

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**ІНЖЕНЕРНО-ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**КАФЕДРА ФІЗИКИ МЕТАЛІВ**

«До захисту допущено»

В. о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) **Є.В. Іващенко**  
(ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2017 р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

з напрямку підготовки 6.050403 «Інженерне матеріалознавство»  
(код і назва)

на тему: Створення функціональних покриттів на сталі 45 пошаровим електроіскровим легуванням хромом, вольфрамом та графітом

Виконав: студент IV курсу, групи ФМ-31  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
Богомаз Ростислав Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник к.т.н., ст. викл., Лобачова Галина Геннадіївна

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Консультанти

Експериментальна частина

(назва розділу)

к.т.н., доцент Іващенко Є.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Економічно-організаційний

(назва розділу)

к.е.н., ст. викл., Нараєвський С.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Охорона праці

(назва розділу)

к.ф.-м.н., ст. викл., Зацарна О.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Нормоконтроль

(назва розділу)

ас. Шаповалова Н.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент к.т.н., доцент кафедри МТО, Бобіна М.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ 2017

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет)

Інженерно-фізичний факультет

(повна назва)

Кафедра

Кафедра Фізики металів

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.050403 «Інженерне матеріалознавство»

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Є.В. Іващенко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

Богомазу Ростиславу Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Створення функціональних покриттів на сталі 45 пошаровим електроіскровим легуванням хромом, вольфрамом та графітом.

Керівник Лобачова Галина Геннадіївна, к.т.н., ст. викл.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «22» травня 2017 р. № 1589-с

2. Термін подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи літературні дані за темою дослідження, результати переддипломної практики.

4. Зміст роботи:

а) Основна частина

1. Дослідити структуру, фазовий склад, кінетику масоперенесення, мікротвердість та зносостійкість поверхневих шарів сталі 45 після ЕІЛ у послідовностях: Cr-W-C, W-Cr-C, W-C-Cr, C-Cr-W.

2. Виявити вплив матеріалів анодів (вольфраму, хрому, графіту) в процесі пошарового ЕІЛ на структуру та властивості поверхні сталі 45.

б) Економічна частина

1. Розрахувати собівартість проведення дослідження.

2. Визначити економічну ефективність.

в) Охорона праці

1. Проаналізувати шкідливі факторита шлях їх усунення.

2. Визначити рівень та якість штучного та природного освітлення в приміщенні.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 1. Фото мікроструктур поверхневої зони сталі 45 після ЕІЛ у послідовності: Cr-W-C, W-Cr-C, W-C-Cr, C-Cr-W. 2. Кінетичні криві масоперенесення в процесі пошарового ЕІЛ. 3. Дифрактограми Cr-W-C, W-Cr-C, W-C-Cr, C-Cr-W покриттів на сталі 45. 4. Розподіл мікротвердості у поверхневій зоні сталі 45 після потрійного ЕІЛ. 5. Криві інтенсивності зношування електроіскрових покриттів та зразка сталі 45 без обробки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Експериментальна частина	к.т.н., доцент Іващенко Є.В.		
Економічно-організаційний	к.е.н., ст. викл. Нараєвський С.В.		
Охорона праці	к.ф.-м.н., ст.викл. Зацарна О.В.		
Нормоконтроль	ас. Шаповалова Н.А.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання		
2	Огляд сучасних наукових робіт та написання літературного огляду		
3	Освоєння методик дослідження		
4	Виконання експериментальних досліджень		
5	Отримання результатів та їх обговорення		
6	Написання висновку та переліку посилань		
7	Оформлення роботи		
8	Захист на засіданні ЕК		

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Р.Д. Богомаз

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Г.Г. Лобачова

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 77 с., 28 рис., 13 табл., 2 дод., 34 джерел.

ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ, ПОКРИТТЯ, ВОЛЬФРАМ, ХРОМ, ГРАФІТ.

Об'єкт дослідження — поверхневі шари сталі 45 з нанесеними покриттями електроіскровим легуванням.

Мета роботи — Дослідження структури, фазового складу та властивостей покриттів одержаних пошаровим нанесенням вольфраму, хрому та графіту на поверхню сталі 45 в процесі електроіскрового легування.

Методи дослідження — гравіметричний, мікроструктурний, рентгеноструктурний, мікродюрOMETричний аналізи та випробування на зносостійкість.

Встановлена можливість створення функціональних покриттів на сталі 45 методом пошарового електроіскрового легування за схемами: Cr-W-C, W-Cr-C, W-C-Cr, C-Cr-W.

Виявлено зростання поверхневої мікротвердості в діапазоні від 11,5 ГПа до 18,9 ГПа через наявність в нанесених покриттях твердих розчинів на основі матеріалів електродів та карбідів WC, W<sub>2</sub>C, Fe<sub>3</sub>C, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, CrC в порівнянні з необробленою поверхнею.

Випробування в умовах сухого тертя за схемою “площина по площині” протягом 2 годин показали підвищення зносостійкості від 3 разів до 23 разів в порівнянні з необробленим зразком сталі 45.

## ABSTRACT

Diploma work: 77 pages, 13 tables, 28 figures, 34 literary sources.

ELECTRIC-DOPING, COATING, TUNGSTEN, CHROMIUM, GRAPHITE.

Research object — surface layers of steel 45 coated by electric-spark alloying.

Purpose — research structure, phase composition and properties of coatings obtained by stratified application of tungsten, chromium and graphite on the surface of the steel 45 during electric-spark alloying.

Methods — gravimetric, microstructural, X-ray, microhardness analyzes and durability tests.

It was verified the possibility of creating functional coatings on steel 45 by layered electric-doping schemes: Cr-W-C, W-Cr-C, W-C-Cr, C-Cr-W.

It was found growth of surface microhardness to range from 11,5 GPa to 18,9 GPa caused by coating of solid solutions based electrode material and carbides WC, W<sub>2</sub>C, Fe<sub>3</sub>C, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, CrC compared to untreated surface.

Tests in conditions of dry friction scheme “plane to plane” for 2 hours showed increasing durability from 3 times to 23 times compared to the untreated sample of steel 45.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	8
ВСТУП .....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	10
1.1 Фізичні основи електроіскрового легування .....	11
1.1.1 Модель процесу ЕІЛ Б.Р. Лазаренко і Н.І. Лазаренко .....	12
1.1.2 Узагальнена модель процесу ЕІЛ А.Д. Верхотурова.....	13
1.2 Електродні матеріали для ЕІЛ.....	14
1.2.1 Вольфрам та його карбіди .....	15
1.2.2 Хром.....	15
1.2.3 Багатошарове нанесення металів з графітом .....	16
1.3 Якісна модель ЕІЛ .....	16
1.4 Висновки до розділу 1 .....	17
2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ .....	19
2.1 Вихідні матеріали.....	19
2.2 Методика експерименту .....	19
2.3 Методика дослідження.....	21
2.3.1 Гравіметричний метод.....	21
2.3.2 Мікроструктурний аналіз .....	22
2.3.3 МікродюрOMETричний аналіз .....	23
2.3.4 Випробування на зносостійкість .....	23
2.3.5 Рентгеноструктурний аналіз.....	24
2.3.6 Комп'ютерні методи .....	25
2.4 Висновки до розділу 2 .....	26
3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ .....	27
3.1 Формування покриття на сталі 45 під час ЕІЛ за схемою Cr-W-C .....	27
3.2 Формування покриття на сталі 45 під час ЕІЛ за схемою W-Cr-C .....	31
3.3 Формування покриття на сталі 45 під час ЕІЛ за схемою W-C-Cr .....	34
3.4 Формування покриття на сталі 45 під час ЕІЛ за схемою C-Cr-W .....	38
3.5 Порівняльна характеристика .....	41
3.6 Висновки до розділу 3 .....	42

4	ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....	43
4.1	Науково-технічна актуальність НДР .....	43
4.2	Мета і завдання НДР .....	43
4.3	Розрахунок планових витрат на проведення НДР .....	44
4.3.1	Витрати на оплату праці .....	44
4.3.2	Визначення розміру єдиного соціального внеску .....	46
4.3.3	Визначення вартості матеріалів для виконання НДР .....	46
4.3.4	Визначення вартості спеціального обладнання і приладів .....	46
4.3.5	Визначення вартості робіт і послуг сторонніх організацій .....	47
4.3.6	Визначення витрат на службові відрядження .....	47
4.3.7	Визначення інших прямих неврахованих витрат по темі .....	47
4.3.8	Визначення накладних витрат .....	47
4.3.9	Визначення планової кошторисної вартості НДР .....	48
4.4	Науково-технічна ефективність НДР .....	48
4.5	Висновки до розділу 4 .....	51
5	ОХОРОНА ПРАЦІ .....	52
5.1	Вступ .....	52
5.2	Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві .....	52
5.3	Аналіз параметрів приміщення .....	54
5.4	Аналіз освітленості приміщення .....	56
5.5	Аналіз наявності шуму в приміщенні .....	57
5.6	Виробниче випромінювання .....	57
5.7	Електробезпека .....	58
5.8	Пожежна безпека .....	59
5.9	Висновки до розділу 5 .....	61
	ВИСНОВКИ .....	62
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	63
	ДОДАТОК А ДІАГРАМИ СТАНУ .....	67
	ДОДАТОК Б ЛІСТИНГИ ВИКОНУЮЧИХ СКРИПТІВ .....	69

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕІЛ — електроіскрове легування

ВК — вольфрамокобальтові твердосплави

ТК — титановольфрамокобальтові твердосплави

ОКР — області когерентного розсіювання

ЛШ — легований шар

НДР — науково-дослідна робота

ФЗП — фонд заробітної плати

В<sub>С</sub> — єдиний соціальний внесок

С<sub>М</sub> — транспортно-заготівельні витрати

С<sub>інш</sub> — інші прямі невраховані витрати

Н<sub>В</sub> — норматив відрахувань

Б — бальна оцінка ефективності НДР



## ВСТУП

Темпи сучасного виробництва висувають високі вимоги до деталей машин та інструменту щодо їх надійності та довговічності в процесі роботи у складних умовах. У зв'язку з цим, важливе завдання, поставлене перед матеріалознавцями, полягає у розробці нових сплавів з комплексом високих експлуатаційних властивостей, а також удосконаленні існуючих технологій обробки.

Для розв'язання існуючої проблеми найчастіше достатнім може бути зміцнення лише робочих поверхонь виробів шляхом нанесення функціональних покриттів. Одним з ефективних методів є електроіскрове легування (ЕІЛ), яке дозволяє створювати локальні леговані шари з високою адгезією до основи на будь-яких струмопровідних матеріалах та швидко відновлювати розміри амортизованих деталей [1]. ЕІЛ здійснюється на малогабаритному транспортабельному обладнанні, не потребує значних витрат дорогих матеріалів, оскільки покриття можна наносити на більш дешеву основу. Традиційно для ЕІЛ розробляють компактовані електроди, що містять карбіди вольфраму. Але такі аноди є надто ерозійностійкими за низьких енергетичних параметрів обробки, що приводить до зниження ефективності формування покриття.

Зважаючи на це, як альтернатива, в даній роботі пропонується послідовне ЕІЛ карбідоутворюючими металами (W, Cr) та графітом, ерозія яких значно вища за твердосплави. Одержані у такий спосіб леговані шари мають широку область розчинності, неоднорідність хімічного складу та властивостей за товщиною, що надає їм конкурентоспроможності в плані функціональності з покриттями, одержаними під час ЕІЛ компактованими анодами.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

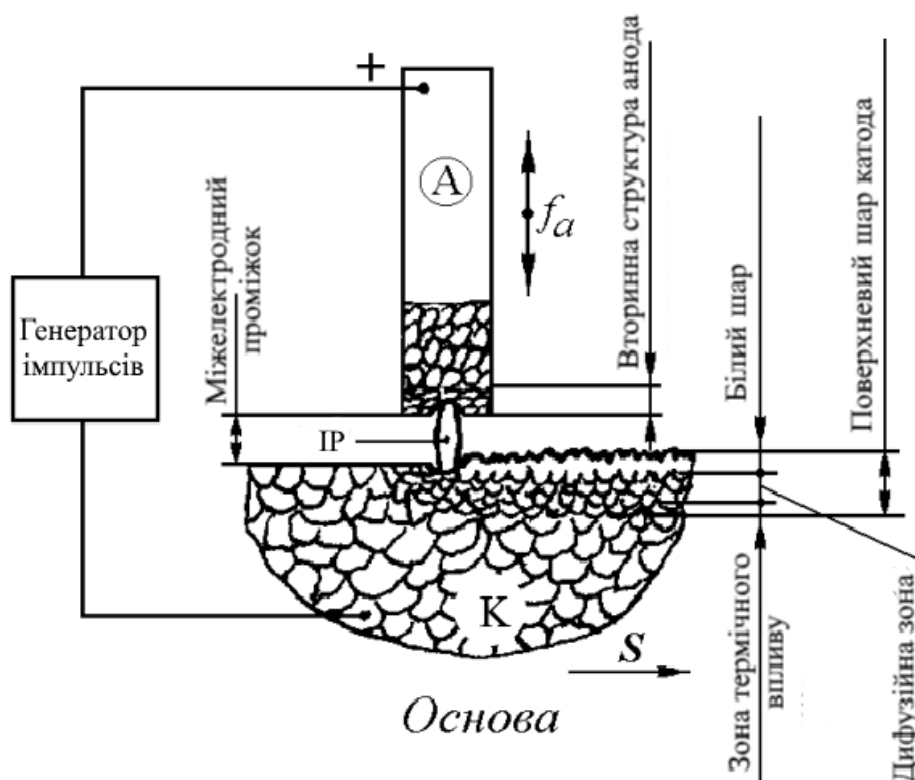
Метод ЕІЛ був розроблений Б.Р. Лазаренко та Н.І. Лазаренко в 50-х роках минулого століття. До основних його особливостей варто віднести локальну обробку поверхні — легування можна проводити в чітко вказаних місцях радіусом у долі міліметрів і більше, без потреби захисту решти поверхні матеріалу; високу міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою; відсутність нагріву деталі в процесі обробки; можливість використання для обробки як чистих металів так їх сплавів, металокерамічних композицій, тугоплавких з'єднань; дифузійне насичення поверхні без зміни розміру основи; відсутність необхідності спеціальної обробки деталі перед легуванням. Технологія доволі проста, необхідне обладнання малогабаритне, надійне та не має особливих проблем з транспортацією [1]. Електроіскрове легування використовується для [1]:

- збільшення міцності, корозійної, зносо- та жаростійкості;
- зниження можливості схоплювання деталей при терті;
- відновлення розмірів інструмента, деталей машин та механізмів;
- зміни електричних властивостей контактуючих елементів та емісійних властивостей поверхні;
- надання поверхні необхідних хімічних з'єднань;
- створення на робочій поверхні шару з необхідною шорсткістю;
- нанесення радіоактивних ізотопів;
- застосування у декоративному мистецтві.

Розрізняють два напрямки в електроіскровому легуванні: чистове — коли на поверхні формують тонкий шар до 0,12 мм і грубе — товщина шару може досягати 0,2 мм. На практиці застосовують переважно перший варіант.

## 1.1 Фізичні основи електроіскрового легування

Метод ЕІЛ базується на явищі електричної ерозії матеріалів при іскровому розряді в газовому середовищі, полярного переносу продуктів ерозії на деталь (катод), на поверхні якого формується шар з новими складом та структурою. На рис. 1.1 наведена загальна схема процесу електроіскрового легування та спрощене зображення поверхні.



