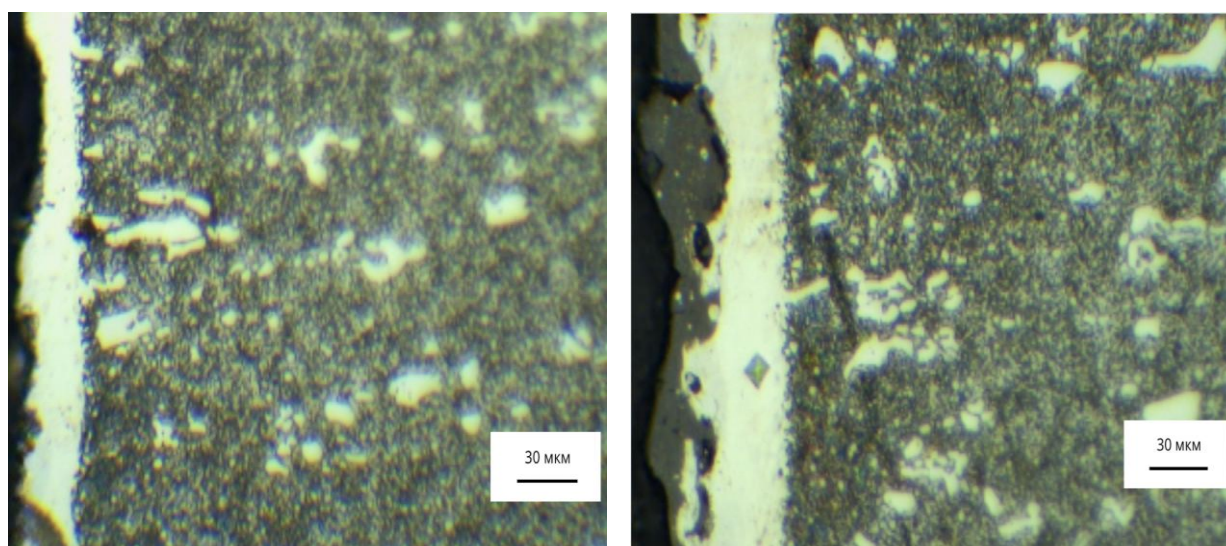
Більш детально розглянути приповерхневі зони сталі з нанесеними покриттями вдалося за допомогою скануючого електронного мікроскопу при зйомці у відбитих променях (рис. 3.11).



a) – Zr-Nb ; б) – Nb-Zr

Рисунок 3.11 – Електронна мікрофотографія структури поверхневої ділянки сталі X12МФ після ЕІЛ

З рисунків 3.12, 3.13, де зображено поверхневу зону сталі Х12МФ з нанесеним Zr-Nb-Zr-Nb та Nb-Zr-Nb-Zr покриттями, чітко простежується щільне прилягання покриття до основи. Товщина шарів від 10 до 30 мкм для покриття Zr-Nb-Zr-Nb, та від 10 до 40 мкм для покриття Nb-Zr-Nb-Zr. Особливістю покриття Nb-Zr-Nb-Zr є наявність тріщин та деяких мікроскопічних пустот, що може бути наслідком локальних термічних напружень або нерівномірності нанесення матеріалу під час обробки. Звертає на себе увагу наявність темних (чорних) фазових утворень у верхній частині поверхневого шару. Ці включення являють собою карбіди або інтерметаліди ніобію або цирконію, які формуються внаслідок взаємодії легуючих елементів із залізом (основи) під впливом високих температур і електроіскрового розряду. Такі фазові утворення можуть підвищувати твердість та зносостійкість покриття, однак їх надмірна концентрація або нерівномірний розподіл здатні викликати локальні напруження і, як наслідок, знижувати механічну цілісність шару, що можна бачити на зображенні.

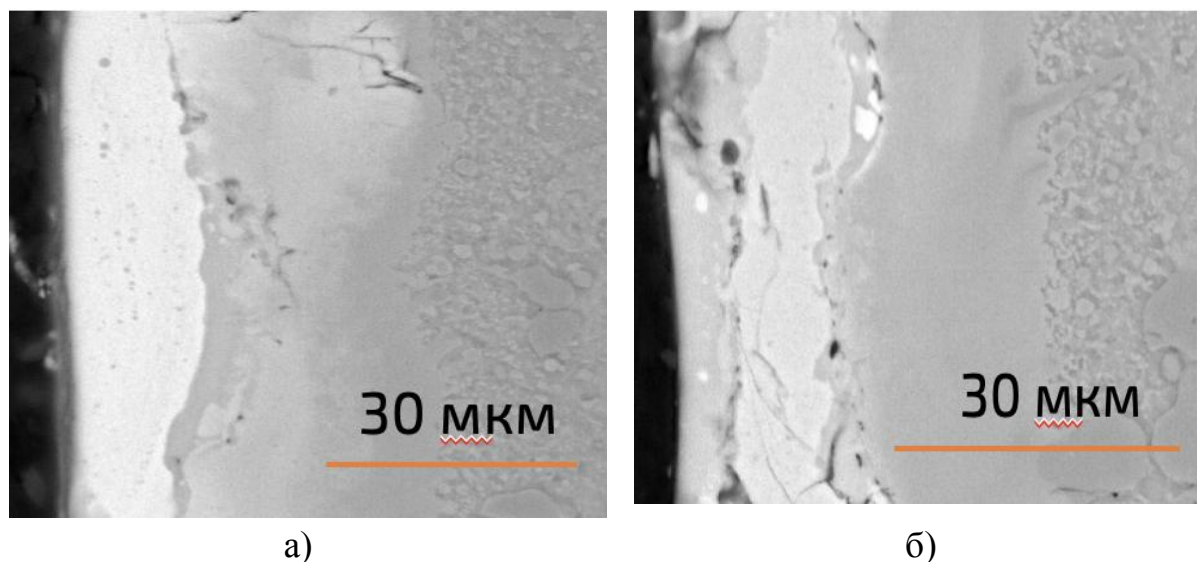


а)

б)

а) – Zr-Nb-Zr-Nb ; б) – Nb-Zr-Nb-Zr

Рисунок 3.12 — Мікроструктура поверхневого шару сталі Х12МФ після ЕІЛ



а) – Zr-Nb-Zr-Nb ; б) – Nb-Zr-Nb-Zr

Рисунок 3.13 – Електронна мікрофотографія структури поверхневої ділянки сталі X12МФ після ЕІЛ

3.2 Мікротвердість та корозійна стійкість електроіскрових Zr-Nb та Nb-Zr покриттів на сталі X12МФ

МікродюрOMETричний аналіз після ЕІЛ Zr-Nb та Nb-Zr (рис. 3.14, рис 3.15) показав, що після двостадійного процесу у послідовності Nb-Zr мікротвердість легованого шару становить 13 ГПа, а на деяких ділянках і 16 ГПа. Найменшу з усіх проведених процесів мікротвердість має покриття Zr-Nb – 6 ГПа.

Згідно інтерполяційних кривих, максимальна твердість концентрується у верхньому шарі на глибині приблизно (10 – 15) мкм від поверхні, після чого поступово знижується із збільшенням відстані. Така тенденція свідчить про утворення зміцнювальних фаз у поверхневих шарах, що значно підвищує міцність матеріалу.

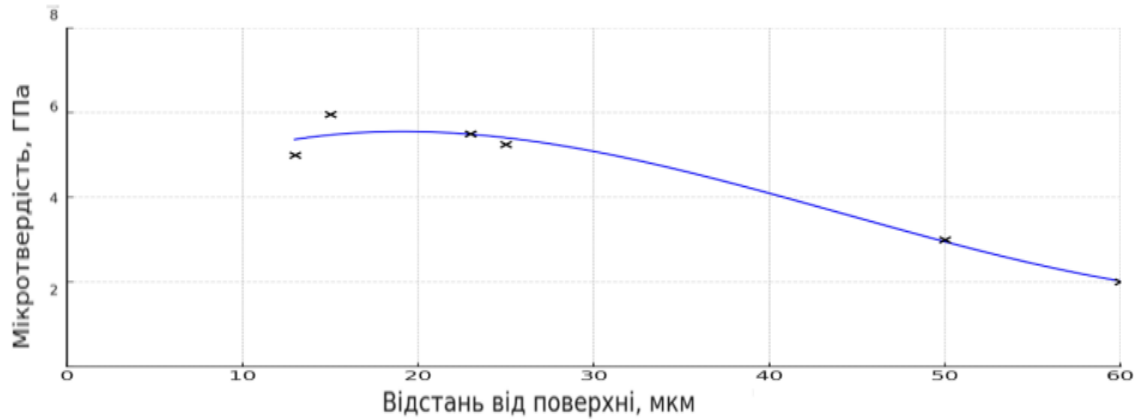


Рисунок 3.14 – Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі X12МФ після ЕІЛ Zr-Nb

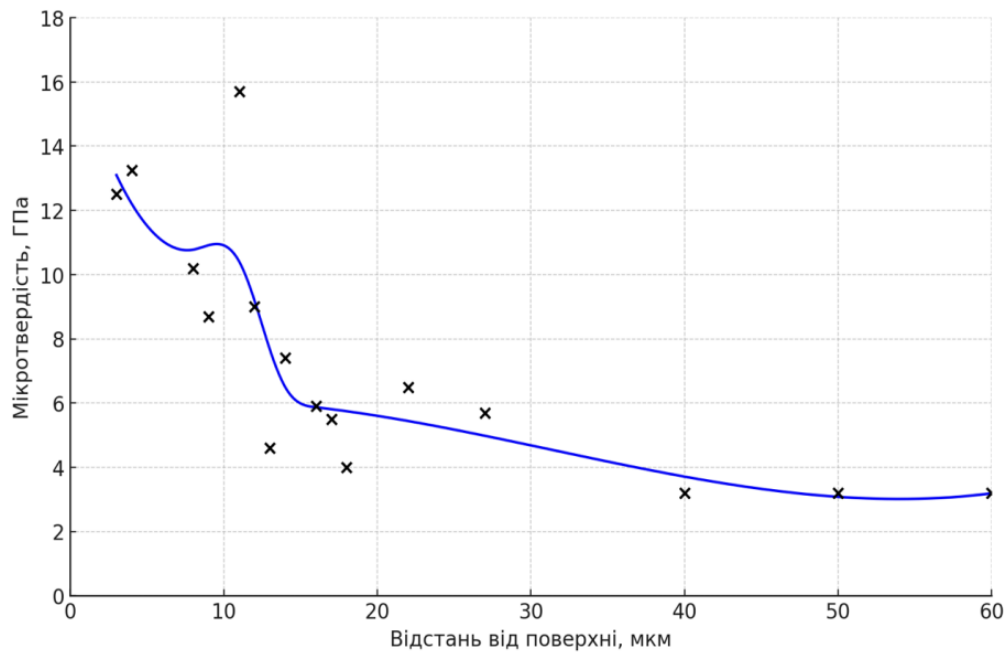


Рисунок 3.15 – Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі X12МФ після ЕІЛ Nb-Zr

Максимальні значення мікротвердості поверхневих шарів сталі X12МФ спостерігаються після електроіскрового легування у чотири стадії: за схемою Nb-Zr-Nb-Zr досягають значень 22 ГПа (рис 3.16), а за схемою Zr-Nb-Zr-Nb – 16 ГПа (рис 3.17).

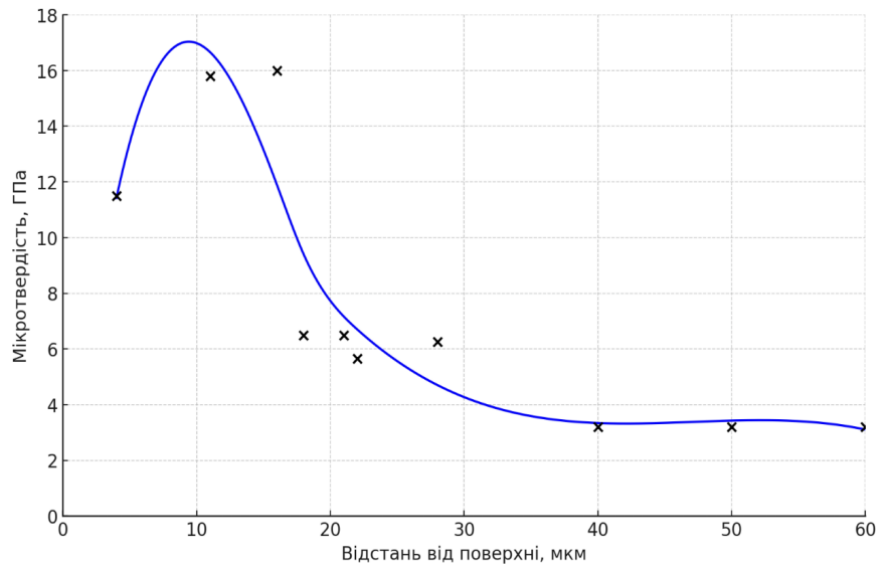


Рисунок 3.16 – Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі X12МФ після EIJ Zr-Nb-Zr-Nb

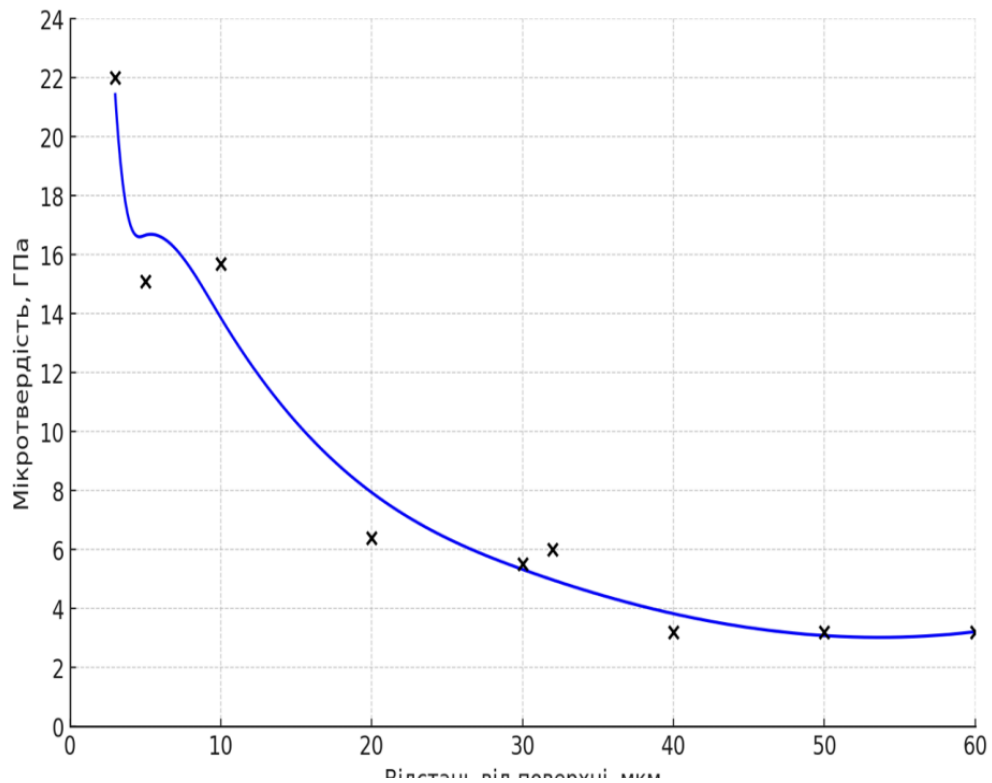


Рисунок 3.17 – Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі X12МФ після EIJ Nb-Zr-Nb-Zr

Підсумовуючи результати мікродюрOMETричного аналізу, можна прийти до висновку, що після всіх проведених процесів обробки спостерігається зростання поверхневої мікротвердості сталі X12МФ.

Найбільші значення мікротвердості мають покриття Nb-Zr-Nb-Zr (22 ГПа) та Nb-Zr (21,5 ГПа). Мікротвердість покриття Zr-Nb-Zr-Nb становить 15,8 ГПа, а найменше значення – у покриття Zr-Nb – 6,5 ГПа.

Розраховані коефіцієнти зміцнення за співвідношенням максимальної мікротвердості покриття до матеріалу основи (3,25 ГПа) після ЕІЛ є такими: Zr-Nb – 2; Nb-Zr – 6,6; Zr-Nb-Zr-Nb – 4,9; Nb-Zr-Nb-Zr – 6,8.

Попри високу мікротвердість легованих шарів, одержаних під час чотиристадійних процесів, як негативний фактор, слід зауважити їх підвищену крихкість, що виявляється на мікроструктурах тріщинами внаслідок наявності в них комплексного карбіду NbZrC₂.

Вивчаючи вплив послідовності нанесення легувальних елементів на максимальну мікротвердість покриттів, можна помітити, що найбільші її значення встановлені після ЕІЛ, де першим наносився ніобій. Для цих же процесів гравіметричним методом знайдені й найбільші коефіцієнти перенесення матеріалу.

Збільшення кількості стадій обробки з двох до чотирьох збільшує максимальну мікротвердість легованих шарів у 2,4 рази лише у випадку, коли першим наносився цирконій, тобто за схемами Zr-Nb (6,5 ГПа) та Zr-Nb-Zr-Nb (15,8 ГПа). Для ЕІЛ за схемами Nb-Zr та Nb-Zr-Nb-Zr такої залежності не спостерігається. Значення максимальної мікротвердості цих покриттів – 21,5 ГПа та 22 ГПа відповідно, знаходяться у межах похибки.

Хоч ніобій присутній і в схемі Zr-Nb, початок легування з цирконію впливає на формування початкового шару – цирконій утворює більш стабільну оксидну плівку, яка уповільнює ерозію та масоперенос ніобію. У схемах, що починаються з ніобію, цей ефект відсутній, що дозволяє ніобію активніше переноситись і формувати щільніший, твердіший покриттєвий шар з вищим коефіцієнтом зміцнення (рис. 3.18). Це може бути зумовлено тим, що ніобій, не зіштовхуючись з оксидними плівками, які утворюються при нанесенні цирконію, має більший потенціал для інтенсивної ерозії і переносу матеріалу, що призводить до створення покриття з кращими механічними властивостями.

Коефіцієнти зміцнення для різних схем легування: за схемою Zr-Nb коефіцієнт зміцнення $K = 2$; для Nb-Zr $K = 6,61$; для Zr-Nb-Zr-Nb $K = 4,9$; для Nb-Zr-Nb-Zr $K = 6,8$. Це вказує на те, що схема легування, що починається з ніобію, дає найбільший ефект зміцнення, що робить її найбільш ефективною для досягнення бажаних властивостей покриття.