ІР — іскровий розряд;  $f_a$  — частота вібрацій анода;  $S$  — напрямок подачі деталі;  $A$  — анод;  $K$  — катод

Рисунок 1.1 — Загальна схема процесу ЕІЛ [2]

Внаслідок іскрового розряду потік електронів призводить до локального нагрівання аноду. На поверхні катоду під дією значних теплових навантажень відбуваються мікрометалургійні процеси, які сприяють перемішуванню матеріала катода і анода за взаємодії з компонентами газового середовища, що і призводить до високої адгезії між основою і шаром. [3]

Процес починається зі зближення анода з катодом до відстані за якої

починається розряд тривалістю від  $10^{-6}$  с до  $10^{-3}$  с [4]. Після пробою міжелектродного проміжку за рахунок генератора імпульсів на поверхнях електродів з'являються осередки плавлення, випаровування які викликають електричну ерозію матеріалів електродів. Відбувається масоперенос переважно з анода на катод. Після закінчення іскрового розряду і віддалення анода від катода завершується розрив електричного кола. Неперервний процес ЕІЛ відбувається за рахунок періодичної комутації електродів за допомогою спеціального віброприладу.

### 1.1.1 Модель процесу ЕІЛ Б.Р. Лазаренко і Н.І. Лазаренко

При зближенні електродів напруженість електричного поля між ними збільшується і при певному значенні відбувається пробій. Пучок електронів сфокусовано ударяється об анод — енергія руху електронів передається поверхневим шарам. Далі матеріал анода локально нагрівається, плавиться і частково випаровується. Капля розплавленого металу відділяється від анода і рухається на катод. В процесі капля встигає нагрітися до високої температури, закипає і вибухає. Коло переривається, дія електричного поля зникає, і частинки летять на катод широким фронтом. Так як перегріті каплі та інші часточки знаходяться в газовому середовищі, то вони можуть ще й утворювати хімічні сполуки. При досягненні катода розплавлені частки зварюються з ним, частково проникають в його поверхню. Також електрод-анод за цим ударяє поверхню і таким чином відбувається перемішування новоутворених часток. Тобто механічний удар “проковує” отримане покриття, збільшуючи тим самим його однорідність та густину. За рахунок того, що процес відбувається в доволі малих об'ємах, можна також вважати, що відбувається так зване надшвидке гартування. [1]

Ця модель розроблена для ЕІЛ при високих напругах. Якщо напруга не перевищує 200 В, то пробій міжелектродного проміжку відбувається майже при

контакті поверхонь електродів через частки середовища — менше 10 мкм. На початковому етапі такого пробою відбувається “вибух”, який забезпечує попередню очистку поверхні і подальше формування міжелектродного простору для розвитку плазмового розряду [5]. Зазначається, що можливий масоперенос від основи до аноду [6]. В такому разі на поверхні катода утворюється “лунка” з піднятими краями. Через це після ЕІЛ поверхня деталі має певну шорсткість.

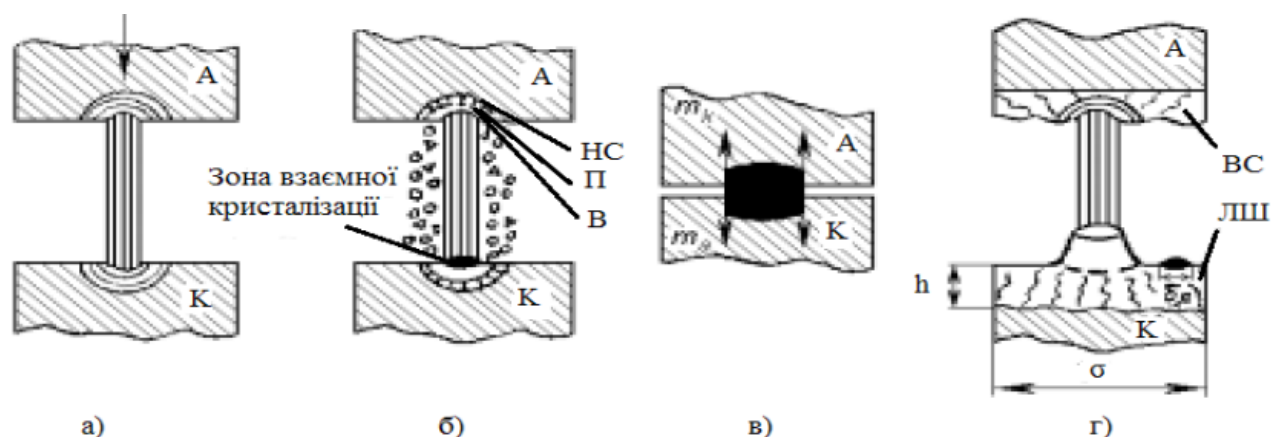
### **1.1.2 Узагальнена модель процесу ЕІЛ А.Д. Верхотурова**

Узагальнена модель процесу ЕІЛ (рис. 1.2) відрізняється від моделі Лазаренко врахуванням поверхневих явищ на аноді та катоді [7]: руйнування електродів в рідкій, паровій та твердій фазі; схоплювання в момент контакту; зміна властивостей поверхонь за рахунок масопереносу та імпульсних навантажень; наявність на катоді в зоні дії іскри мікрованни, яка забезпечує перекристалізацію матеріалів та їх фізико-хімічні взаємодії; обмеження товщини шару за рахунок внутрішніх напружень; дискретний характер формування легованого шару.

Потік електронів призводить до розігріву анода, а магнітне поле створює високий тиск в плазмовому тунелі розряду. В результаті такої дії на поверхні електродів з’являються об’ємні джерела тепла, яке є причиною появи ерозійних лунок на аноді та катоді. В лунці можна виділити три зони (рис. 1.2, б): напружений стан, плавлення та випаровування.

Розмір зон плавлення та випаровування обернено пропорційно залежить від температури плавлення, кипіння та від коефіцієнту теплопровідності електрода. Зона НС виникає за рахунок термічних і термомеханічних напружень в результаті імпульсного нагріву, реактивної дії струменю плазми та її розширення в момент спадання струму в імпульсі. Великі значення розтягуючих напружень на поверхні катода є причиною утворення тріщин та твердофазної ерозії, вклад якої залежить від режиму обробки. Полярний масоперенос (від А до К) відбувається за умови, якщо питома ерозія аноду набагато перевищує суму питомих ерозій утворення

тріщин та твердих фаз. [8]



а) пробій; б) утворення ерозійних лунок на аноді (А) і катоді (К) з трьома зонами: В — випаровування, П — плавлення, НС — напружений стан; в) момент контакту; г) формування на вторинної структури (ВС) і легованого шару (ЛШ)

Рисунок 1.2 — Узагальнена модель процесу ЕІЛ [3]

Багатократна взаємодія іскрових розрядів зумовлює обмеження товщини легованого шару. Основними причинами того є: внутрішні напруження, зменшення термовтоми через багатократне нагрівання та охолодження мікрооб'ємів та утворення ультрадисперсної структури.

Недоліком узагальненої моделі є лише те, що вона не пояснює зв'язок між мікротвердістю електродного матеріалу та легованого шару.

## 1.2 Електродні матеріали для ЕІЛ

В якості електродного матеріалу для ЕІЛ переважно обирають сплави ВК і ТК [3]. Такий вибір обґрунтований високою твердістю та зносостійкістю даних сплавів. Якщо такий зв'язок властивостей електрода з властивостями отриманого шару ще можна вважати придатним з деякими обмеженнями, то у випадку нанесення покриттів спеціального призначення (жаростійких, корозійних і т.п.) — недоцільно.

Часто при виборі електрода звертають увагу на розчинність з матеріалом

основи. Бажаною є необмежена розчинність елементів в твердому стані [3]. Для прикладу можна навести такі пари як Fe-Cr, Cu-Ni, Fe-Ni.

Далі розглянуті матеріали, які використовуються в якості анодів для ЕІЛ.

### **1.2.1 Вольфрам та його карбіди**

Вольфрам здебільшого використовується у виготовленні твердосплавів — точніше його карбіди — та для легування різних сплавів, наприклад сталей [9]. WC — з температурою плавлення  $2770^{\circ}\text{C}$  [10] (рис. А.1 на стор. 67) має високу електропровідність, що важливо для процесу ЕІЛ, та використовуються для створення зносостійких абразивів [11].

Так у випадку легування гальванічних покриттів вольфрамом в [12] зазначається, що мікротвердість отриманого покриття може сягати  $8,3\text{ ГПа}$  в залежності від концентрації легуючого елементу, тобто вольфраму.

### **1.2.2 Хром**

Як електрод для ЕІЛ використовується для підвищення зносо- та жаростійкості, покращення стійкості ріжучого інструмента. Як матеріал основи для легування хромом найчастіше виступають сталь 30, 45, 40Х, У10А ХВГ, ВТ2, Сі [3]. Хром відноситься до перехідних металів, необмежено розчинний з залізом [13] (рис. А.2 на стор. 68). За рахунок цього при ЕІЛ товщина білого шару може сягати від  $50\text{ мкм}$  до  $60\text{ мкм}$  [14]. Хром не схильний до утворення вторинних структур, які можуть перешкоджати нанесенню матеріалу на оброблювану поверхню. Випадок з легуванням хромом свідчить про те, що не завжди більший твердості покриття відповідає більше значення зносостійкості [1].

### 1.2.3 Багатошарове нанесення металів з графітом

Метод електроіскрового легування дає широкі можливості по нанесенню шарів: великий вибір електродів, режими легування, насичуюче середовище. До цього ще можна додати комбінування легованих шарів. Тобто створюють системи з чергуванням твердих та м'яких складових у вигляді як гетерогенних матричних, так і багатошарових структур. Такі системи утворюють двома шляхами: або нанесенням багатошарових покриттів тільки методом ЕІЛ, або комбінування різних методів поверхневих обробок. В першому випадку нанесення в основному проводять для зміцнення(ціллю не є відновлення) ріжучого і штампового інструмента. Наприклад: двошарові покриття твердосплав-графіт, мідь-графіт, хром-графіт або чергування твердосплавів [3]. Також нанесення другого шару проводять для покращення тепловідводу [3], підвищення жаростійкості [15]. При цьому важлива узгодженість коефіцієнтів термічного розширення та адгезійна міцність між шарами та з основою [16].

Багатошаровим нанесенням можна керувати товщиною та шорсткістю легованого шару. Встановлено [17], що для створення білого шару більшої товщини потрібно наносити шари в такій послідовності: графіт, сплав, а для отримання меншої шорсткості вигідніше наносити спочатку сплав, а потім графіт. Також проблему товщини шару вирішують електроди, які утворюють необмежені тверді розчини.

### 1.3 Якісна модель ЕІЛ

Таким чином на основі розглянутих літературних даних можна висловити якісну модель електроіскрового легування з урахуванням підібраних анодних матеріалів у роботі. Також попередні моделі не враховують вплив міжелектродного середовища, яким в даній роботі виступає повітря (кисень —  $\approx 20\%$ , азот —  $\approx 70\%$ ), на формування легованого шару.



Опис зближення електродів відповідає моделі Верхотурова, а саме йде мова про наявність надвисоких швидкостей нагрівання, що призводить до локалізованого розплавлення або навіть випаровування матеріалів аноду та катоду.

За цим матеріал аноду переноситься у розплавлену “мікрованну” в катоді та перемішується. При цьому частки можуть перебувати в трьох агрегатних станах: рідкому, твердому та газоподібному. Під час переносу матеріалу відбувається іонізація та розкладання молекул газового середовища з утворенням атомарного азоту, який може насичувати розплавлені об’єми обох електродів [18].

Через малу тривалість термічної дії іскрового розряду не відбувається повне вирівнювання концентрацій в “мікрованні”. Внаслідок цього в легованому шарі можуть формуватися ділянки, які відрізняються за своїм хімічним складом, які відповідно можуть мати різні коефіцієнти термічного розширення. При надшвидкому охолодженні це призводить до виникнення високих термічних напружень, які додаються до структурних, які в свою чергу зумовлені різким градієнтом температур [18]. Під дією цих напружень виникають дислокації, які переміщуються та в результаті взаємодії між собою утворюють гальмуючі скупчення, які подібні до зон Гін’є Престона. Після повторних імпульсних нагрівань концентрація атомів зростає та зони передвиділень перетворюються у дисперсні частинки фаз втілення [18]. Така нерівноважна структура може бути передумовою високої мікротвердості та зносостійкості.

#### **1.4 Висновки до розділу 1**

Отже, щодо ЕІЛ можна зробити висновок, що це метод, який дозволяє проводити ефективний, та керований процес обробки поверхонь металевих матеріалів. Сутність методу також дозволяє використання майже будь-яких електродних матеріалів і внаслідок цього доступний широкий діапазон поліпшення експлуатаційних характеристик поверхонь.

Відповідно до розглянутих матеріалів, можна стверджувати, що використання

вольфраму, хрому та вуглецю як анодних матеріалів дає можливість відновити та підвищити зносостійкість поверхні певної деталі. Присутність графітового аноду в схемах нанесення спонукає до розгляду таких факторів зміцнення, як формування карбідних складових.

Розглянута якісна модель ЕІЛ, основними етапами якої є:

- взаємодія атомів матеріалів (W,Cr) з атомами втілення (N, C) за екстримальних умов;
- утворення локальних ділянок на катоді, які відрізняються між собою за хімічним складом та виникнення полів напружень, внаслідок надшвидкого охолодження;
- дифузія областей передвиділень на скупченнях дислокацій з подальшим перетворенням їх на фази втілення (карбіди, нітриди, карбонітриди).

## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Вихідні матеріали

В якості матеріалу для формування покриттів ЕІЛ обрана сталь 45, яка має задовільну зварюваність та собівартість. В табл. 2.1 наведений хімічний склад даного матеріалу та використаних анодів.

Таблиця 2.1 — Хімічний склад вихідних матеріалів для дослідження [19]

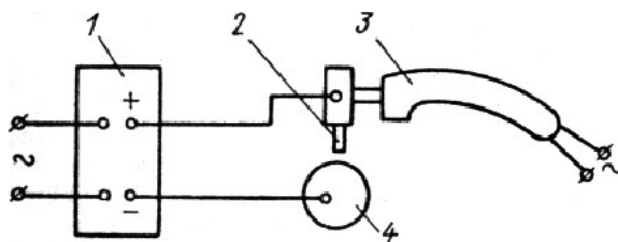
Матеріал	Використання у досліді	Хімічний склад, мас.%
Сталь 45	Катод	C — 0,42..0,5; Si — 0,17..0,37; Mn — 0,5..0,8; Ni — до 0,25; S — до 0,04; P — до 0,035; Cr — до 0,25; Cu — до 0,25; As — до 0,08; Fe — 97
Cr	Анод	Cr — 99,9
C	Анод	C — 99,9
W	Анод	W — 99,9

Для отримання зносостійкої поверхні з високою мікротвердістю обрані аноди, які можуть утворювати карбо- та карбонітридні сполуки. Хром в комбінованому шарі слугує “м’якою підкладкою”, яка може утворювати з залізом твердий розчин з необмеженою розчинністю (рис. А.2).