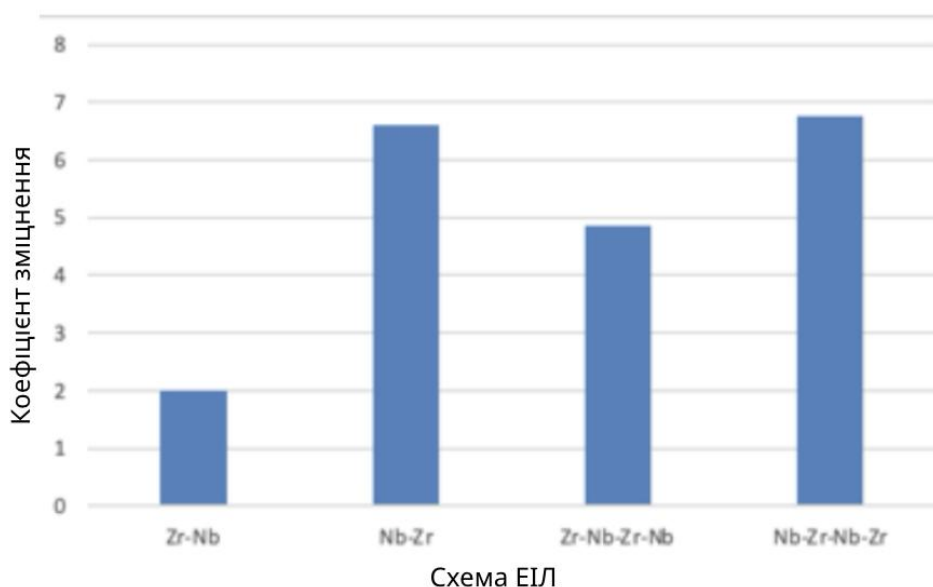


Рисунок 3.18 – Коефіцієнт зміцнення в залежності від схеми ЕІЛ

Дослідження корозійної стійкості зразків після ЕІЛ за схемами Zr-Nb та Nb-Zr, а також сталі Х12МФ у вихідному стані (для порівняння) проводилося у 5 %-му розчині морської солі у воді протягом 1000 годин.

Під час проведення корозійних випробувань контакту з середовищем зазнавала тільки одна з граней зразків з нанесеним покриттям та поверхня сталі Х12МФ без покриття, рівнозначна за площею ($1,3 \text{ см}^2$). Для ізолювання інших граней зразків від агресивного середовища на них наносився шар силікону.

Якісна оцінка стану поверхні досліджуваних зразків з покриттями та без нього надавалася на початку, періодично під час та після випробувань шляхом візуального спостереження з фотографічною реєстрацією.

Перед корозійними випробуваннями на фото вихідної сталевий поверхні помітні незначні подряпини, отримані шліфуванням на абразивному папері

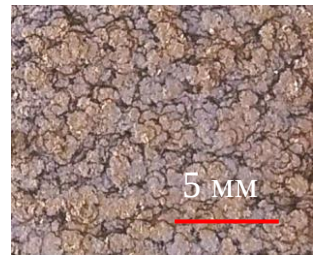
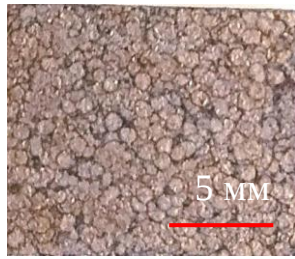
дрібної зернистості Р 2500 (рис. 3.19 а). Поверхні покриттів Zr-Nb (рис. 3.19 б) та Nb-Zr (рис. 3.19 в) відрізняються за морфологією в залежності від матеріалу аноду, який останнім наносився під час ЕІЛ. Вони являють собою структури з утвореннями колоподібної форми діаметром (0,2 – 0,5) мм відповідно.

В процесі дослідження періодично відбувалося фотографування кородуючих поверхонь. Після 240 годин випробувань були зафіксовані осередки корозії на кожному зразку у вигляді нальоту іржі різного ступеню. Подальші спостереження, зокрема, після 360 та 480 годин перебування зразків у сольовому розчині було зафіксоване прогресування корозії.

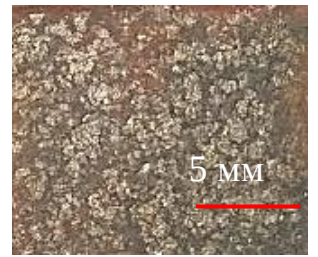
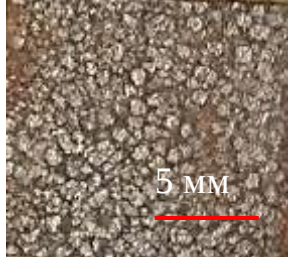
По завершенні випробувань наліт іржі розповсюдився по більшій частині площі сталевго зразка без покриття. На відміну від сталевго зразка поверхні з покриттями значно менше зазнали корозії. А найменше серед усіх сліди корозії помітні на сталі з електроіскровим покриттям Zr-Nb. Зі збільшенням часу експозиції в агресивному середовищі спостерігалось поступове збільшення товщини корозійного нальоту на поверхні зразків без покриття, що вказує на значне погіршення корозійної стійкості сталі Х12МФ без електроіскрового покриття. На поверхнях з покриттям Zr-Nb, порівняно з зразками без покриття, корозія була значно меншою, а зразки з електроіскровим покриттям Nb-Zr та Zr-Nb-Zr-Nb демонстрували меншу корозійну активність, що підтверджує їх підвищену корозійну стійкість. За допомогою визначених коефіцієнтів корозії і швидкості корозії було оцінено, що поверхневі покриття на основі Zr та Nb ефективно знижують процеси корозії навіть за тривале перебування зразків у соляних розчинах.

Масовий коефіцієнт корозійної стійкості (K_m) визначався за співвідношенням втрати маси та добутку площі на час випробувань (за формулою 2.13). Швидкість корозії ($v_{кор.}$) розраховували за формулою 2.14 з урахуванням густини матеріалу. Для покриттів брали густину сплаву ZrNb на основі цирконію – $\rho = 7 \text{ г/см}^3$; для сталі Х12МФ – $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$.

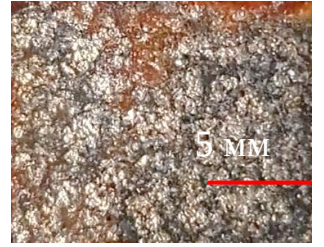
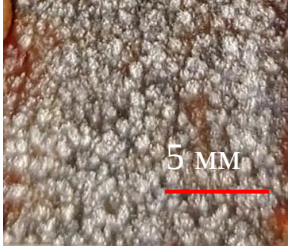
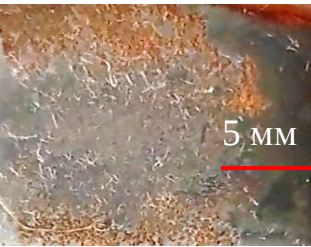
1



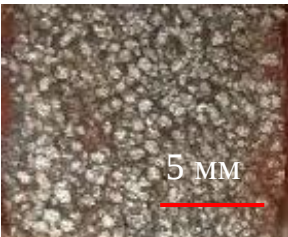
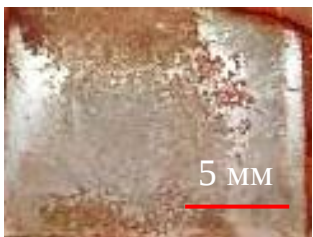
2



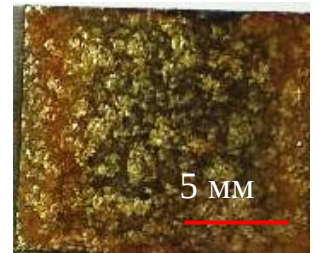
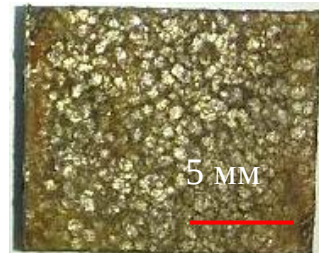
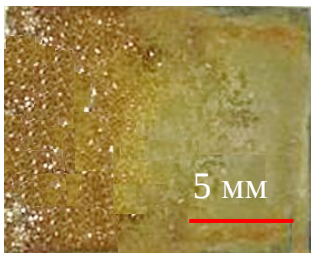
3



4



5



а

б

в

1 – на початку випробувань; 2 – 240 годин випробувань; 3 – 360 годин випробувань; 4 – 480 годин випробувань; 5 – після випробувань (1000 годин)

а – без покриття, б – з покриттям Zr-Nb, в – з покриттям Nb-Zr

Рисунок 3.19 – Структура поверхні зразків сталі Х12МФ

Результати розрахунків показників стійкості до корозії наведені у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати випробувань на корозійну стійкість поверхні сталі Х12МФ у 5 %-му розчині морської солі

Матеріал	Маса зразка до випробування m_0 , г	Маса зразка після випробування m_k , г	Втрата маси зразка Δm , г	Коефіцієнт корозійної стійкості $K_m \cdot 10^{-6}$, г/м ² ·год.	Швидкість корозії ($v_{кор.}$) мм/рік	Група корозійної стійкості
Сталь Х12МФ	4,9820	4,9780	0,004	3,077	0,270	2 (стійке)
Покриття Zr-Nb	4,6935	4,6915	0,002	1,538	0,135	2 (стійке)
Покриття Nb-Zr	4,9805	4,9780	0,0025	1,923	0,168	2 (стійке)

Як можна помітити, всі поверхні зразків, оцінені за п'ятибальною шкалою корозійної стійкості [31], є стійкими. Обидва покриття мають меншу швидкість корозії в розчині морської солі у порівнянні зі сталеву поверхню. Тобто корозійна стійкість легованого шару, одержаного процесі обробки за схемою Zr-Nb у 2 рази, а легованого шару Nb-Zr – у 1,6 разів перевищує значення нелегованої сталі. Порівняння покриттів між собою приводить до висновку, що корозійна стійкість ZrNb- покриття у 1,24 рази більше відповідної величини для Nb-Zr- покриття.

Кількісна оцінка корозійної стійкості усіх зразків від найменшого до найбільшого значення швидкості корозії в ряду: сталь Х12МФ з покриттям

ZrNb – сталь X12МФ з покриттям NbZr – сталь X12МФ без пориття, – цілком узгоджується з якісною (візуальною) оцінкою поверхонь.

Поясненням зафіксованого факту може стати те, що корозійна стійкість покриттів цирконію та ніобію є високою в багатьох середовищах, особливо при нанесенні у вигляді тонких шарів або сплавів, що зумовлено їхніми унікальними хімічними та фізичними властивостями, зокрема, здатністю утворювати стійкий оксидний шар, який запобігає подальшому корозійному процесу.

Сплав Zr-Nb, зокрема Zr-1%Nb, відомий своєю високою корозійною стійкістю. Навіть невеликі добавки заліза, яке потрапляє зі сталевोї основи під час перемішування матеріалів протягом ЕІЛ, до ZrNb покриття може покращити корозійну стійкість за рахунок зміни структури та появи виділень фази Лавеса.

3.3 Висновки до розділу 3

Встановлено ефективність застосування електроіскрового легування для створення покриттів на сталі X12МФ з послідовним нанесенням покриттів Zr–Nb, Nb–Zr при зміні послідовності та кількості стадій обробки.

Кінетичні криві приросту маси катоду за даними гравіметричного аналізу свідчать про ефективне масоперенесення в процесі ЕІЛ під час формування покриття, оскільки знаходяться у додатній області.

Товщина легованих шарів становить близько 30 мкм, що підтверджено результатами мікроструктурного аналізу.

Максимальне значення мікротвердості в поверхневому шарі зафіксовано для покриття Nb-Zr-Nb-Zr (22 ГПа).

Виявлено, що всі зразки є стійкими до корозії у розчині морської солі протягом 1000 годин випробувань, а їх швидкості корозії можна розташувати в

ряд від найменшого до найбільшого значення: сталь Х12МФ з покриттям ZrNb – сталь Х12МФ з покриттям NbZr – сталь Х12МФ без покриття.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність НДР

Сталь Х12МФ є однією з найбільш широко використовуваних сталей інструментального призначення завдяки своїм високим механічним властивостям та оптимальному співвідношенню ціни і якості. Вона часто застосовується для виготовлення деталей машин, ріжучих інструментів, компонентів двигунів і в інших конструкціях, де необхідна висока зносостійкість, міцність і зручність обробки. Оскільки сталь Х12МФ використовують у різних галузях промисловості, зокрема в металообробці, гірничій промисловості та в машинобудуванні, підвищення її експлуатаційних характеристик є важливим завданням.

Одним із ефективних способів покращення її властивостей є електроіскрове легування (ЕІЛ), яке дозволяє створювати зносостійкі покриття. ЕІЛ є економічно вигідним, екологічно чистим методом, що не потребує складного обладнання та значних енерговитрат. Цей метод забезпечує високі показники адгезії покриття до основного матеріалу і точний контроль над товщиною покриття. В результаті використання ЕІЛ можна значно поліпшити твердість, зносостійкість і жаростійкість сталі Х12МФ, що є особливо важливим для компонентів, що працюють під високими навантаженнями і при підвищених температурах.

Окрім механічних властивостей, покриття, отримані методом ЕІЛ, володіють корозійностійкими властивостями, що дозволяє значно розширити сферу застосування сталі Х12МФ в агресивних середовищах, таких як морська вода або кислі розчини. Таким чином, ці покриття можуть використовуватись для створення високоякісних виробів, які мають високу стійкість до корозії, зносу та температурних коливань, що сприяє підвищенню їх довговічності та зниженню витрат на обслуговування і заміну деталей.

Легування Zr і Nb на поверхню сталі Х12МФ дозволяє створювати функціональні покриття, здатні витримувати високі навантаження та агресивні середовища. Такий підхід є особливо актуальним для виготовлення компонентів, що експлуатуються в умовах високих температур, механічних навантажень, а також в агресивних хімічних середовищах, таких як кислотні чи соляні розчини. Цей процес дозволяє значно покращити експлуатаційні характеристики виробів без потреби заміни всієї деталі, що робить процес більш економічно вигідним і технологічно ефективним.

4.2 Мета і завдання НДР

Мета даної роботи полягає у вивченні кінетики формування, мікроструктури, фазового складу та мікротвердості поверхневих шарів сталі Х12МФ після електроіскрового легування анодами Zr та Nb з різними послідовностями їх нанесення. Це дозволить детально оцінити вплив різних варіантів легування на властивості поверхневих шарів сталі, що є важливим для розуміння механізмів покращення її експлуатаційних характеристик.

Для досягнення поставленої мети буде здійснено огляд сучасних досліджень і технологій у сфері електроіскрового легування високолегованих сталей із застосуванням анодів Zr та Nb. Це дасть можливість сформулювати теоретичну основу та підготувати експериментальні умови для подальшого проведення досліджень.

Також буде розроблена методика для проведення експериментів, що включатиме процеси електроіскрового легування сталі Х12МФ з використанням анодів Zr та Nb. Це дасть змогу точно налаштувати параметри процесу та забезпечити стабільність результатів при нанесенні покриттів.

Зразки сталі Х12МФ будуть підготовлені для електроіскрового легування, після чого на них будуть нанесені покриття за різними схемами (Zr-Nb, Nb-Zr, Zr-Nb-Zr-Nb та Nb-Zr-Nb-Zr). Для аналізу отриманих поверхневих шарів буде проведено гравіметричний аналіз, який дозволить визначити приріст маси

катоду та ерозію анодів. Це дасть змогу оцінити ефективність процесу масопереносу при різних послідовностях нанесення покриттів.

МікродюрOMETричний аналіз дозволить визначити мікротвердості поверхневих шарів з різними покриттями. Водночас, мікроструктурний аналіз допоможе вивчити структуру покриттів, їх однорідність та взаємодію між матеріалами катода та анода. Рентгенофазовий аналіз дозволить детально вивчити фазовий склад покриттів, а корозійні випробування дадуть змогу оцінити корозійну стійкість матеріалів у агресивних середовищах.

Після завершення усіх досліджень та аналізу отриманих результатів буде оцінено вплив кожної стадії процесу на зміни в характеристиках сталі X12МФ, таких як твердість, зносостійкість, корозійна стійкість та мікроструктура. Це дозволить визначити оптимальні умови для досягнення найкращих механічних та фізичних властивостей покриттів. На основі отриманих даних буде сформульовано рекомендації для подальших досліджень і застосування електроіскрового легування для покращення експлуатаційних характеристик сталі X12МФ. Окрім того, в результаті досліджень буде оцінено економічну ефективність цього процесу, що дозволить вирішити питання щодо доцільності широкого використання даної технології в промисловості. Завдяки отриманим результатам, будуть визначені перспективи використання електроіскрового легування в інших галузях промисловості, де потрібні високі механічні властивості та корозійна стійкість.

4.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження

Планова собівартість є одним з найважливіших економічних показників, оскільки вона відображає рівень матеріальних та трудових витрат, що впливають на загальну ефективність проекту. Її планування дає можливість досягти бажаних результатів при мінімальних витратах. Для розрахунку планової собівартості НДР враховуються такі статті: заробітна плата науково-дослідницького персоналу, єдиний соціальний внесок, вартість матеріалів, що

використовуються для виконання досліджень, витрати на спеціальне обладнання, необхідне для проведення експериментів, а також витрати на службові відрядження. Окрім того, враховуються й інші прямі невраховані витрати, а також накладні витрати, що складаються з витрат, пов'язаних з організацією роботи, але не з конкретними статтями витрат. Це дає змогу більш точно прогнозувати фінансові витрати та забезпечити ефективне використання ресурсів.

4.3.1 Визначення заробітної плати науково-дослідницького персоналу

Розрахунок заробітної плати науково-дослідницького персоналу заснований на визначенні трудомісткості виконання НДР та їх денної заробітної плати. У виконанні даної НДР приймали участь виконавці: провідний науковий співробітник, старший науковий співробітник та інженер-дослідник.

Для КПІ ім. Ігоря Сікорського посадові заробітні плати сягають:

- провідного наукового співробітника – 11954 грн;
- старшого наукового співробітника – 10932 грн;
- інженера-дослідника – 10133 грн.