### 2.2 Методика експерименту

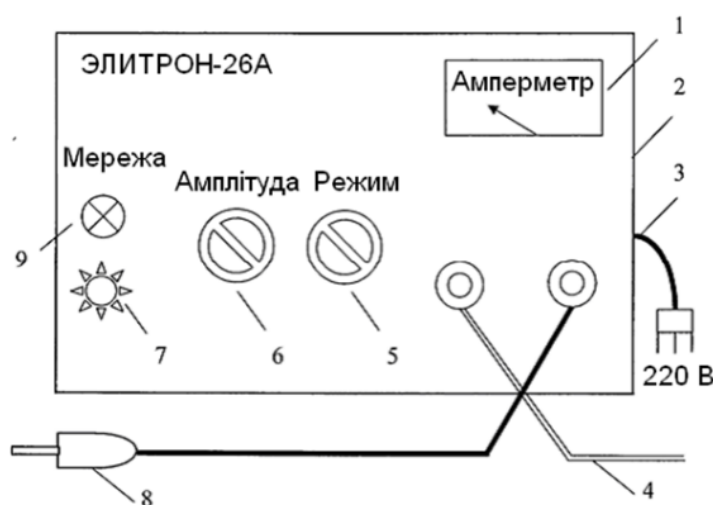
Схема проведення ЕІЛ зображена на рис. 2.1. Зразок (4) надійно закріплюється тримачем, а віброелемент (3) переміщується (вручну) над його поверхнею.

Електроіскрове легування проводилось на установці «Елітрон-26А». На рис. 2.2 зображена панель керування даною установкою. Живлення установки дає мережа 220 В. Тумблером 5 здійснюється корегування струму, що показує амперметр 1, у діапазоні від 0,1 А до 3 А режимами від 1 до 10. Для обох зразків режим становив 2 А і процес відбувався на повітрі за кімнатної температури.



1 — генератор імпульсів; 2 — легуючий електрод; 3 — електромагнітний віброелемент; 4 — зразок (катод)

Рисунок 2.1 — Схема установки для ЕІЛ [2]



1 — амперметр; 2 — генератор; 3 — кабель живлення; 4 — з'єднувальний кабель (на катод); 5 — тумблер ступінчастого регулювання режиму; 6 — тумблер регулювання амплітуди коливання аноду; 7 — вмикач живлення установки; 8 — віброелемент (на анод); 9 — сигнальна лампочка

Рисунок 2.2 — Панель керування установки «Элитрон-26А» [2]

Для досягнення мети дослідження було проведено ЕІЛ чотирьох зразків за схемами Cr-W-C, W-C-Cr, W-Cr-C, C-Cr-W по 3 хвилини на кожен етап нанесення аноду.

## 2.3 Методика дослідження

В роботі використана комплексна методика дослідження, яка включає гравіметричний метод, мікроструктурний та мікродюрOMETричний аналіз, випробування на зносостійкість. Такий комплекс забезпечує вивчення процесів та явищ згідно з метою роботи та задовільну точність вимірювання.

### 2.3.1 Гравіметричний метод

Метод полягає у вимірюванні маси зразків та електродів до легування та під час процесу з кроком в 1 хвилину. Для вимірювання використовувались лабораторні електронні ваги AXIS AD50 з точністю 0,0005 г.

Для оцінки процесу формування легованого шару визначають такі характеристики як ерозію аноду  $\Delta m^a$  та приріст маси катоду  $\Delta m^k$ . Ці значення розраховуються як різниця маси в момент часу  $t_n$  та за попередній вимір  $t_{n-1}$ :

$$\Delta m_t = m(t_n) - m(t_{n-1}). \quad (2.1)$$

Оскільки сума даних значень дорівнює різниці маси за останній вимір та початкової маси, то сумарна ерозія  $\Delta$  за час  $t$  розраховується за формулою:

$$\Delta_t = m(t) - m(t_0), \quad (2.2)$$

де  $m(t_0)$  — початкова маса перед обробкою;

$m(t)$  — маса після обробки за час  $t$ .

Аналогічно розраховується і приріст ваги катоду  $\Delta_t^k$  але з протилежним значенням. Питомі значення цих величин відображають масоперенос на одиницю пройденного заряду. Таким чином питома ерозія  $G$  за розраховується за формулою:

$$G = \frac{\Delta m_t}{I \cdot \Delta t}, \quad (2.3)$$

де  $\Delta m_t$  — ерозія аноду або приріст ваги катоду;

$I$  — сила струму;

$\Delta t$  — час, за який відбувалася ерозія  $\Delta m_t$ .

Коефіцієнт масопереносу розраховується з відношення:

$$K = \frac{G^a}{G^k}, \quad (2.4)$$

де  $G^a$  — питома ерозія аноду;

$G^k$  — питомий приріст катоду.

Отже для отримання усередненого значення масопереносу маємо за час  $t$ :

$$\bar{K}_t = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} K_i}{n}, \quad (2.5)$$

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  $\Delta_t^k$  (момент першого від'ємного приросту  $\Delta m$ );  $t_{cr}$  — критичний поріг руйнування поверхневого шару — час, якому відповідає нульове значення  $\Delta_t^k$ , при  $t \neq 0$ .

Отже згідно з [4] можемо розрахувати ефективність процесу утворення зміненого поверхневого шару:

$$Y_{t_x} = \bar{K}_{t_x} \cdot t_x \cdot \sum_{t=0}^{t_x} \Delta m_t^k; \quad (2.6)$$

та ефективність процесу утворення зміненої поверхні:

$$Y_{t_{cr}} = \bar{K}_{t_{cr}} \cdot t_{cr} \cdot \sum_{t=0}^{t_{cr}} \Delta m_t^k. \quad (2.7)$$

Останні дві характеристики дають можливість порівнювати матеріали електродів за їх впливом на формування шару [3].

### 2.3.2 Мікроструктурний аналіз

Для дослідження за допомогою оптичного мікроскопу зі зразків виготовляли металографічні поперечні мікрошліфи. Підготовка шліфів проводилась таким чином. Зразки затискаються у струбціні і шліфуються на абразивному колі. Далі проводиться поетапне шліфування на корундових паперах зі зміною напрямку шліфування перед переходом на папір з меншим зерном. Після отримання поверхні з задовільною шорсткістю без подряпин проводять полірування на фетрі

з використанням оксиду хрому, а потім на воді. Отримані шліфи протравлені 5 % розчином азотної кислоти в етиловому спирті.

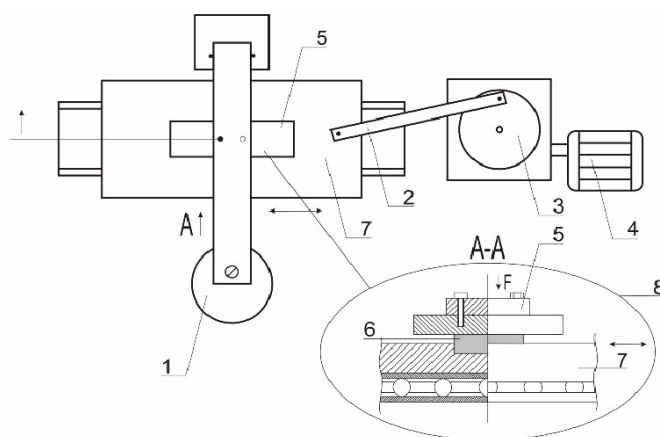
Дослідження та фотографування мікроструктури проводилось на металографічному мікроскопі МІМ-10 при збільшенні у 400 разів.

### 2.3.3 МікродюрOMETричний аналіз

Мікротвердість зразків вимірювали на приладі ПМТ-3М. Визначення мікротвердості полягає у вдавлюванні індентора при навантаженні 0,02 кг протягом 10 секунд. Індентор — алмазна пірамідка з квадратною основою і кутом при вершині  $136^\circ$ . За допомогою об'єкт-мікрометра визначають довжини діагоналей ромбу декілька разів. По табличним даним приладу визначається мікротвердість в ГПа за середнім значенням діагоналей видавленого ромба.

### 2.3.4 Випробування на зносостійкість

Випробування на зносостійкість проводилась на установці, схема якої зображена на рис. 2.3, в умовах сухого тертя за схемою “площина по площині” протягом 2 годин.



1 — навантаження; 2 — шатун; 3 — колінчата передача; 4 — електродвигун;  
5 — контртіло; 6 — зразок; 7 — станина; 8 — загальна схема тертя

Рисунок 2.3 — Схема оригінальної установки на тертя без мастила

Обертання від електродвигуна постійного струму передається на шатун. Рухома платформа здійснює зворотно-поступальний рух по коліям за допомогою шатуна, прикріпленого до обертальної частини редуктора. На рухомій платформі розміщено досліджуваний зразок, який контактує з контртілом (сталь Р6М5), закріпленим на важелі, під час дії навантаження (гиря) 3 кг.

Величина зношування вимірювалася ваговим методом. Зразок через кожні 30 хв зважується на вагах AXIS AD50 (стор. 21). За втратою маси обчислюється показник інтенсивності зношування:

$$I = \frac{\Delta m}{S}, \quad (2.8)$$

де  $\Delta m$  — втрата маси, кг;

$S$  — площа поверхні тертя зразка,  $\text{м}^2$ .

### 2.3.5 Рентгеноструктурний аналіз

Рентгеноструктурний аналіз — це ідентифікація кристалічних фаз і визначення їх відносних концентрацій у сумішах на основі аналізу дифракційної картини, яку реєстрованої від досліджуваних зразків [20].

Аналіз полягає у проведенні порівняння експериментальних значень міжплощинних відстаней і відносних значень інтенсивності з довідковими даними (еталонні рентгенограми). Таким чином можна визначити склад неметалевих включень в металах та ідентифікувати окремі фази гетерогенної системи.

Рентгеноструктурний аналіз зразків проводився на дифрактометрі Rigaku Ultima 4. Зйомки велись на мідному монохроматизованому випроміненні при напрузі 30 кВ та струмі 30 мА.

Ідентифікація фаз проводилась за картотекою ASTM шляхом порівняння експериментальних даних та даних з міжплощинних відстаней ( $d$ ) та інтенсивності ліній, які були отримані при зйомці рентгенограм. При кількості збігів менше трьох рефлексів визначена фаза вважалася відсутньою.



Визначення міжплощинних відстаней проводилося за формулою Вульфа-Бреггів:

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (2.9)$$

де  $d$  — міжплощинна відстань;

$\theta$  — бреггівський кут.

Період ґратки матеріалу розраховується за формулою:

$$a = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \sqrt{H^2 + K^2 + L^2}, \quad (2.10)$$

де  $H, K, L$  — індекси площин відбиття;

$\lambda$  — довжина хвилі.

Рентгенограми, які отримані від багатозфазних систем є результатом накладання дифракційних ліній від окремих фаз. Фаза, вміст якої відносно малий, може бути представлена на рентгенограмі лише невеликою кількістю найбільш інтенсивних ліній.

### 2.3.6 Комп'ютерні методи

Зручно організований обчислювальний процес — один з найважливіших етапів проведення прикладних досліджень або виконання інженерних розрахунків. Зараз комп'ютерні можливості дозволяють виконувати складні автоматизовані алгоритми з гнучким налаштуванням та високою швидкістю виконання. Також використання автоматизованих алгоритмів в роботі допомагає виключати помилки людського чиннику, особливо ті, які відбуваються під час ручного виконання однотипних операцій — явище “блукаючого розуму” [21].

Отже для реалізації обчислювального середовища для вирішення матеріалознавчих задач необхідне і достатнє використання таких пакунків на базі мови програмування Python:

- NumPy — пакет для високошвидкісної роботи з масивами даних;
- Pandas — зручний засіб для початкової обробки даних, завантаження їх в обчислювальне середовище, вибору значень за певними критеріями,

роботи з пропущеними даними, експорту даних в вигляді таблиць в середовище  $\text{\LaTeX}$ ;

- Matplotlib — пакет для візуалізації результатів обчислень, дозволяє здійснювати гнучке налаштування графіків, впроваджувати формульні написи на графіках з використанням середовища  $\text{\LaTeX}$ ;
- Scikit-image — пакет для обробки зображень.

Таким чином для реалізації обробки результатів розроблені виконуючі програми для гравіметричного, мікроструктурного та мікродюрOMETричного аналізів. Лістинги розроблених скриптів наведені в додатку Б.

## 2.4 Висновки до розділу 2

Для досягнення поставленої задачі переддипломної практики розроблений та проведений процес ЕІЛ сплаву сталі 45 анодами Cr, C, W без захисного середовища на повітрі за схемами Cr-W-C, W-C-Cr, W-Cr-C, C-Cr-W.

Обґрунтовано вибір вихідних матеріалів та легувальних електродів для дослідження.

Визначена комплексна методика дослідження, яка дає можливість отримати достовірні результати вимірювання, які дозволяють детально проаналізувати отримані експериментальні дані та дати їм об'єктивну оцінку.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1 Формування покриття на сталі 45 під час ЕІЛ за схемою Cr-W-C

Дослідження зразка сталі 45, після ЕІЛ за схемою легування Cr-W-C, показало, що товщина легованого шару знаходиться в межах від 15 мкм до 35 мкм. На деяких ділянках спостерігається розтріскування (рис. 3.1). Під легованим шаром роташовується тонка смуга зони термічного впливу з дрібними зернами.

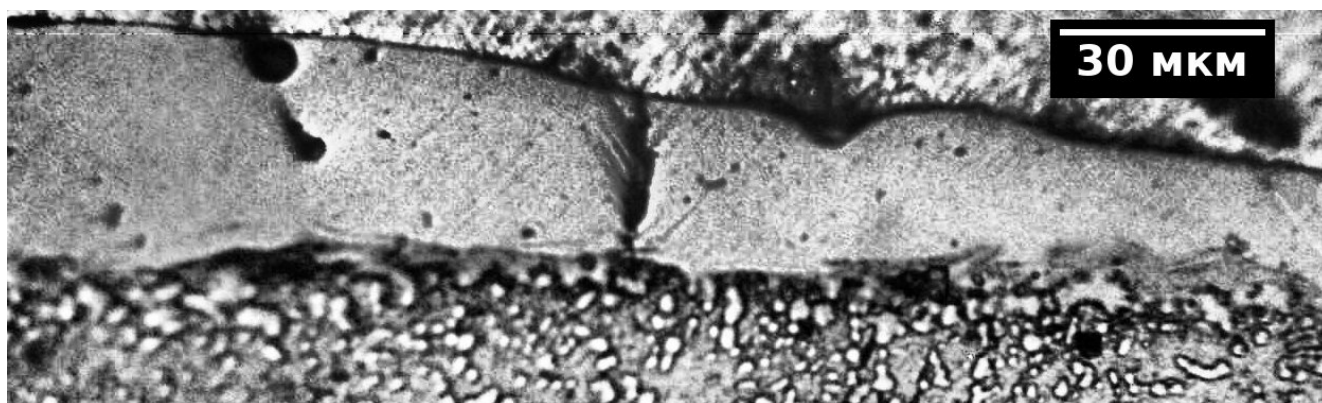


Рисунок 3.1 — Мікроструктура поверхні сталь 45 після ЕІЛ за схемою Cr-W-C

За результатами гравіметричного аналізу були кінетичні криві масопереносу (сумарного приросту маси катоду  $\sum \Delta m_k$  та сумарної ерозії анодів  $\sum \Delta m_a$ ), які наведені на рис. 3.2.