Для кожного з виконавців денна заробітна плата визначається як місячна заробітна плата поділена на середню кількість днів у місяці. Вбачаючи, що робочий тиждень складає п'ять днів, середня кількість днів у місяці становить 21.

$$\text{Денна заробітна плата} = \frac{\text{Місячна заробітна плата}}{21}, \#(4.1)$$

Тому денна заробітна плата виконавців НДР складає:

- провідного наукового співробітника – $\frac{11954}{21} = 569,23$ грн;
- старшого наукового співробітника – $\frac{10932}{21} = 520,57$ грн;
- інженера - дослідника – $\frac{10133}{21} = 482,35$ грн.

Трудовіткість окремих етапів виконання НДР наведена у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Трудовіткість окремих етапів виконання НДР

Етапи НДР		Трудовіткість, люд.-дні		
		Провідний науковий співробітник	Старший науковий співробітник	Інженер-дослідник
1. Аналіз фахових публікацій з теми		7	3	0
2. Обґрунтування мети та напрямів дослідження		4	4	0
3. Розробка методики проведення досліджень за темою		6	5	2
4. Проведення експерименту	Утворення іскрового проміжку	5	10	2
	Формування плазми			
	Транспортування частинок до поверхні заготовки			
	Розплавлення поверхні заготовки			
	Утворення однорідного покриття			
	Затвердіння покриття			
5. Обговорення результатів НДР		6	8	1
Всього		28	30	5

Величина заробітної плати (ЗП) виконавців обчислюється, як сума добутків трудовіткості та денної заробітної плати:

$$\text{ЗП} = 28 \cdot 521.14 + 30 \cdot 457.14 + 5 \cdot 392.04 = 33967.29 \text{ грн}$$

4.3.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску

Норматив відрахувань приймається у відсотках, відповідно до діючого законодавства складає 22 % від заробітної плати.

$$BC = 0,22 \cdot ЗП, \#(4.2)$$

$$BC = 0,22 \cdot 33967.29 = 7472.80 \text{ грн.}$$

4.3.3 Визначення вартості матеріалів для виконання НДР

Для виконання поставленої мети НДР необхідні матеріали, дані про які занесені до табл. 4.2

Таблиця 4.2 – Вартість основних матеріалів

Назва матеріалу	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна за одиницю	Загальна вартість
Сталь Х12МФ	кг	0,5	220 грн/кг	110 грн
Цирконій	кг	0,5	3900 грн/кг	1950 грн
Ніобій	кг	0,5	5000 грн/кг	2500 грн
Разом				4560

Транспортно-заготівельні витрати (Втр) приймається у розмірі 10 % від повної вартості матеріалів:

$$Втр = 0.1 \cdot 4560 = 456 \text{ грн}$$

Отже, повна сума витрат на матеріали (В) становить:

$$Вм = 4560 + 456 = 5016 \text{ грн}$$

4.3.4 Інші прямі невраховані витрати

Інші прямі невраховані витрати (С_{нв}) становлять 10 % від суми втрат на заробітну плату, суми відраховують до єдиного соціального внеску, витрат на матеріали:

$$C_{нв} = 0.1 \cdot (ЗП + ВС + Вм), \#(4.3)$$

$$C_{нв} = 0.1 \cdot (33967.29 + 7472,8 + 5016) = 4645,6 \text{ грн.}$$

4.3.5 Розрахунок накладних витрат

До накладних втрат відносять витрати на заробітну плату персоналу (разом з єдиним соціальним внеском), витрати на охорону праці, витрати на допоміжні виробництва, техніку безпеки та екологію та інші. Нормативом відрахування (Н_в) на накладні витрати для КПП ім. Ігоря Сікорського є встановлений розмір у 20 % від суми усіх прямих витрат на НДР. Всі ці витрати включаються в загальний розрахунок для визначення ефективності виконання науково-дослідних робіт та забезпечення оптимального використання ресурсів на етапі досліджень. Таким чином сума накладних втрат для цієї НДР:

$$Нв = 0.2 \cdot (ЗП + ВС + Вм + C_{нв}), \#(4.4)$$

$$Нв = 0.2 \cdot (33967.29 + 7472,8 + 5016 + 4645,6) = 10220,33 \text{ грн.}$$

4.3.6 Розробка планової калькуляції собівартості НДР

Планова собівартість НДР визначається як сума витрат на виконання НДР. Результати калькуляції занесені до таблиці 4.3. В таблиці зазначається загальна заробітна плата виконавців теми, відрахування до єдиного соціального внеску, витрати на матеріали, інші прямі витрати, накладні витрати.

Таблиця 4.3 – Калькуляція планової собівартості НДР за темою

Найменування калькуляційних статей	Позначення	Сума	
		грн	%
Загальна заробітна плата виконавців теми	ЗП	33967,29	55,39
Відрахування до єдиного соціального внеску	ВС	7472,8	12,18
Витрати на матеріали	ВМ	5016	8,17
Інші прямі витрати	Снв	4645,6	7,57
Накладні витрати	Нв	10220,33	16,67
Всього		61322,02	100

Відповідно до даних з табл. 4.3 загальна планова собівартість НДР складає: ВНДР = 61322,02 грн.

4.4 Визначення очікуваних результатів НДР та розрахунок показників економічної ефективності

Оцінка очікуваного економічного ефекту від виконання науково-дослідної роботи є важливою для обґрунтування її доцільності.

Для визначення річного економічного ефекту застосовується бальна система оцінювання, що базується на чотирьох основних критеріях:

1. значущість розробки (К1);
2. перспективи практичного застосування результатів (К2);
3. теоретичний внесок і рівень новизни (К3);
4. наукова й технічна складність дослідження (К4).

Коефіцієнт К1 – рівень включеності дослідження до програм:

а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;

б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;

в) дослідження входить до складу відомчої програми – 5 балів;

г) робота є частиною міжвідомчої комплексної програми, яка передбачає впровадження результатів – 7 балів;

д) дослідження реалізується в межах міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт К2 – потенційний масштаб впровадження результатів:

а) результати дослідження можливо застосувати лише в межах конкретного підрозділу – 1 бал;

б) впровадження можливе в межах однієї організації – 3 бали;

в) результати можуть бути використані кількома організаціями – 5 балів;

г) розробка придатна для використання в масштабах однієї галузі – 8 балів;

д) результати можуть бути впроваджені в різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт К3 – рівень новизни та наукової цінності:

а) дослідження базується на аналізі, узагальненні або класифікації вже відомої інформації, подібні результати були відомі раніше – 2 бали;

б) у процесі виконання роботи отримані нові дані, які розширюють уявлення про суть досліджуваних процесів – 3 бали;

в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

г) у результаті дослідження розроблені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, раніше не відомі – 8 балів.

Коефіцієнт К4 – рівень складності й обсяг ресурсів:

а) дослідження виконується одним підрозділом, витрати не перевищують 10 000 грн – 1 бал;

б) залучено один підрозділ, витрати становлять від 10 000 до 50 000 грн – 3 бали;

в) роботу виконує один підрозділ, витрати становлять від 50 000 до 100 000 грн – 5 балів;

г) до виконання залучено декілька підрозділів, витрати – від 100 000 до 200 000 грн – 7 балів;

д) дослідження проводиться спільно з іншими організаціями, витрати перевищують 200 000 грн – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

До таблиці 4.4 занесені результати бальної оцінки річної економічної ефективності НДР.

Таблиця 4.4 – Бальна оцінка річної економічної ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1.Важливість розробки	K_1	Робота являє собою частину відомчої програми.	5
2.Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі.	8
3.Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів.	5
4.Складність дослідження	K_4	Роботу виконує один підрозділ, витрати становлять від 50 000 до 100 000 грн	5

Відповідно до даних занесених у табл. 4.4 величина О дорівнює:

$$O = 5 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 5 = 1000$$

Умовний річний економічний ефект (ЕНДР) науково-дослідницької роботи визначається:

$$\text{ЕНДР} = 500 \cdot 0 - \text{ЕН} \cdot \text{ВНДР}, \#(4.6)$$

де 500 – умовна вартість одного балу, грн.;

ЕН – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ($\text{ЕН} = 0,2 \dots 2,0$ для нашого розрахунку обираємо $\text{ЕН} = 0,2$);

ВНДР – витрати на виконання НДР (підсумок табл. 1.4).

У нашому випадку очікувані результати наукового проекту будуть такими:

$$\text{ЕНДР} = 500 \cdot 1000 - 0,2 \cdot 61322,02 = 487735,596$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$\text{ЕНДР} = \frac{\text{ЕН}}{\text{ВНДР}}, \#(4,7)$$

$$\text{НДР} = \frac{487735,596}{61322,02} = 7,953$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 7,903 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

4.5 Висновки до розділу 4

Обґрунтована науково-технічна актуальність проведення даної НДР. Планова кошторисна собівартість проекту була визначена з урахуванням витрат на всі необхідні ресурси. Розрахунок економічної ефективності свідчить про доцільність реалізації даної роботи.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Мета цього розділу – забезпечення нешкідливих та безпечних умов праці. У розділі проведено аналіз умов праці, пов'язаних із виконанням роботи зі створення функціональних покриттів на сталі Х12МФ методом електроіскрового легування Zr та Nb, а також розроблено засоби та заходи, спрямовані на усунення несприятливих чинників і забезпечення безпеки персоналу у разі надзвичайних ситуацій.

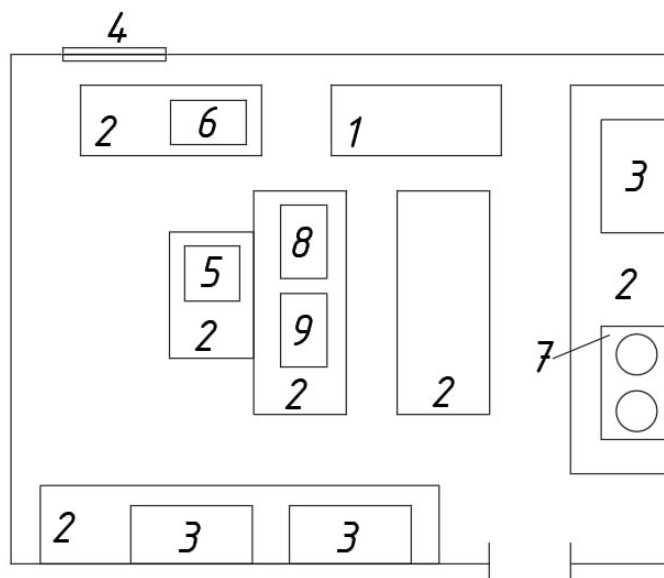
5.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві

Дипломна робота проводилась на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки і у Центрі колективного користування науковим обладнанням “Матеріалознавство тугоплавких сполук та композитів” КПІ ім. Ігоря Сікорського. Основним нормативним документом є Закон України «Про охорону праці», який визначає основні положення щодо захисту та дотримання конституційних прав працівників на охорону їх життя і здоров'я під час трудової діяльності. Регулювання закону відбувається за участю відповідних органів державної влади .

Відповідно до статті 13 Закону України «Про охорону праці» [32] роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити дотримання вимог законодавства щодо прав працівників у цій галузі. Відповідно до статті 14 працівник зобов'язаний дбати про власну безпеку та здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих, знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту, проходити у встановленому порядку медичні огляди [33].

5.2 Аналіз параметрів приміщення

Робота зі створення функціональних покриттів на сталі Х12МФ методом електроіскрового легування Zr та Nb виконується на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки НН ІМЗ ім. Є. О. Патона КПП ім. Ігоря Сікорського. Лабораторія спеціально обладнана для проведення експериментальних робіт і досліджень у сфері матеріалознавства, зокрема для процесів електроіскрового легування. Схема лабораторії наведена на (рис. 5.1).



- 1 – шафа; 2 – стіл; 3 – інше обладнання; 4 – вікно; 5 – ПМТ-3М;
 6 – «Элитрон – 26А»; 7 – шліфувальний станок; 8 – електронні ваги;
 9 – комп'ютер

Рисунок 5.1 – План лабораторії де проводилось дослідження, кабінет № 045

Приміщення лабораторії має наступні параметри:

- довжина: 6,5 метра;
- ширина: 5 метрів;
- висота: 3,8 метра.

Ці параметри забезпечують загальну площу лабораторії 32,5 квадратних метра та об'єм 123,5 кубічних метра. Згідно з санітарно-гігієнічними нормами,

на одного працівника повинно припадати не менше 4 квадратних метрів площі та 15 кубічних метрів об'єму приміщення. Оскільки кількість працюючих у лабораторії не перевищує 3 осіб, площа та об'єм на одного працівника значно перевищують мінімальні нормативні вимоги, що забезпечує комфортні та безпечні умови праці .

Важливим аспектом є організація робочого простору, яка включає розміщення основного та допоміжного обладнання. Основне обладнання включає установку для електроіскрового легування «ЭЛИТРОН-26А», ваги для гравіметричного аналізу та мікротвердомір ПМТ-3М для визначення мікротвердості зразків. Всі прилади розміщені таким чином, щоб забезпечити зручний доступ до них, мінімізуючи ризик травм та забезпечуючи ефективну організацію робочого процесу .

Приміщення обладнане необхідними меблями: столами для роботи з документацією та комп'ютерною технікою, шафами для зберігання інструментів та матеріалів. В лабораторії є вікно, що забезпечує природне освітлення.

Параметри приміщення та його облаштування відповідають всім необхідним вимогам, що дозволяє забезпечити безпеку та комфорт працівників, а також ефективне виконання науково-дослідних та експериментальних робіт.

5.3 Аналіз освітленості приміщення

Освітлення в лабораторії є важливим чинником, що впливає на продуктивність праці та безпеку працівників. Освітленість робочого місця повинна відповідати встановленим нормативним вимогам, забезпечуючи достатній рівень освітлення для проведення точних наукових досліджень і експериментів.

У лабораторії освітлення здійснюється комбінованим способом, що включає природне бічне освітлення та штучне освітлення [34].

Природне освітлення:

- тип освітлення: бічне;
- розташування вікна: вікно виходить на північ, що дозволяє уникнути прямих сонячних променів і забезпечує рівномірне розсіяне світло протягом усього дня;
- відстань від вікна до робочих місць: не перевищує 3 метри, що гарантує достатню освітленість робочих зон природним світлом.

Штучне освітлення:

- тип освітлення: комбіноване (загальне та місцеве) ;
- лампи: люмінесцентні лампи ЛБ-40 (24 одиниці на лабораторію) ;
- розташування ламп: лампи рівномірно розміщені на стелі, що дозволяє забезпечити достатній рівень загального освітлення.
- колірна температура ламп: вибрані лампи мають колірну температуру, близьку до денного світла, що сприяє зниженню навантаження на зір і підвищенню комфорту праці.

Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [35], освітленість робочих місць у лабораторії повинна забезпечувати комфортні умови для роботи, знижуючи ризик зорової втоми та підвищуючи точність і ефективність виконуваних завдань. Оптимальний рівень освітленості для лабораторних робіт становить не менше 500 люкс, що досягається завдяки комбінації природного та штучного освітлення.

5.4 Аналіз мікроклімату приміщення

Мікроклімат приміщення є важливим фактором, що впливає на працездатність і здоров'я працівників. Основні параметри мікроклімату включають температуру, вологість і швидкість руху повітря. Для створення комфортних умов праці ці параметри повинні відповідати встановленим нормативам.

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [36], для легких робіт (категорія Іб), до яких належить робота в лабораторії, встановлено такі оптимальні та допустимі умови мікроклімату (таб. 5.1).

Таблиця 5.1 – Оптимальні та допустимі умови мікроклімату

Період року	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	21-23 (опт.), 20-24 (доп.)	40-60 (опт.), <75 (доп.)	0,1 (опт.), 0,1-0,3 (доп.)
Теплий	22-24 (опт.), 21-28 (доп.)	40-60 (опт.), <65 (доп.)	0,2 (опт.), 0,1-0,3 (доп.)

На момент проведення робіт у лабораторії № 045 були зафіксовані наступні параметри мікроклімату:

- температура: в холодний період: +5 °С; в теплий період: +15 °С;
- відносна вологість: в холодний період: 70 %; в теплий період: 55 %;
- швидкість руху повітря: в холодний період: 0,1 м/с; в теплий період: 0,2 м/с.

Аналіз показує, що фактичні умови мікроклімату в лабораторії відповідають оптимальним умовам, визначеним нормативами. Особливо це стосується температурного режиму, де значні відхилення можуть негативно впливати на комфорт і продуктивність працівників.

5.5 Аналіз наявності шуму в приміщенні

Шум є одним із суттєвих факторів, що впливають на умови праці в лабораторії. Робота установки «Элитрон-26А» та іншого обладнання супроводжується виникненням короткочасного шуму, який здійснює негативного впливу на здоров'я та працездатність працівників. Основним

джерелами шуму в лабораторії є установка для електроіскрового легування «Элитрон-26А».

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ДСН 3.3.6.037-99 [37], які встановлюють допустимі рівні шуму для різних видів приміщень і робочих процесів. Для лабораторних приміщень допустимий рівень шуму не повинен перевищувати 50-60 дБ.

За результатами вимірювань рівня шуму в лабораторії, під час роботи установки «Элитрон-26А» рівень шуму може досягати 55 дБ, що не перевищує допустимі норми.

5.6 Виробниче випромінювання

Під час роботи з установкою, такою як «Элитрон-26А», не виникає небезпека впливу різних видів випромінювань, включаючи рентгенівське, ультрафіолетове, інфрачервоне та електромагнітне випромінювання.

5.7 Запиленість та загазованість

Під час виготовлення шліфів на механічному верстаті та проведення інших технологічних операцій у лабораторії 045 не виникає проблеми запиленості та загазованості повітря. Утворення пилу і виділення різних газоподібних речовин можуть мати негативний вплив на здоров'я працівників, тому важливо контролювати ці параметри та вживати необхідних заходів для їх зниження.

Джерелами запиленості та загазованості в лабораторії можуть бути:

- механічне шліфування зразків;
- полірування зразків із використанням пасти «ГОІ»;
- використання хімічних реагентів для травлення зразків;
- електроіскрове легування (виділення аерозолі).

Виміряні концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони наведені у (таб. 5.2).

Таблиця 5.2 – Концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони

Речовина	Виміряна концентрація, мг/м ³	Допустима концентрація, мг/м ³
Оксид хрому	0,25	1
Спирт етанол	800	1000
Азотна кислота	2	5

Вплив шкідливих речовин на здоров'я:

- вдихання пилу може призвести до захворювань дихальної системи, таких як силікоз та інші хронічні бронхіти;
- вплив може викликати подразнення шкіри, очей і дихальних шляхів, а також підвищує ризик розвитку онкологічних захворювань;
- при високих концентраціях може викликати отруєння, що проявляється головним болем, запамороченням, нудотою та іншими симптомами;
- вдихання парів азотної кислоти може викликати сильне подразнення дихальних шляхів, а також хімічні опіки слизових оболонок.