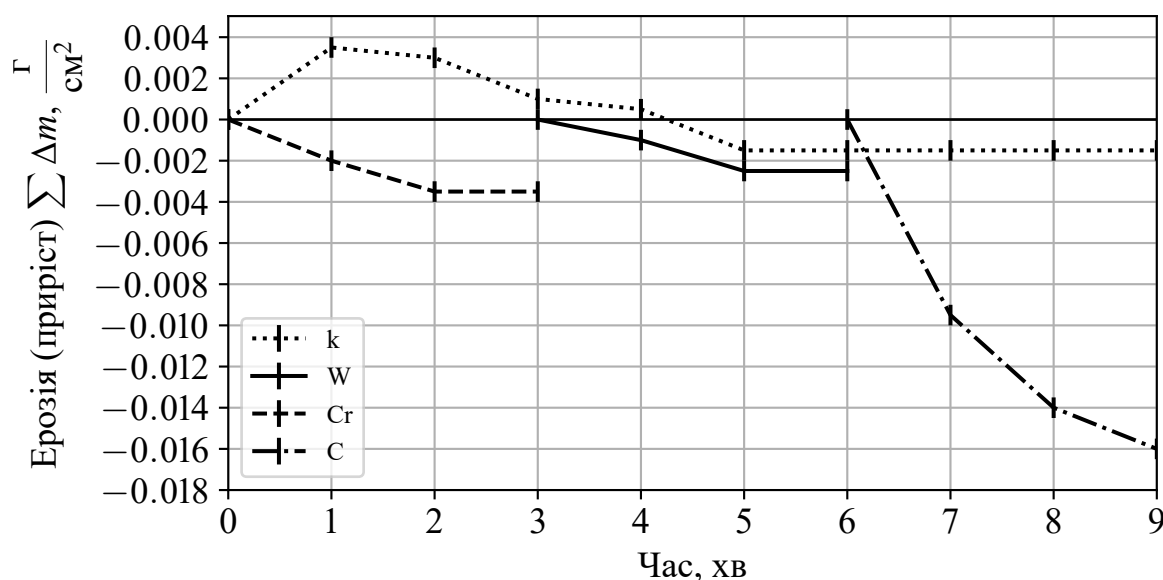


Рисунок 3.2 — Кінетика масоперенесення під час ЕІЛ за схемою Cr-W-C

На першому етапі легування (нанесення хрому) спостерігається додатній приріст маси катоду. Критичний поріг руйнування поверхневого шару знаходиться на 4-й хвилині процесу, тобто на першій хвилині нанесення вольфраму.

Третій етап, а саме легування графітом не вніс зміни на катод. Ерозія анодних матеріалів відбувається під час кожної стадії ЕІЛ. Слід зазначити, що сумарна ерозія W-аноду є найменшою з усіх обраних матеріалів через його тугоплавкість. Найбільшу ерозію має графітовий електрод, оскільки для нього характерний великий опір (від  $3 \times 10^{-5}$  мкОм·м до  $60 \times 10^{-5}$  мкОм·м [22]). Розрахована ефективність за формулами (2.6) і (2.7) становить відповідно 2 та 4,5.

Фазовий аналіз показав, що в покритті присутні такі фази карбідів  $\varepsilon$ -Fe<sub>3</sub>C та Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, а також графіт у незв'язаному стані (рис. 3.1, табл. 3.3).

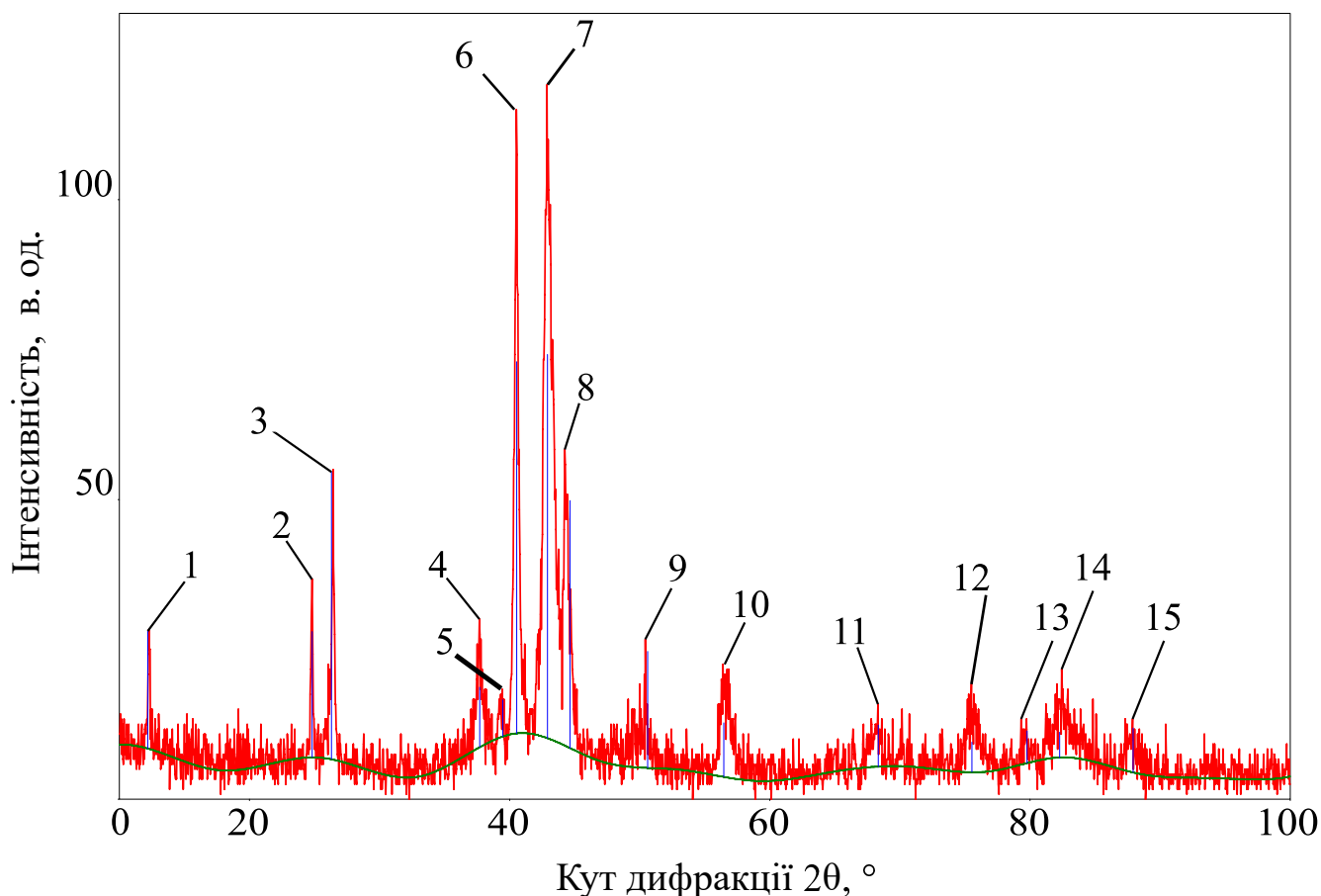


Рисунок 3.3 — Дифрактограма покриття Cr-W-C після ЕІЛ сталі 45

Розраховані періоди кристалічних ґраток кожної фази, параметри субструктури (області когерентного розсіювання та мікрвикривлення ґратки) наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.1 — Фазовий склад покриття Cr-W-C після ЕІЛ сталі 45

№	Кут дифракції $2\theta$ , °	Міжплощинна відстань $d$ , Å	Фаза	HKL
1	12	7,2516	графіт	004
2	25	3,5843	графіт	008
3	26	3,3850	графіт	002
4	38	2,3846	$\epsilon$ -Fe <sub>3</sub> C	110
5	39	2,2808	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	112
6	41	2,2230	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	203
7	43	2,1052	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	113
8	45	2,0277	графіт	101
9	51	1,8021	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	301
10	56	1,6284	$\epsilon$ -Fe <sub>3</sub> C	112
11	68	1,3717	$\epsilon$ -Fe <sub>3</sub> C	300
12	76	1,2583	графіт	110
13	80	1,2012	$\epsilon$ -Fe <sub>3</sub> C	220
14	82	1,1714	$\epsilon$ -Fe <sub>3</sub> C	302
15	88	1,1096	графіт	006

Таблиця 3.2 — Параметри структури покриття Cr-W-C

Фаза	Періоди ґратки, Å			Розміри ОКР, Å	Мікронапруження $\frac{\Delta d}{d}$ , %
	a	b	c		
$\epsilon$ -Fe <sub>3</sub> C	4,77	—	4,44	83	0
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	5,55	2,81	11,44	9	0,00312
графіт	2,46	4,15	28,67	90	0,342

На рис. 3.4 за даними мікродюрOMETричного аналізу поперечного мікрошліфа зразка сталі 45 з нанесеним шаром Cr-W-C побудована залежність мікротвердості від глибини залягання. Виміри проводилися до глибини 50 мкм. Кожне вимірне значення є середнім арифметичним трьох вимірів на відповідній глибині.

Таким чином виявлено, що при легуванні з використанням схеми Cr-W-C на повітрі найбільше значення мікротвердості становить 11,5 ГПа, що приблизно у 5 разів більше за мікротвердість сталі 45 (2,4 ГПа [19]).

За результатами випробування на зносостійкість в умовах сухого тертя за схемою “площина по площині” протягом 2 годин гравіметричним методом побудована часова залежність інтенсивності зношування для зразку Cr-W-C (рис. 3.5).

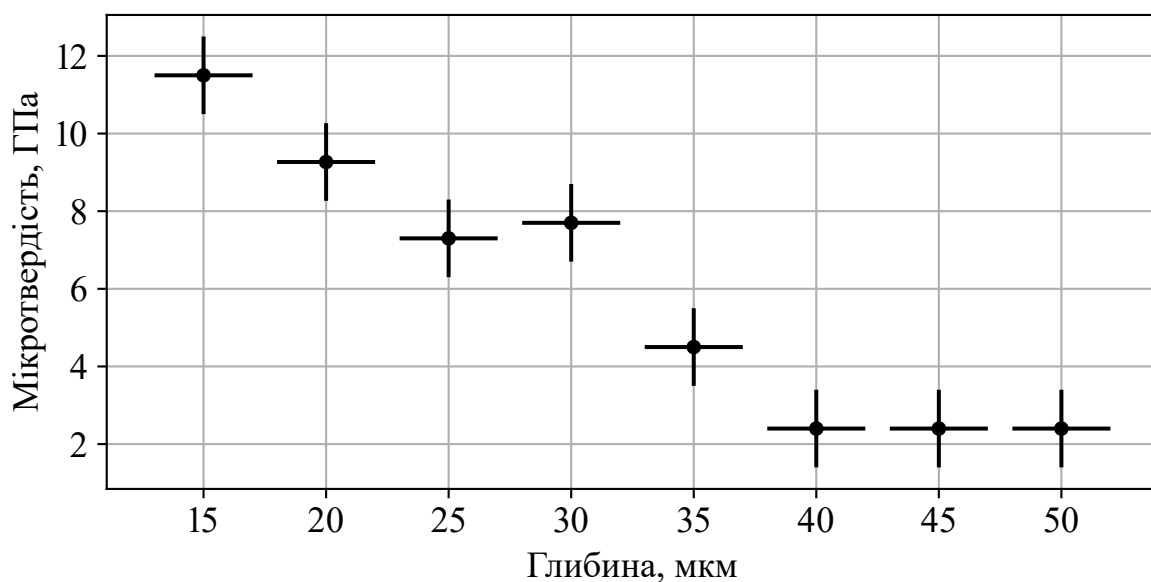


Рисунок 3.4 — Мікротвердість поверхневої зони сталі 45 після ЕІЛ за схемою Cr-W-C

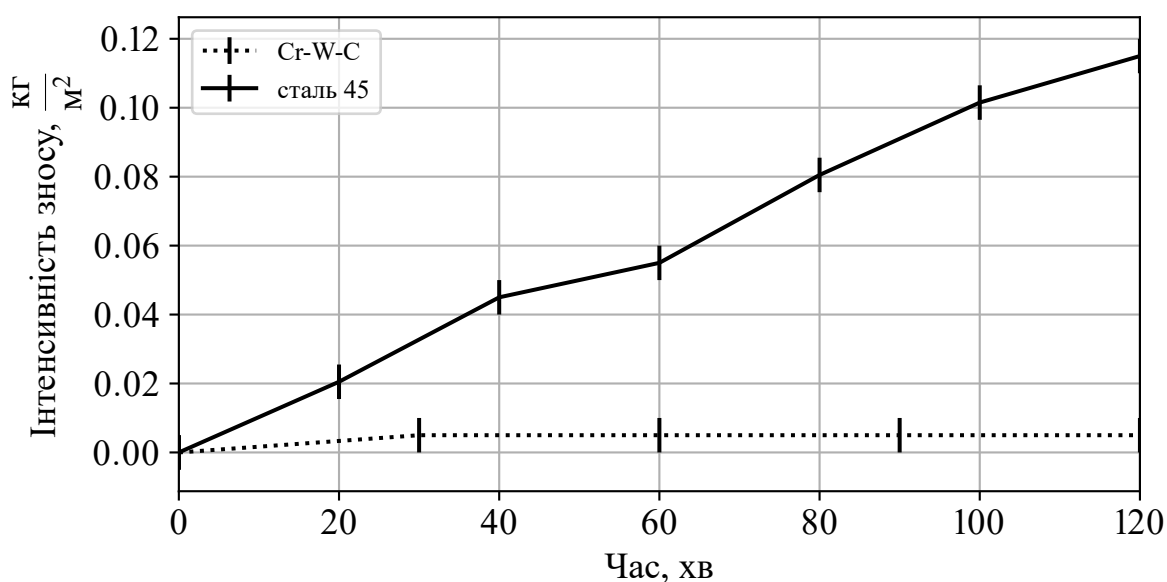


Рисунок 3.5 — Залежність інтенсивності зносу від часу для зразку Cr-W-C

З 30 хвилини зміни показника інтенсивності не спостерігається, виникає так звана “поличка зносу”, яка свідчить про те, що дана поверхня зносостійка. Інтенсивність зносу зразку, який легований за даною схемою у 23 рази менша за інтенсивність зносу сталі 45 без обробки. Таке збільшення може бути спричинене формуванням в легованому шарі вільного графіту.

### 3.2 Формування покриття на сталі 45 під час ЕІЛ за схемою W-Cr-C

В результаті дослідження зразка зі сталі 45, після ЕІЛ з використанням схеми легування W-Cr-C, було встановлено, що товщина легованого шару у середньому становить від 15 мкм до 30 мкм. Покриття має пори та тріщини (рис. 3.6).

Під легованим шаром на мікроструктурі добре спостерігається зона термічного впливу, що може свідчити про високу адгезію з матеріалом основи.

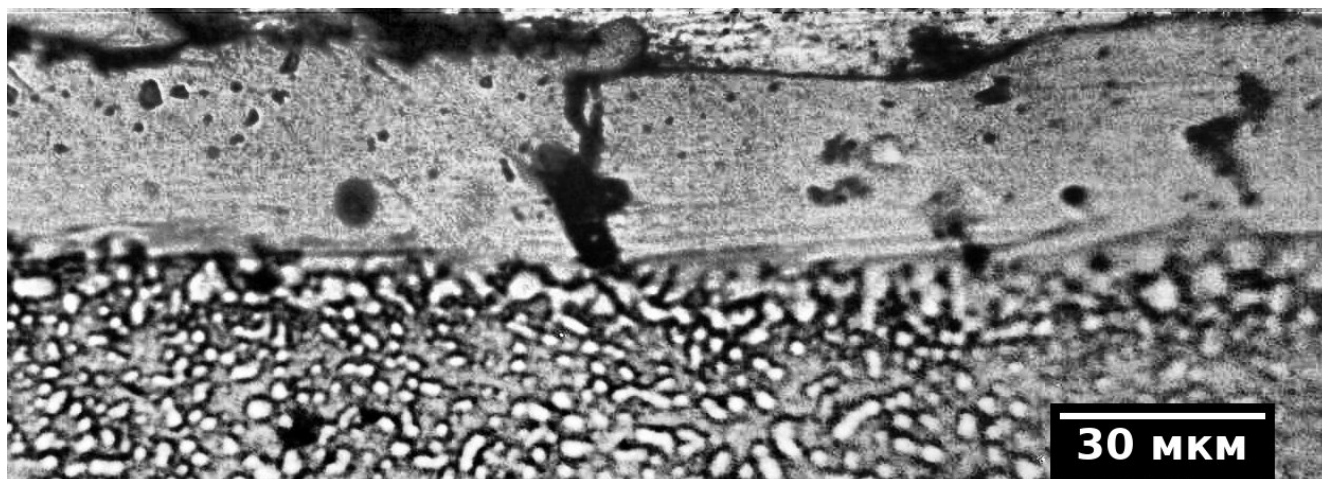


Рисунок 3.6 — Мікроструктура поверхні сталі 45 після ЕІЛ за схемою W-Cr-C

За результатами гравіметричного аналізу була вивчена кінетика масопереносу (рис. 3.7).

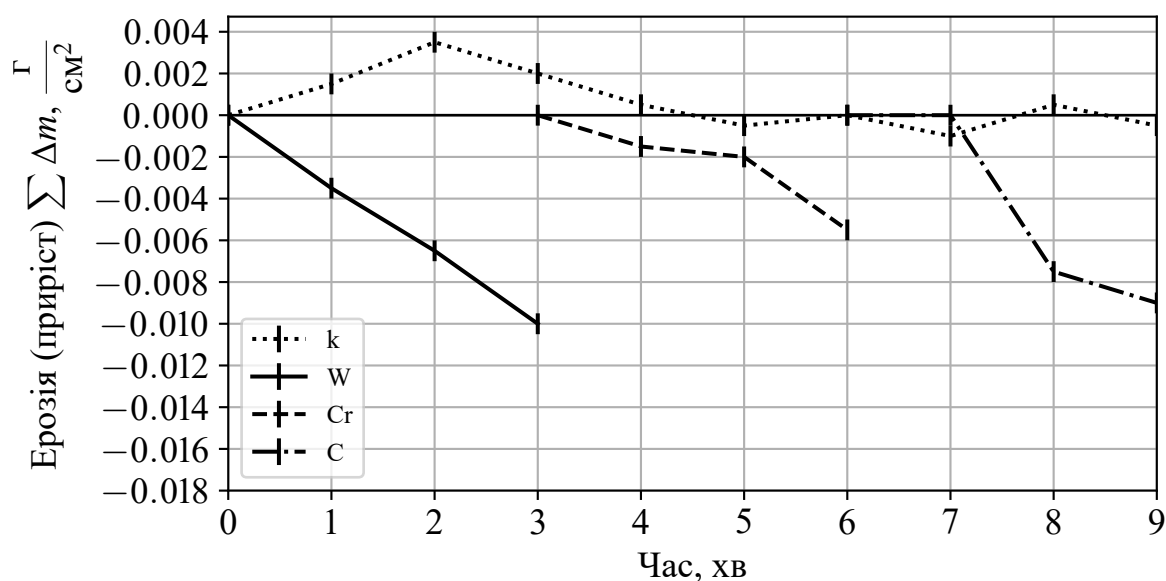


Рисунок 3.7 — Кінетика масоперенесення під час ЕІЛ за схемою W-Cr-C

Перший етап легування вольфрамом дав додатній приріст маси катоду. Критичний поріг руйнування відповідає процесу, коли крива  $\sum \Delta m_k$  перетинає вісь абсцис — 5-ій хвилині. Другий етап легування хромом спричинив ерозію катоду. Другий та третій етап легування майже не вніс змін в приріст маси катоду.

В результаті фазового аналізу отримана дифрактограма поверхні W-Cr-C (рис. 3.8). Внаслідок проведення розшифровки (табл. 3.3) даної дифрактограми в зразку були знайдені карбідні фази WC, W<sub>2</sub>C та Fe<sub>3</sub>C.

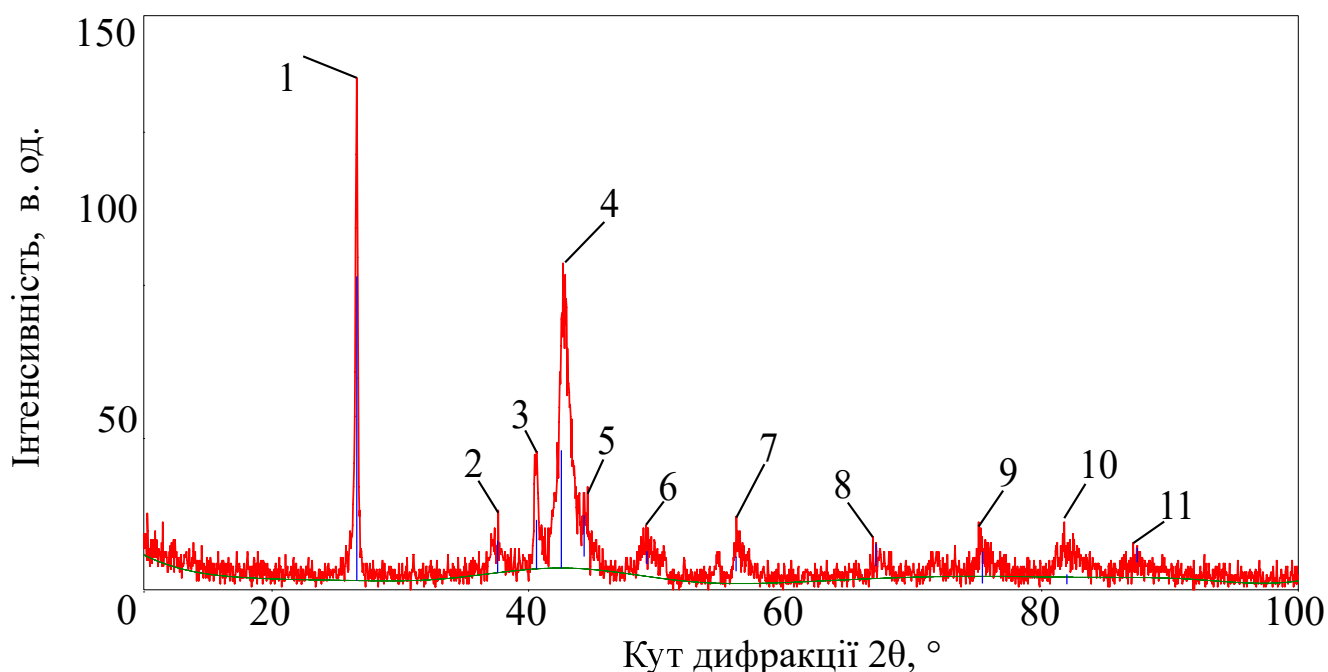


Рисунок 3.8 — Дифрактограма покриття Cr-W-C після ЕІЛ сталі 45

Таблиця 3.3 — Фазовий склад покриття W-Cr-C після ЕІЛ сталі 45

№	Кут дифракції $2\theta$ , °	Міжплощинна відстань $d$ , Å	Фаза	HKL
1	27	3,3483	Fe <sub>3</sub> C	101
2	38	2,3905	W <sub>2</sub> C	002
3	41	2,2193	Fe <sub>3</sub> C	201
4	43	2,1233	W <sub>2</sub> C	211
5	44	2,0414	Fe <sub>3</sub> C	031
6	49	1,8491	WC	101
7	56	1,6366	Fe <sub>3</sub> C	212
8	67	1,3943	WC	002
9	75	1,2598	W <sub>2</sub> C	112
10	82	1,1755	WC	201
11	87	1,1144	Fe <sub>3</sub> C	303



Розраховані періоди кристалічних ґраток кожної фази, параметри субструктури (області когерентного розсіювання та мікровикривлення ґратки) наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 — Параметри структури покриття W-Cr-C

Фаза	Періоди ґратки, Å			Розміри ОКР, Å	Мікронапруження $\frac{\Delta d}{d}$ , %
	a	b	c		
WC	2,9547	2,9547	2,7826	65,16	0,0
W <sub>2</sub> C	2,9924	2,9924	4,7651	8,7	0,0031
Fe <sub>3</sub> C	5,1196	6,7278	4,441	50,97	0,695

За даними мікродюретричного аналізу (рис. 3.9) виявлено, що при легуванні з використанням схеми W-Cr-C на повітрі найбільше значення мікротвердості становить 12,8 ГПа, що приблизно у 6 разів більше за мікротвердість сталі 45. Це можна пояснити формуванням в легованому шарі карбідів вольфраму.

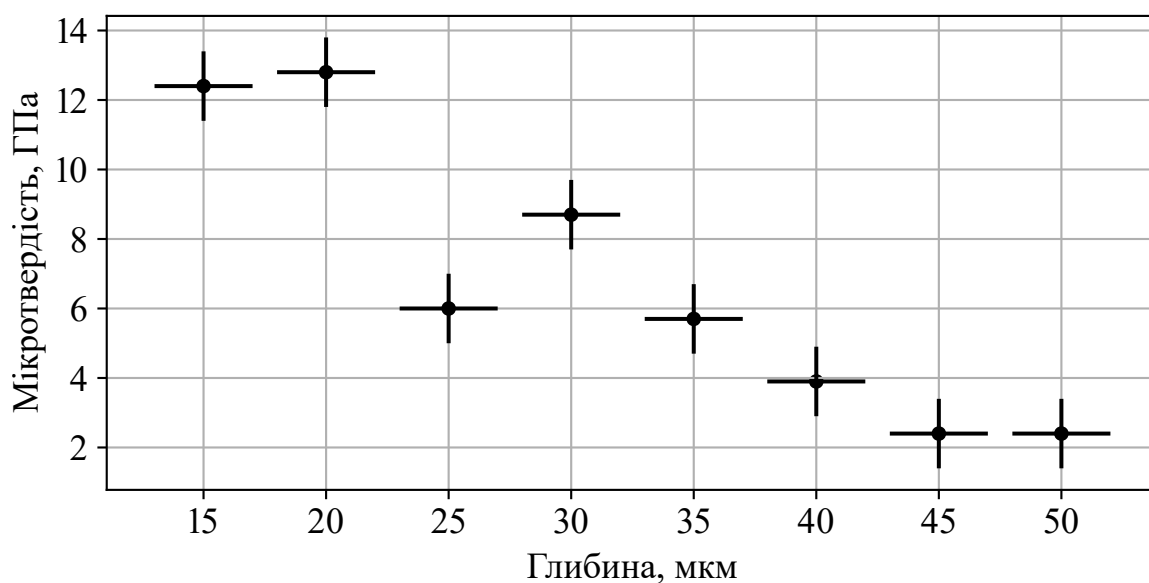


Рисунок 3.9 — Мікротвердість поверхневої зони сталі 45 після ЕІЛ за схемою W-Cr-C

Випробування на зносостійкість було проведено в умовах сухого тертя за схемою “площина по площині” протягом 2 годин. В результаті побудована часова залежність інтенсивності зношування для зразку W-Cr-C (рис. 3.10). При порівнянні інтенсивностей зношування для легованого зразка та зразка без

обробки виявлено, що інтенсивність обробленого зразка у 7,7 разів більша за варіант без сформованого покриття.

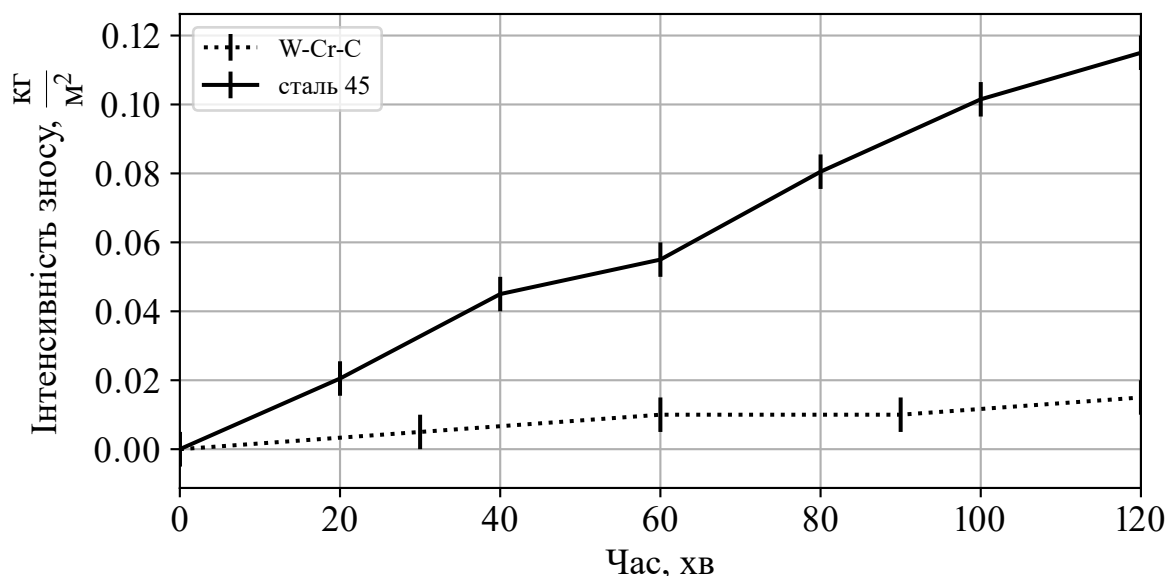


Рисунок 3.10 — Залежність інтенсивності зносу від часу для зразку W-Cr-C

Для даного зразка з обробкою поверхні за схемою W-Cr-C “поличка зносостійкості” виявляється починаючи з 60-ої хвилини випробування.

### 3.3 Формування покриття на сталі 45 під час ЕІЛ за схемою W-C-Cr

В результаті дослідження зразка зі сталі 45, з обробкою ЕІЛ з використанням схеми легування, було встановлено, що товщина легованого шару, одержаного на поверхні сталі 45 після ЕІЛ за схемою W-C-Cr становить від 15 мкм до 25 мкм. Під покриттям спостерігається тонкий шар зони термічного впливу, що може свідчити про міцність зчеплення з матеріалом основи (рис. 3.11).