Заходи для зниження запиленості та загазованості:

- вентиляція: Встановлена ефективна система вентиляції, яка забезпечує постійний обмін повітря в лабораторії та видалення шкідливих речовин (рис. 5.2);
- засоби індивідуального захисту: Забезпечення працівників індивідуальними засобами захисту органів дихання, такими як респіратори ШБ1 «Лепесток 5», а також захисними окулярами і рукавичками;

- навчання та інструктажі: Проводиться інструктаж для працівників щодо безпечного поводження з хімічними речовинами та використання засобів захисту.



Рисунок 5.2 – Вентиляційна решітка

Забезпечення контролю за запиленістю та загазованістю в лабораторії є важливим елементом охорони праці. Впровадження вищезазначених заходів дозволяє створити безпечні умови праці, знизити ризики для здоров'я працівників та забезпечити відповідність нормативним вимогам.

5.8 Електробезпека

Електробезпека є важливим аспектом охорони праці в лабораторії 045, де використовується різноманітне електрообладнання. Приміщення лабораторії класифікується як приміщення без підвищеної небезпеки електротравм. Це означає, що умови в лабораторії, такі як відсутність підвищеної вологості та струмопровідних підлог, не створюють додаткових ризиків ураження електричним струмом.

Основні характеристики електробезпеки:

- використання електроустановок з напругою 220 В та частотою 50 Гц є стандартом для більшості лабораторій. Установка для ЕІЛ «Елітрон-26А» працює при робочих напругах 60 - 70 В. Ці параметри

електромережі є безпечними за умови правильного монтажу та експлуатації обладнання;

- всі корпуси електроустаткування та приладів у лабораторії забезпечені захисним заземленням. Це дозволяє уникнути небезпечного накопичення електричного заряду на корпусах пристроїв та запобігає ураженню електричним струмом у разі несправності ізоляції;

- електропроводка в лабораторії виконана відповідно до діючих стандартів і норм, що включає використання якісних матеріалів та дотримання правил монтажу;

- регулярне технічне обслуговування електрообладнання, перевірка ізоляції, заземлення та стану електропроводки є обов'язковими заходами для забезпечення безпеки працівників;

- працівники лабораторії проходять регулярні інструктажі з електробезпеки, що включають правила безпечної експлуатації електрообладнання, дії у разі виникнення аварійної ситуації та використання засобів індивідуального захисту.

Забезпечення електробезпеки в лабораторії є важливим елементом охорони праці. Правильне заземлення, дотримання стандартів монтажу та експлуатації електрообладнання, а також регулярні інструктажі сприяють зниженню ризиків ураження електричним струмом та забезпечують безпечні умови роботи.

5.9 Пожежна безпека

Пожежна безпека є ключовим аспектом охорони праці в будь-якій лабораторії. де використовуються легкозаймисті матеріали та електрообладнання. Лабораторія належить до категорії В за пожежною безпекою, що означає наявність твердих горючих та важкогорючих матеріалів, здатних горіти при взаємодії з водою, киснем повітря або між собою.

Основні засоби пожежогасіння:

- лабораторія оснащена вуглекислотним вогнегасником, які розміщені в доступному місці. Вуглекислотні вогнегасники використовуються для гасіння пожеж, пов'язаних з електрообладнанням, оскільки вони не проводять електричний струм і не залишають слідів після використання;
- лабораторія обладнана системою автоматичної пожежної сигналізації, яка включає датчики диму та температури. Ця система забезпечує швидке виявлення пожежі та негайне сповіщення працівників про небезпеку.

Правила протипожежної безпеки:

- регулярне технічне обслуговування електрообладнання, перевірка ізоляції та з'єднань, а також своєчасний ремонт несправностей допомагають уникнути займання;
- забороняється використання відкритого вогню в лабораторії. Всі роботи з вогнем проводяться тільки в спеціально відведених для цього місцях з використанням відповідних засобів захисту;
- у лабораторії розроблений та вивішений план евакуації у разі пожежі. Працівники ознайомлені з ним і регулярно проводять тренування з евакуації;
- регулярні інструктажі з пожежної безпеки, навчання працівників використанню засобів пожежогасіння та дій у разі пожежі є обов'язковими заходами.

План евакуації в разі виникнення пожежі наведено на (рис. 5.3).

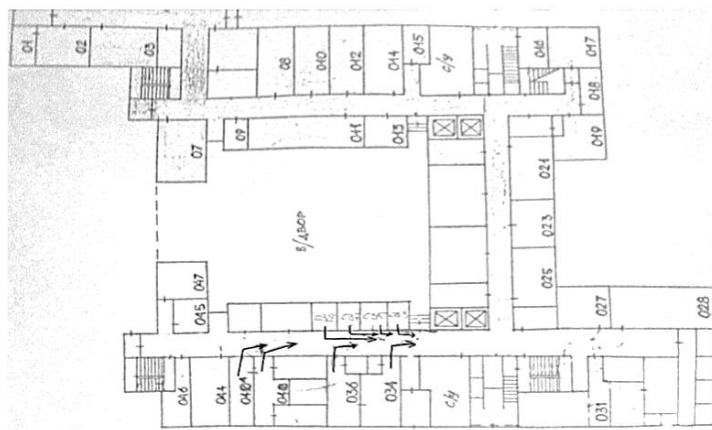


Рисунок 5.3 – План евакуації

Забезпечення пожежної безпеки в лабораторії вимагає комплексного підходу, що включає обладнання приміщення засобами пожежогасіння, дотримання правил протипожежної безпеки та регулярні інструктажі працівників. Впровадження цих заходів сприяє зниженню ризиків виникнення пожеж та забезпечує безпечні умови роботи в лабораторії.

5.10 Висновки до розділу 5

Огляд умов роботи та заходів щодо безпеки на робочому місці виявив, що приміщення та обладнання відповідають ключовим стандартам. Реалізація заходів, спрямованих на поліпшення мікроклімату, а також забезпечення електробезпеки та протипожежної безпеки, є важливими для формування безпечного та зручного робочого середовища.

ВИСНОВКИ

1. Показана можливість створення зміцнених корозійностійких електроіскрових покриттів на сталі Х12МФ шляхом варіювання послідовності та кількості стадій нанесення цирконію та ніобію.

2. Зі зміною послідовності нанесення легувальних елементів з Zr-Nb на Nb-Zr коефіцієнт масоперенесення зростає у 2,27 рази для двохстадійних та у 2,65 разів для чотирьохстадійних процесів. Зі збільшенням кількості стадій ЕІЛ коефіцієнт масоперенесення зменшується у 1,2 - 1,4 рази.

3. Встановлено вплив кількості стадій легування на товщину та мікроструктуру покриттів. Незалежно від порядку нанесення Zr та Nb після двохстадійних процесів ЕІЛ покриття Zr-Nb та Nb-Zr товщиною (25 - 35) мкм є суцільними та рівномірними на відміну від чотирьохстадійних Zr-Nb-Zr-Nb та Nb-Zr-Nb-Zr, які є нерівномірними за товщиною (10 - 40) мкм і мають тріщини через наявність в їх складі комплексного карбиду NbZrC₂.

4. Встановлено, що послідовність ЕІЛ суттєво впливає на мікротвердість, особливо для двохстадійних процесів: 21,5 ГПа (Nb-Zr) проти 6,5 ГПа (Zr-Nb); для чотирьохстадійних процесів: 22 ГПа (Nb-Zr-Nb-Zr) проти 15,8 ГПа (Zr-Nb-Zr-Nb). Зі збільшенням кількості стадій збільшується мікротвердість лише для послідовності Zr-Nb (Zr-Nb – 6,5 ГПа; Zr-Nb-Zr-Nb – 15,8 ГПа).

5. Випробування у 5%-му розчині морської солі протягом 1000 годин показали, що корозійна стійкість електроіскрових покриттів на сталі Х12МФ у 1,6 разів (для NbZr) та у 2 рази (для ZrNb) більша, ніж для зразка без покриття.

6. Розрахунок економічної ефективності свідчить про доцільність реалізації даної роботи.

7. Мікроклімат, організація робочого місця, освітлення в лабораторії відповідають вимогам санітарних норм. А рівень шуму, вібрацій та випромінювання не перевищує допустимих норм.

CONCLUSIONS

1. The possibility of creating reinforced corrosion-resistant electrospark coatings on X12MF steel by varying the sequence and number of stages of zirconium and niobium deposition has been demonstrated.

2. With the change in the sequence of alloying elements from Zr-Nb to Nb-Zr, the mass transfer coefficient increases by 2.27 times for two-stage processes and by 2.65 times for four-stage processes. As the number of ESD stages increases, the mass transfer coefficient decreases by 1.2 to 1.4 times.

3. The influence of the number of coating stages on the thickness and microstructure of the coatings was determined. Regardless of the order of Zr and Nb deposition, after the two-stage ESD processes, the Zr-Nb and Nb-Zr coatings with a thickness of (25 - 35) μm were continuous and uniform, unlike the four-stage Zr-Nb-Zr-Nb and Nb-Zr-Nb-Zr coatings, which were uneven in thickness (10 - 40) μm and exhibited cracks due to the presence of the complex carbide NbZrC_2 in their composition.