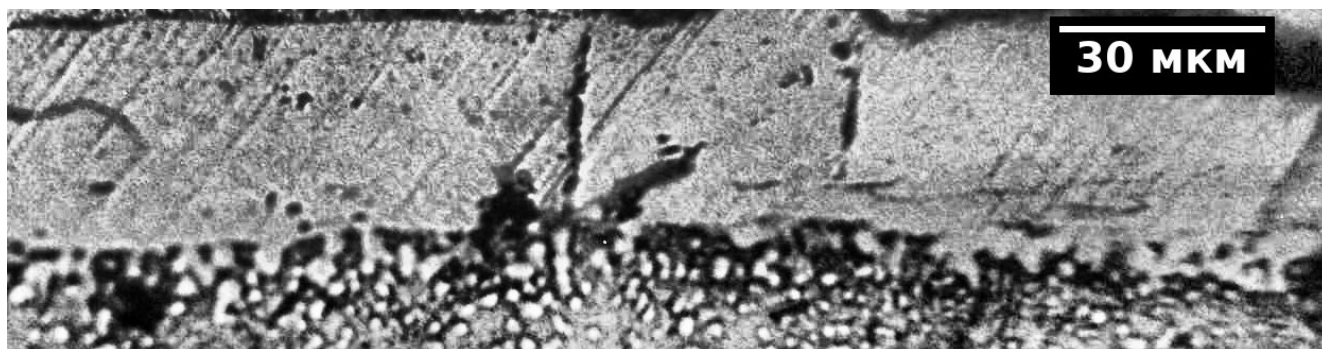


Рисунок 3.11 — Мікроструктура поверхні сталі 45 після ЕІЛ за схемою W-C-Cr

Кінетика масопереносу в процесі ЕІЛ наведена на рис. 3.12.

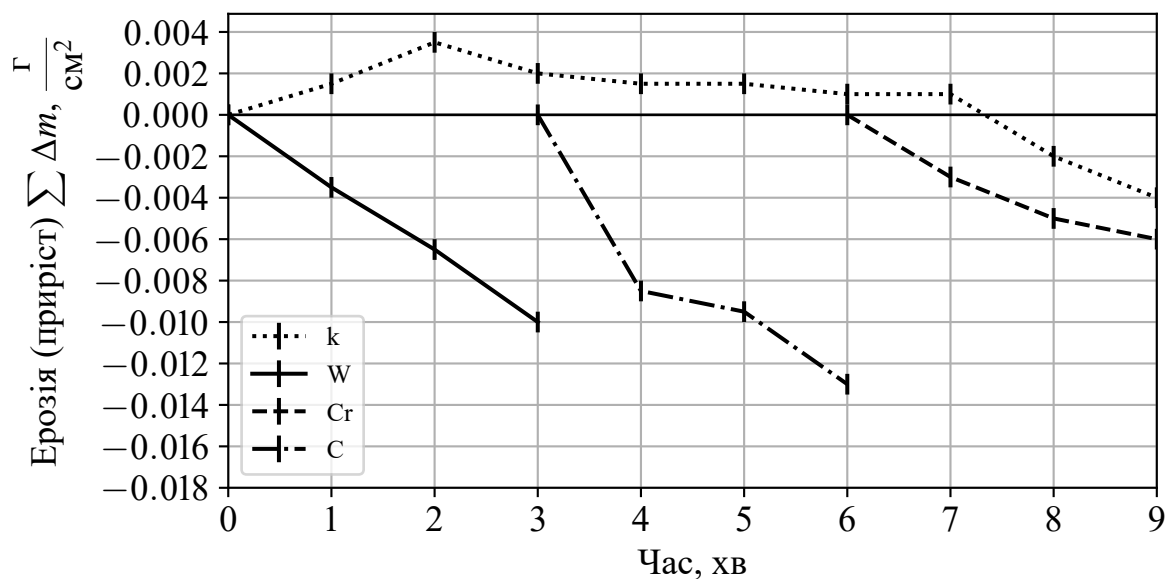


Рисунок 3.12 — Кінетика масоперенесення під час ЕІЛ за схемою W-C-Cr

На першій стадії етап легування вольфрамом зафіксовано додатний приріст маси катоду. На другій та третій стадії крива  $\sum \Delta m_k$  спадає. Розрахований критичний поріг руйнування масмо на 8-ій хвилині.

Для проведення фазового аналізу була отримана дифрактограма поверхні W-C-Cr (рис. 3.13).

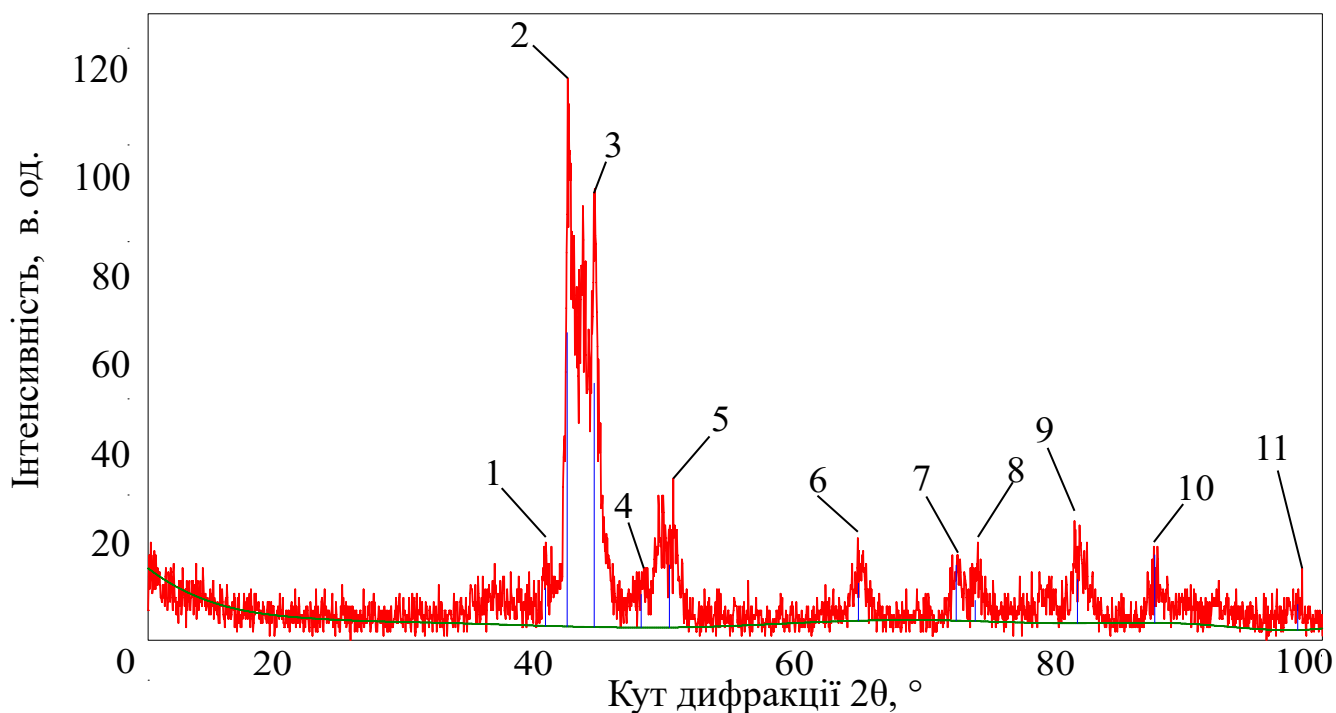


Рисунок 3.13 — Дифрактограма покриття W-C-Cr після ЕІЛ сталі 45

Аналіз піків на дифрактограмі показав, що в зразку присутні такі фази як: Cr, WC, W<sub>2</sub>C, CrC (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 — Фазовий склад покриття W-C-Cr після ЕІЛ сталі 45

№	Кут дифракції $2\theta$ , °	Міжплощинна відстань $d$ , Å	Фаза	HKL
1	40	2,2286	W <sub>2</sub> C	121
2	42	2,1442	Cr	111
3	44	2,0483	CrC	200
4	48	1,9017	WC	101
5	50	1,8246	Cr	200
6	64	1,4444	CrC	220
7	72	1,3115	W <sub>2</sub> C	302
8	73	1,2890	WC	111
9	81	1,1835	Cr	211
10	87	1,1176	WC	201
11	98	1,0197	CrC	400

За даними рентгеноструктурного аналізу розраховані періоди кристалічних ґраток виявлених фаз, їх параметри субструктури. Розраховані дані наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 — Параметри структури покриття W-C-Cr

Фаза	Періоди ґратки, Å			Розміри ОКР, Å	Мікронапруження $\frac{\Delta d}{d}$ , %
	a	b	c		
Cr	3,7272	—	—	242,8	1,582
W <sub>2</sub> C	4,83	6,23	4,54	21,685	0,53
WC	2,845	—	2,916	28,451	1,3212
CrC	4,076	—	4,076	21,626	0,25

МікродюрOMETричним аналізом (рис. 3.14) виявлено, що при легуванні у послідовності W-C-Cr на повітрі найбільше значення мікротвердості становить 18,9 ГПа, що приблизно у 8 разів більше за мікротвердість сталі 45.

Було проведено випробування на зносостійкість в умовах сухого тертя за схемою “площина по площині” протягом 2 годин. За отриманими даними гравіметричним методом побудована залежність інтенсивності зношування від часу випробування для зразку W-C-Cr (рис. 3.15).

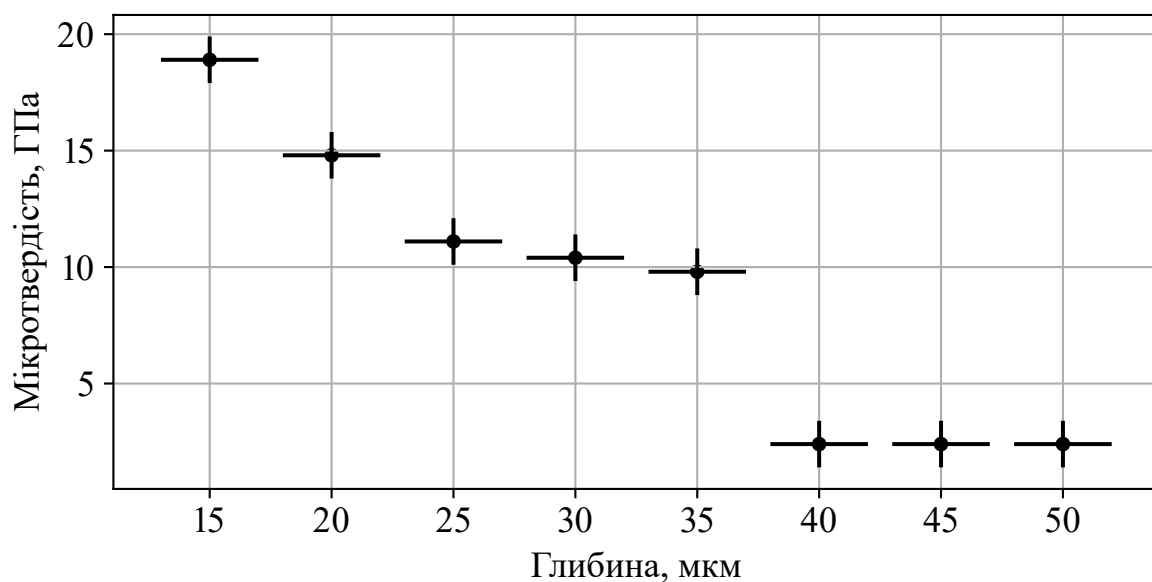


Рисунок 3.14 — Мікротвердість поверхневої зони сталі 45 після ЕІЛ за схемою W-C-Cr

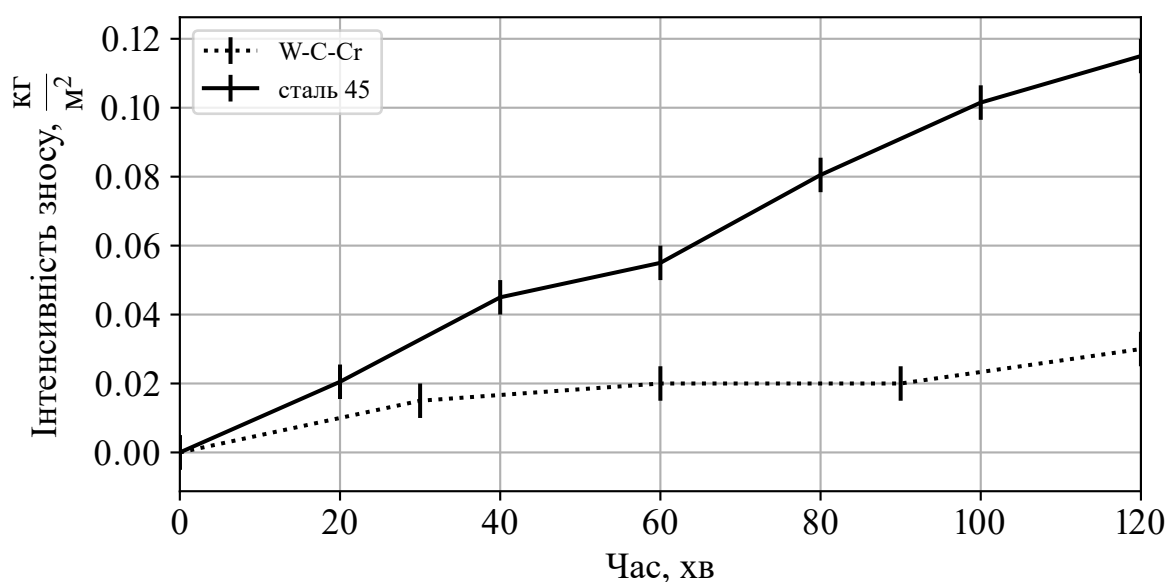


Рисунок 3.15 — Залежність інтенсивності зносу від часу для зразку W-C-Cr

Розраховане відношення інтенсивностей зношування сталі 45 без обробки та сформованої поверхні становить 3,8. Інтенсивність зношування починає вирівнюватися приблизно з 60-ої хвилини випробування.

### 3.4 Формування покриття на сталі 45 під час ЕІЛ за схемою C-Cr-W

Після ЕІЛ сталі 45 у послідовності C-Cr-W мікродюретричним аналізом виявлено, що товщина легованого шару становить від 20 мкм до 30 мкм. Легований шар є несучільним, на деяких ділянках містить тріщини (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 — Мікроструктура поверхні сталь 45 після ЕІЛ за схемою C-Cr-W

Графік кінетики масоперенесення наведений на рис. 3.17.

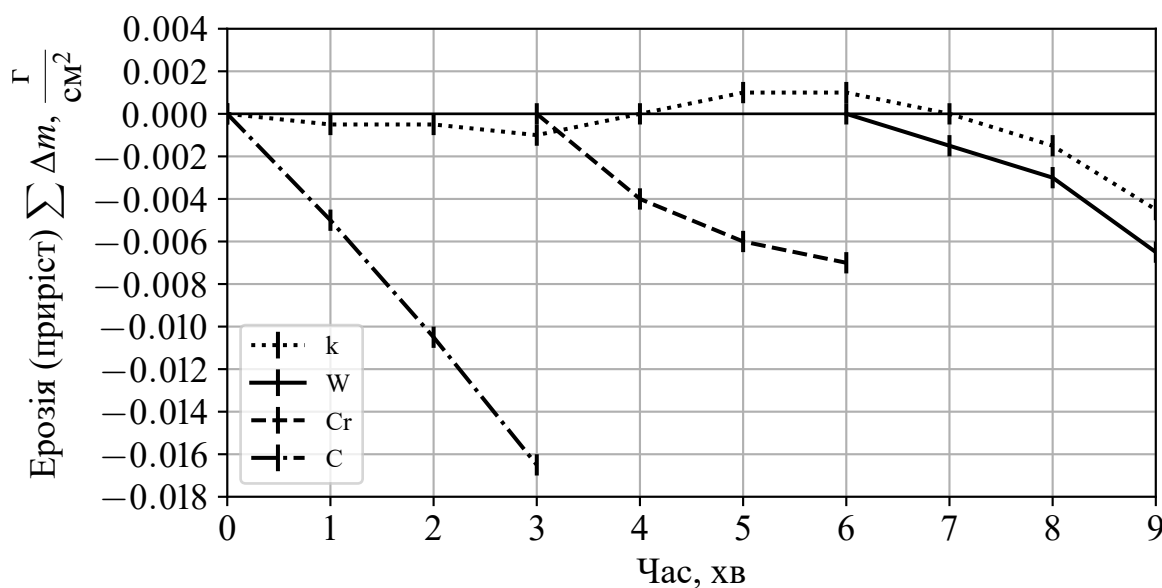


Рисунок 3.17 — Кінетика масоперенесення під час ЕІЛ за схемою C-Cr-W

В процесі легування крива приросту маси катоду зростає лише на 4-й хвилині обробки, під завершення другої стадії обробки після зміни матеріалу аноду на хром. На стадії легування вольфрамом приріст маси катоду від'ємний. Це свідчить про те, що процес легування за обраної схеми у повітряному середовищі має незначну ефективність формування покриття.

Результатом рентгенофазового аналізу є дифрактограма (рис. 3.18), розшифровка якої наведена в таблиці 3.7.

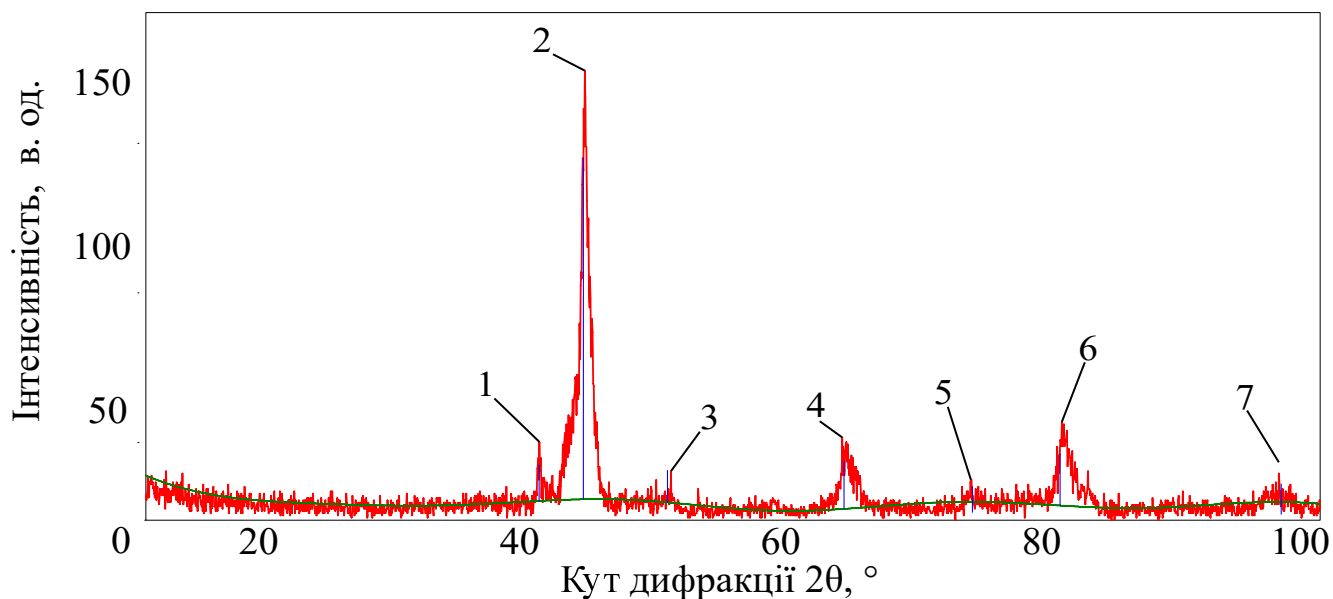


Рисунок 3.18 — Дифрактограма покриття С-Сr-W після ЕІЛ сталі 45

Таблиця 3.7 — Фазовий склад покриття С-Сr-W після ЕІЛ сталі 45

№	Кут дифракції $2\theta$ , °	Міжплощинна відстань $d$ , Å	Фаза	HKL
1	40	2,2456	$W_2C$	11 $\bar{1}$
2	44	2,0768	CrC	200
3	50	1,8232	$Fe_3C$	201
4	64	1,4638	CrC	220
5	73	1,2897	$W_2C$	220
6	80	1,1977	CrC	220
7	97	1,0283	$Fe_3C$	260

Фазовий аналіз показав, що в зразку присутні такі фази як: Cr, WC,  $W_2C$ , CrC (рис. 3.18, табл. 3.7). Розраховані періоди кристалічних ґраток кожної фази, параметри субструктури (області когерентного розсіювання та мікровикривлення ґратки) наведені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 — Параметри структури покриття С-Сr-W

Фаза	Періоди ґратки, Å			Розміри ОКР, Å	Мікронапруження $\frac{\Delta d}{d}$ , %
	a	b	c		
$Fe_3C$	5,0442	6,8375	4,4846	67,13	0,0
CrC	4,1364	4,1364	4,1364	77,113	0,3256
$W_2C$	5,0936	5,0936	4,7618	52,72	0,747

За даними мікродюрOMETричного аналізу (рис. 3.19) виявлено, що при легуванні з використанням схеми C-Cr-W на повітрі найбільше значення мікротвердості становить 14,8 ГПа, що приблизно у 6 разів більше за мікротвердість сталі 45.

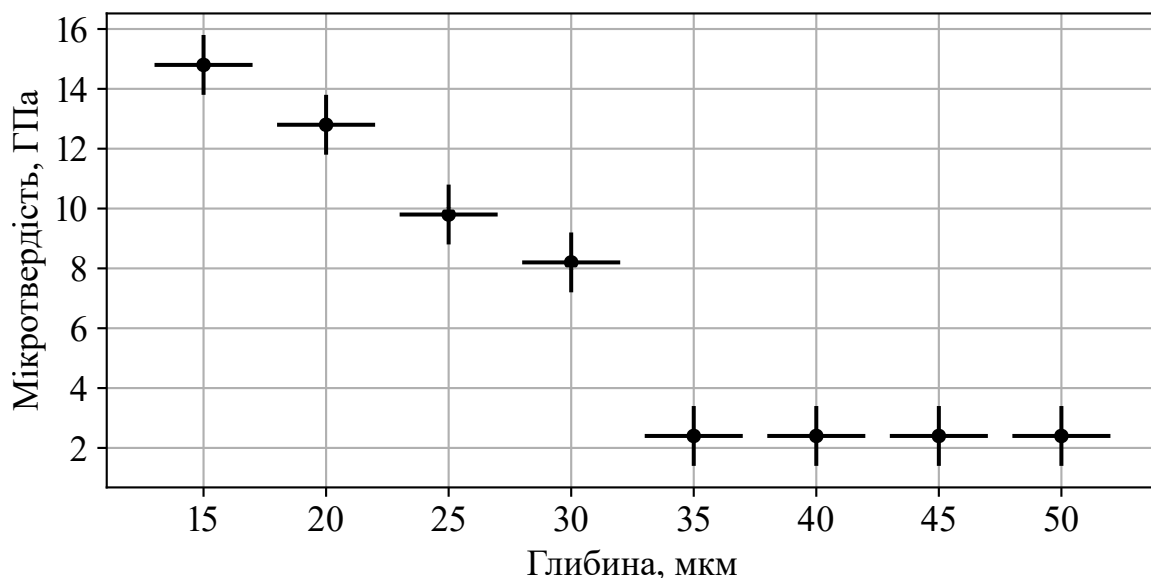


Рисунок 3.19 — Мікротвердість поверхневої зони сталі 45 після ЕІЛ за схемою C-Cr-W

За результатами випробування на зносостійкість в умовах сухого тертя за схемою “площина по площині” протягом 2 годин побудована часова залежність інтенсивності зношування для зразку C-Cr-W (рис. 3.20).

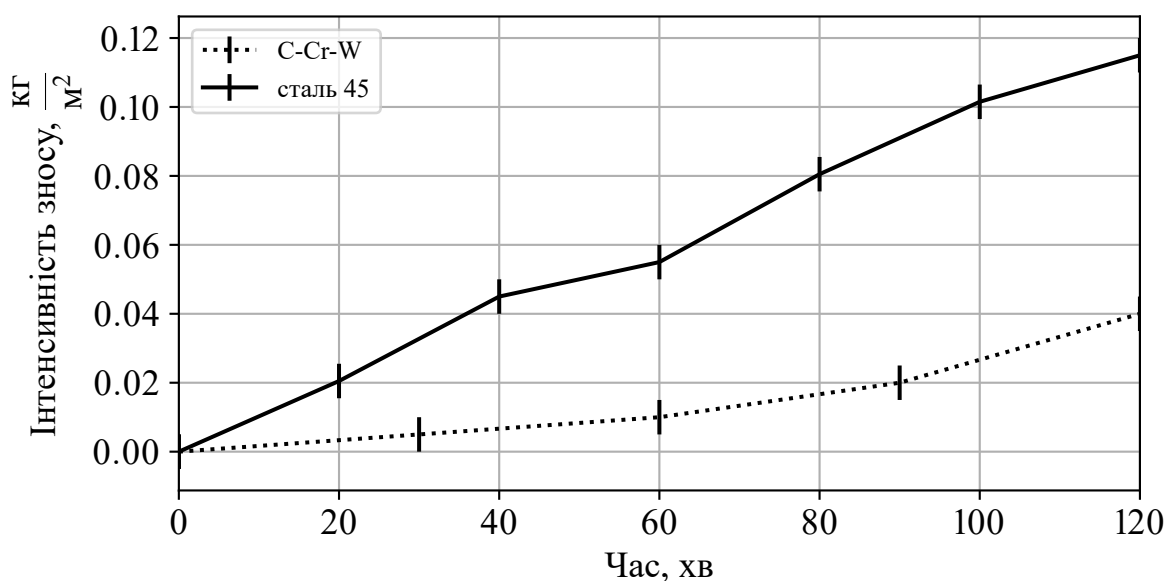


Рисунок 3.20 — Залежність інтенсивності зносу від часу для зразку C-Cr-W



Розраховане відношення інтенсивностей зношування даного зразка та сталі 45 становить 2,9. “Поличка зносостійкості” не спостерігається, інтенсивність для легованого зразку зростає на всьому проміжку часу як і крива інтенсивності зношування для сталі 45.

### 3.5 Порівняльна характеристика

В результаті гравіметричного аналізу в процесі легування для кожного зразка були обраховані дві константи за формулами (2.6) та (2.7), за допомогою яких можна оцінити ефективність утворення легованого шару за процесу ЕІЛ (рис. 3.21).

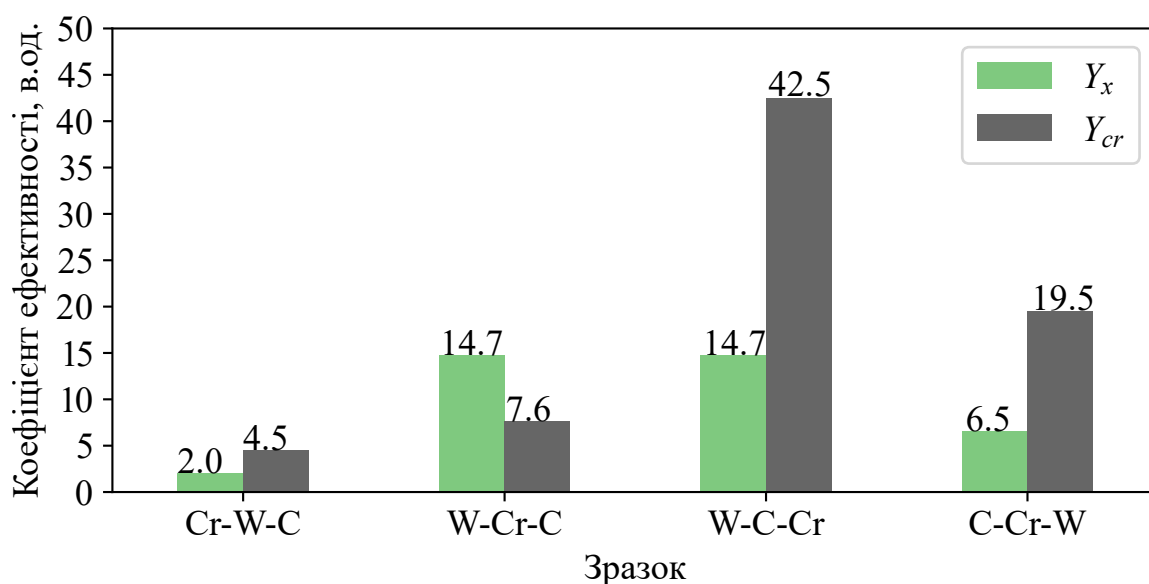


Рисунок 3.21 — Коефіцієнти ефективності утворення легованого шару

За результатами отриманих даних по зразкам Cr-W-C, W-Cr-C, W-C-Cr, C-Cr-W було проведено порівняння властивостей мікротвердості, зносостійкості з відповідними властивостями сталі 45 без обробки ЕІЛ (рис. 3.22).

З оброблених схем легування максимальну зносостійкість у порівнянні з необробленим зразком сталі 45 була отримана за схемою Cr-W-C, яка має найменше збільшення за мікротвердістю. При цьому найбільше відношення мікротвердості відповідає зразку W-C-Cr.

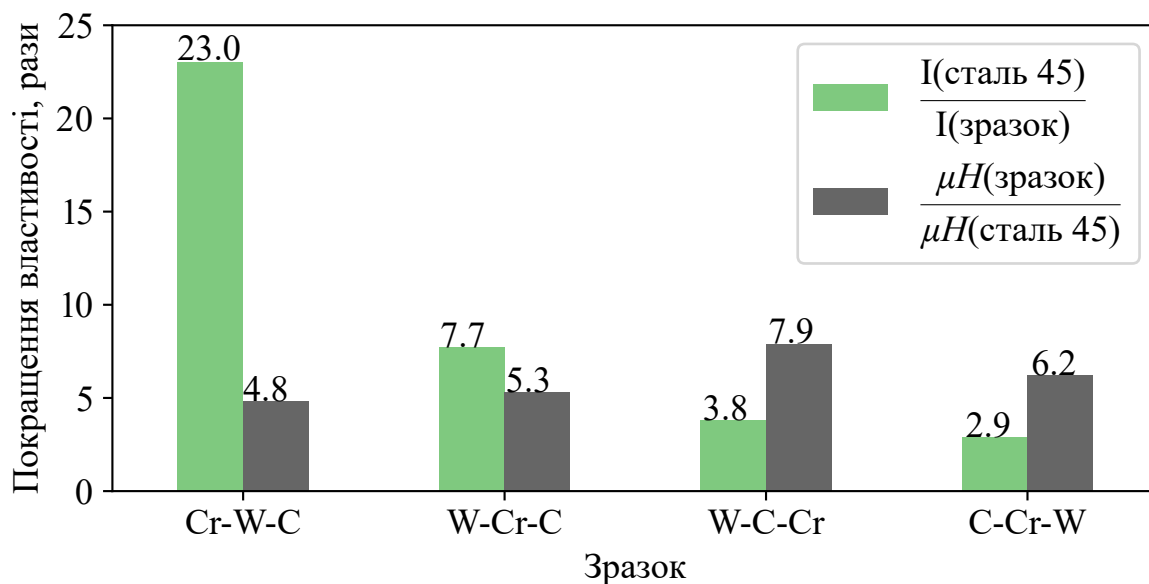


Рисунок 3.22 — Порівняння максимальної мікротвердості та інтенсивності зносостійкості з відповідними значеннями для сталі 45 без обробки

### 3.6 Висновки до розділу 3

Встановлено вплив послідовності стадій електроіскрового легування з використанням вольфрамового, графітового та хромового анодів на структуру, мікротвердість та зносостійкість покриттів на сталі 45.