4. It was found that the sequence of ESD significantly affects the microhardness, especially for two-stage processes: 21.5 GPa (Nb-Zr) versus 6.5 GPa (Zr-Nb); for four-stage processes: 22 GPa (Nb-Zr-Nb-Zr) versus 15.8 GPa (Zr-Nb-Zr-Nb). With an increase in the number of stages, the microhardness increases only for the Zr-Nb sequence (Zr-Nb – 6.5 GPa; Zr-Nb-Zr-Nb – 15.8 GPa).

5. Tests in a 5% seawater solution for 1000 hours showed that the corrosion resistance of the electrospark coatings on X12MF steel is 1.6 times (for NbZr) and 2 times (for ZrNb) greater than that of the uncoated sample.

6. The economic efficiency calculation demonstrates the feasibility of implementing this work.

7. The microclimate, workplace organization, and lighting in the laboratory meet sanitary standards, while the levels of noise, vibration, and radiation do not exceed the permissible limits.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електроіскрове легування металевих поверхонь / Лазаренко Б.Р [та ін.]. – Київ : Наук. думка, 1986. – 276 с.
2. Peterkin S. Electro-Spark Deposition Machine Design, Physical Controls and Parameter Effects / Peterkin S. – Waterloo, Ontario, Canada, 2016. – 120 p.
3. Electrosark deposition of Fe-based alloy coating [Electronic resource] / Y. Yin [et al.] // Surface \& Coatings Technology. – 2015. – Vol.276. – P.401–406. – Mode of access:
https://www.researchgate.net/publication/278104581_Electrosark_Deposition_of_Fe-Based_Alloy_Coating. – Title from screen.
4. Modeling Technological Parameters for Producing Combined Electrosark Deposition Coatings / Dovzhenko O. M., Zhmurko O. S., Ostashko V. V. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 6, No. 10 (106). — P. 27–38.
5. New HfNbTaTiZr High-Entropy Alloy Coatings Produced by Electrosark Deposition with High Corrosion Resistance / J. L. Huang, S. M. Peng, M. L. Li, Y. F. Zhang, T. Xu, Y. J. Liu, W. Chen // Journal of Materials Science & Technology. – 2022. – Vol. 102. – P. 54–65.
6. Покриття для медичного застосування, отримане методом мікроплазмового напилення сплаву Zr–Nb / С. Максимов та ін. // Автоматичне зварювання. 2024. № 6. С. 10–16.
7. Effect of Nb-Zr-N Alloying Layer on Surface Mechanical Properties and Biocompatibility of Medical 316L Matrix / Y. Wang, Q. Li, X. Chen, X. , S. Peng, J. Huang // Materials Science and Engineering: C. — 2023. — Vol. 140. – P. 62–65.
8. Synthesis of multicomponent coatings by electrosark alloying with powder materials / V. Mihailov et al. // Coatings. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 651–657.
9. Characterization of niobium carbonitride coating on AISI D2 steel / G. Kumar et al. Surface and coatings technology. 2013. Vol. 233. P. 38–44.

10. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of the AISI D2 tool steel / K. Sikora et al. // *Journal of physics: conference series*. 2018. Vol. 43. P. 45–79.

11. Characterization of electrospark deposited coatings: influence of processing parameters / Cavaleiro A., Sales J. A. A., Fernandes P. R. // *AWK'02 proceedings, international conference on advanced welding and joining*. – 2002. P. 4–10.

12. Microstructure and properties of multilayer coatings produced by electrospark alloying / Cavaleiro A., Fernandes P. R., Sales J. A. A. // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. Vol. 171, no. 2. P. 251–257.

13. Effective Temperature of High Pressure Torsion in Zr-Nb Alloys / Ma J., Semiatin S. L., Herderick E. B. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. Vol. 626. P. 123–132.

14. Effect of heat treatment on the grain size, microhardness and corrosion behavior of the cold-working tool steels AISI D2 and AISI O1 [Electronic resource] / S. Al-Qawabah [et al.] // *Materiali in tehnologije*. – 2020. – Vol. 54, no. 6. – P. 785–790. – Mode of access: <https://doi.org/10.17222/mit.2020.035> (date of access: 05.06.2025). – Title from screen.

15. Investigation of the Formation Processes of Nb-Zr Coatings on Steel Surfaces Using Electrospark Alloying Method / O. O. Chorny, A. M. Kozyuk, V. I. Lykholat, V. I. Miroshnichenko // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. — 2014. — Vol. 36, No. 12. — P. 1651–1660.

16. Козюк І. М. Формування комбінованих Nb, Co, Ti, C покриттів на поверхні інструментальної сталі ХВГ методом електроіскрового легування : дипломний проект бакалавра : 132 Матеріалознавство. 2023. 82 с. Mode of access: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/58994>). – Title from screen.

17. Characterization and modelling of grain growth in Zr-Nb alloys: niobium concentration influence / M. A. Silva [et al.] // *Journal of alloys and compounds*. – 2023. – Vol. 957. P. 172–179.

18. Japan Atomic Energy Agency. Phase diagram of Fe-Cr-Zr system at 1500 K. Mode of access: [https://thermodb.jaea.go.jp/data/en/pd/Fe-Cr-Zr\(1500K\).html](https://thermodb.jaea.go.jp/data/en/pd/Fe-Cr-Zr(1500K).html).

19. Development of Zr-Nb alloys and their applications in nuclear engineering / Vorozhtsov A. N., Vorozhtsova N. N. // Protection of metals and physical chemistry of surfaces. 2023. Vol. 59, no. 7. P. 1056–1062.

20. The role of Fe on the solubility of Nb in α -Zr. / Koh S. K., Seidman D. N., Hyde J. M. // Journal of Nuclear Materials. 2009. T. 385, № 2. C. 210–220.

21. Coating for medical application produced by microplasma spraying from Zr-Nb alloy / M. Ivankova, A. P. Savchuk, V. T. Yadlovskiy, A. V. Kryshchal, A. I. Fedorenko // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. — 2023. — Vol. 34, No. 5. — Article 81.

22. Investigation of effect of inoculators on dispersion of steel kh12mf cast structure / S. V. Davidchenko [et al.] // Sovremennââ elektrometallurgîâ. – 2018. – Vol. 2018, no. 2. – P. 13–18.

23. Формування зносостійких зміцнених покриттів на поверхні сталі Ст. 3 послідовним електроіскровим легуванням хромом та міддю в інертному середовищі та на повітрі / Є. В. Іващенко, Г. Г. Лобачова, О. В. Вознюк // Проблеми тертя та зношування. – 2018. – № 2. – С. 72–77.

24. Effect of Zr Content on Phase Stability, Deformation Behavior, and Young's Modulus in Ti-Nb-Zr Alloys / Y. Yang, X. Li, Y. Zhang, L. Wang, Q. Yang, J. Liu // Journal of Alloys and Compounds. — 2021. — Vol. 855. — Article 157396.

25. Shevchenko V. V. Characteristics of electrospray coatings produced on stainless steel [Electronic resource] / V. V. Shevchenko, O. V. Fedorenko, A. V. Yatsenko // Core. – 2018. – P. 20. – Mode of access: <https://core.ac.uk/download/pdf/144149866.pdf>. – Title from screen.

26. Effect of thermochemical treatment on the zr-1nb alloy characteristics / A. S. Gavrish [et al.] // Materials today: proceedings. – [S. l.], 2023. – P. 2106–2111.

27. Effect of the Multidirectional Free Hot Forging on the Hot Compression Behavior and Microstructure of the Zr-Nb Alloy / L. Wang, S. Zhang, J. Sun, C. Liu,

Y. Wu // Journal of Materials Processing Technology. — 2023. — Vol. 316. — Article 117773.

28. Сучасні експериментальні методи аналізу низькорозмірних структур: лабораторний практикум. / Карпець М. В., Сидоренко С. І., Бурмак А. П. // КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 113 с.

29. Euromex. [iScope Metallurgical Product Datasheet] [Electronic resource] / Euromex. — Mode of access: https://www.euromex.com/en/uploads/downloads/download_item/iScope_metallurgical_product_datasheet_Engels_1.pdf. — Title from screen.

30. Холявко В. В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів : навч. посіб. [Електронний ресурс] / В. В. Холявко, І. А. Владимирський, О. О. Жабинська. — Київ : Центр учб. літ., 2016. — Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0e2218e8-7e13-4a89-84a8-d2d438d1dffb/content>. — Назва з екрана.

31. Корозія та захист металів від корозії. методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів напрямів підготовки 6.051701 – харчові технології та інженерія; 6.050502 – інженерна механіка; 6.050503 – машинобудування. / Костенко І. А., Челябієва В. М. // Чернігів: ЧНТУ, 2014. 50 с.

32. Законодавство України про охорону праці : У 3-х т. Збірник норм. документів. — Київ : [б. в.], 1997. — Т. 4. — 384 с.

33. Левченко О. Г. Охорона праці та цивільний захист [електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «матеріалознавство» та 136 «металургія» / О. Г. Левченко. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 337 с.

34. Левченко О. Г. Розділ з охорони праці в дипломних роботах: Рекомендації до виконання [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / О. Г. Левченко, Г. В. Демчук. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 16 с.

35. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 68 с.

36. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – Київ : МОЗ України, 1999. – 24 с.

37. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – Київ : МОЗ України, 1999. – 16 с.