Проведені експериментальні дослідження, які показують, що для ЕІЛ на сталі 45 за схемами W-C-Cr, C-Cr-W, W-Cr-C, Cr-W-C можливе утворення легованого шару товщиною від 15 мкм до 30 мкм.

Встановлено підвищення поверхневої мікротвердості сталі 45 у діапазоні від 11,5 ГПа до 18,9 ГПа після нанесення електроіскрових покриттів за всіма запропонованими схемами за рахунок наявності твердих розчинів матеріалів електродів та карбідів WC, W<sub>2</sub>C, Fe<sub>3</sub>C, CrC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

Виявлено, що зносостійкість покриттів зростає в ряду C-Cr-W → W-C-Cr → W-Cr-C → Cr-W-C від 3 разів до 23 разів у порівнянні з необробленою поверхнею сталі 45.

Розрахована ефективність формування шарів за результатами гравіметричного аналізу: для схеми нанесення W-C-Cr вона складає — 42,5; для C-Cr-W — 19,5; для W-Cr-C — 14,7; для Cr-W-C — 4,5.

## 4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Науково-технічна актуальність НДР

В галузі машинобудування та металообробки важливим питанням є доцільність того чи іншого технологічного процесу. Наприклад для дорогих та дефіцитних марок сталей, що застосовуються при виготовленні інструменту і деталей машин, використовують різні функціональні покриття, що можуть забезпечити довговічність та надійність деталей машин або інструменту. Властивості покриттів можна варіювати за допомогою підбору методу нанесення, режиму та легуючих елементів.

Розглянутий в роботі метод електроіскрового легування дозволяє виконувати такі операції створення покриття без особливої складності технології проведення [1]. Звісно процес має опцію ускладнення — проведення ЕІЛ в насичуючих середовищах. Але в роботі не розглядається дана можливість, так як метою є дослідження отриманої поверхні з варіюванням послідовності анодних матеріалів в стадіях легування.

З економічної точки зору перевагами ЕІЛ є те, що дана обробка є простою за виконанням та енергетично вигідна [23]. Важливою умовою лише є наявність однофазного струму.

### 4.2 Мета і завдання НДР

Метою даної роботи було формування функціональних покриттів на сталі 45 багатостадійним електроіскровим легуванням хромом, вольфрамом та графітом. Завданнями даної роботи були:

- опрацювання фахових публікацій з даного напрямку;
- розробка методики дослідження;
- виготовлення і обробка зразків;

- проведення ЕІЛ;
- виготовлення мікрошліфів;
- дослідження властивостей (мікротвердість, мікроструктура і фазовий склад) отриманого поверхневого шару;
- аналіз залежності властивостей поверхневого шару від кількості стадій обробки;
- формулювання висновків по роботі та надання відповідних рекомендацій.

### **4.3 Розрахунок планових витрат на проведення НДР**

Робота виконувалася на кафедрі Фізики металів у КПІ імені Ігоря Сікорського. Планова кошторисна вартість (собівартість) НДР розраховувалась у відповідності до таких калькуляційних статей витрат:

- заробітна плата науково-виробничого персоналу;
- єдиний соціальний внесок;
- вартість матеріалів, необхідних для виконання НДР;
- вартість спеціального обладнання для проведення експерименту;
- службові відрядження;
- інші прямі невраховані витрати;
- накладні витрати.

#### **4.3.1 Витрати на оплату праці**

У виконанні НДР брали участь чотири виконавці: провідний науковий співробітник, старший науковий співробітник та інженер дослідник. Для КПІ ім. Ігоря Сікорського тарифні ставки сумарної місячної заробітної плати складають:

- провідного наукового співробітника — 10 944 грн;
- старшого наукового співробітника — 9 600 грн;

— інженера-дослідника — 5 824 грн.

Денна заробітна плата кожного з виконавців визначається як місячна заробітна плата, поділена на середню кількість днів у місяці, що при п'ятиденному робочому тижні становить 21,2. Таким чином, величина денної заробітної плати виконавців складає:

— для провідного наукового співробітника — 516,23 грн;

— старшого наукового співробітника — 452,82 грн;

— інженера-дослідника — 274,72 грн.

У випадку відсутності відповідних розрахункових методик трудомісткості різних етапів виконання НДР встановлюється на базі експертних оцінок, які дають провідні фахівці. При цьому НДР розглядається як сукупність макроетапів, аналіз кожної окремої операції не проводиться. Результати експертної оцінки трудомісткості етапів НДР наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 — Трудомісткість макроетапів виконання НДР

Макроетапи НДР	Трудомісткість за виконавцями, люд.-дні		
	Провідний науковий співробітник	Старший науковий співробітник	Інженер- дослідник
1. Аналіз фахових публікацій за темою та обґрунтування мети та напрямів, дослідження	14	12	0
2. Розробка методики проведення досліджень за темою	3	2	1
3. Проведення експерименту 3.1. Виготовлення зразків 3.2. Проведення ЕІЛ 3.3. Дослідження властивостей	2	2	2
5. Обговорення результатів НДР	14	12	0
Всього	33	28	3

Величина фонду заробітної плати виконавців (ФЗП) обчислюється як сума добутків трудомісткості і денної заробітної плати кожного з них:

$$\text{ФЗП} = 30\,538,87 \text{ грн.}$$

### 4.3.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску

Згідно з діючим законодавством єдиний соціальний внесок становить 22 % від фонду заробітної платні:

$$B_C = 0,22 \cdot \Phi ЗП = 6\,718,55 \text{ грн.}$$

### 4.3.3 Визначення вартості матеріалів для виконання НДР

Для проведення досліджень використовувались наступні матеріали: зразки із сталі 45 та відповідні електроди. Дані про вартість перелічених матеріалів наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 — Вартість основних матеріалів

Найменування	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн.	Сума, грн.
Зразок сталь 45	шт.	4	6	24
Електрод W	шт.	1	12	12
Електрод С	шт.	1	2	2
Електрод Cr	шт.	1	8	8
Всього				46

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо у розмірі 10% від вартості матеріалів, тоді загальні витрати по цій статті складуть:

$$C_M = 46 \cdot 1,1 = 50,60 \text{ грн.}$$

### 4.3.4 Визначення вартості спеціального обладнання і приладів

При виконанні НДР усі роботи проводилися з використанням лише наявного обладнання в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського.

#### **4.3.5 Визначення вартості робіт і послуг сторонніх організацій**

У виконанні даної НДР сторонні організації не брали участі.

#### **4.3.6 Визначення витрат на службові відрядження**

Усі роботи, пов'язані з виконанням НДР за даною темою, проведені в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського. Окремі службові відрядження не планувались.

#### **4.3.7 Визначення інших прямих неврахованих витрат по темі**

Інші прямі невраховані витрати ( $C_{\text{інш}}$ ) плануються у розмірі 10% від врахованих:

$$C_{\text{інш}} = (30\,538,87 + 6\,718,55 + 50,60) \cdot 0,1 = 3\,730,80 \text{ грн.}$$

#### **4.3.8 Визначення накладних витрат**

До накладних витрат відносяться витрати на заробітну плату адміністра-тивно-управлінського, господарчого та допоміжного персоналу (разом з єдиним соціальним внеском), витрати на допоміжні виробництва, витрати на утримання та експлуатацію виробничих площ, наукових приладів та установок, витрати на охорону праці, техніку безпеки та екологію, фінансування підготовки кадрів, воєнізованої охорони і деякі інші.

Норматив відрахувань на накладні витрати для КПІ ім. Ігоря Сікорського встановлений в розмірі 20% планової суми всіх прямих витрат на виконання НДР. Розраховуємо величину накладних витрат таким чином:

$$N_B = 0,2 \cdot (30\,538,87 + 6\,718,55 + 50,60 + 3\,730,80) = 8\,207,76 \text{ грн.}$$

### 4.3.9 Визначення планової кошторисної вартості НДР

Планова кошторисна вартість НДР визначається як сума витрат за окремими статтями калькуляції. Результати визначення вартості наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 — Калькуляція планової кошторисної вартості НДР за темою

Найменування калькуляційних статей	Позначення	Сума	
		грн.	%
1. Фонд заробітної плати	ФЗП	30 538,87	62,01
2. Єдиний соціальний внесок	ВС	6 718,55	13,64
3. Матеріали, необхідні для виконання теми	С <sub>М</sub>	50,60	0,10
4. Спеціальне обладнання для наукових робіт	С <sub>об</sub>	—	—
5. Робота і послуги сторонніх організацій	С <sub>стор</sub>	—	—
6. Витрати на службові відрядження	С <sub>від</sub>	—	—
7. Інші прямі невраховані витрати	С <sub>інш</sub>	3 730,80	7,58
8. Накладні витрати	НВ	8 207,76	16,67
Всього		49 246,59	100,00

Відповідно до табл. 4.3 загальна планова кошторисна вартість НДР складає  $V_{\text{НДР}} = 49\,246,59$  грн.

### 4.4 Науково-технічна ефективність НДР

Дана робота має пошуковий та теоретичний характер. Відповідно до цього прямий розрахунок очікуваного річного економічного ефекту складний, оскільки відсутні повні дані відносно сфери використання результатів роботи, а також вихідні дані для розрахунку єдиновременних та поточних витрат. У такому випадку слід використовувати бальну систему оцінки економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки ( $K_1$ );
- можливість використання результатів ( $K_2$ );
- теоретичне значення та рівень новизни дослідження ( $K_3$ );
- складність розробки ( $K_4$ ).

Коефіцієнт  $K_1$  може приймати наступні значення:



- ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів — 1 бал;
- робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво — 3 бали;
- робота являє собою частину відомчої програми — 5 балів;
- робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів — 7 балів;
- робота є частиною міжнародної комплексної програми — 8 балів.

Коефіцієнт  $K_2$  може приймати такі значення:

- результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі — 1 бал;
- результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією — 3 бали;
- результати розробки можуть бути використані багатьма організаціями — 5 балів.
- результатами розробки можуть користуватися споживачі в межах однієї галузі — 8 балів;
- результатами розробки можуть користуватися споживачі в різних галузях — 10 балів.

Коефіцієнт  $K_3$  може приймати такі значення:

- робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі — 2 бали;
- під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів — 3 бали;
- внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів — 5 балів;
- внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики або що-небудь подібне — 6 балів;

— отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше — 8 балів.

Коефіцієнт  $K_4$  може приймати такі значення:

- роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 грн — 1 бал;
- роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 грн до 50 000 грн — 3 бали;
- роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 грн до 100 000 грн — 5 балів;
- робота виконується багатьма підрозділами, витрати від 100 000 грн до 200 000 грн — 7 балів;
- робота виконується багатьма організаціями, витрати більше 200 000 грн — 9 балів.

Бальна оцінка економічної ефективності даної науково-дослідної роботи наведена у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 — Бальна оцінка ефективності НДР

Показники оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристика даної розробки	Кількість балів
1. Важливість розробки	K1	Робота ініціативна, не є завданням будь-яких директивних органів або частиною комплексної програми	1
2. Можливість використання результатів розробки	K2	Результати розробки можуть бути використані багатьма організаціями	8
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K3	Отримання нової інформації, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів та була невідома раніше	5
4. Складність проведення дослідження	K4	Робота виконується одним підрозділом, витрати від 10 000 грн до 50 000 грн	3

Загальна бальна оцінка ефективності згідно з табл. 4.4 становить:

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 1 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 3 = 120.$$

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

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot Б - E_{\text{н}} \cdot V_{\text{НДР}}, \quad (4.1)$$

де 500 — умовна вартість одного балу, грн.;

$E_{\text{н}}$  — нормативний коефіцієнт економічної ефективності ( $E_{\text{н}} = 0,15 \cdot 0,5$ , для нашого розрахунку обираємо  $E_{\text{н}} = 0,2$ );

$V_{\text{НДР}}$  — витрати на виконання НДР (планова річна кошторисна вартість виконання НДР, для нашого розрахунку  $V_{\text{НДР}} = 49\,246,59$  грн.).

Таким чином, умовний економічний ефект відповідно (4.1) становить:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 120 - 0,2 \cdot 49\,246,59 = 50\,150,68 \text{ грн.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$K_{\text{НДР}} = \frac{E_{\text{НДР}}}{V_{\text{НДР}}} = 1,02$$

Отримана розрахункова величина коефіцієнта економічної ефективності НДР більше одиниці, що свідчить про доцільність виконання даної роботи.

#### 4.5 Висновки до розділу 4

Отже була обґрунтована науково-технічна актуальність виконання досліджень по даній темі. Розрахована планова річна собівартість проведення науково-дослідної роботи, яка становить 49 246,59 грн. При цьому коефіцієнт умовної економічної ефективності проведення роботи становить 1,02. З цього слідує, що проведення НДР є економічно доцільним.

## **5 ОХОРОНА ПРАЦІ**

### **5.1 Вступ**

Охорона праці — це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини під час її трудової діяльності [24].

Законодавство в сфері працевлаштування регулює трудові відносини працівників усіх підприємств, установ, організацій незалежно від форм власності, виду діяльності та галузі роботи, а також осіб, які працюють згідно з трудовим договором з фізичною особою. Нагляд за дотриманням норм охорони праці є одним із обов'язків прокуратури (загальний нагляд) та професійних спілок (спеціальний нагляд). Також даний контроль можуть здійснювати державні та відомчі спеціалізовані інспекції. [24]

Метою розділу є аналіз шкідливих та небезпечних факторів та умов, за яких можливе ураження або травмування організму в процесі дослідження функціональних покриттів на поверхні сталі 45, які були нанесені багатостадійним електроіскровим легуванням, а також розробка заходів спрямованих на усунення цих факторів та вивчення безпеки у надзвичайних ситуаціях.

### **5.2 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві**

Законодавство України про охорону праці — це система взаємозв'язаних законів та інших нормативно-правових актів, що регулюють відносини у сфері реалізації державної політики щодо соціального захисту її громадян в процесі трудової діяльності. Воно складається з Закону України «Про охорону праці», Кодексу законів про працю України, Закону України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та

професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності» та прийнятих відповідно до них нормативно-правових актів. [24]

Відповідно до статті 13 [25] Закону України «Про охорону праці» роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці [24]. З цією метою роботодавець забезпечує функціонування системи управління охороною праці і несе безпосередню відповідальність за порушення зазначених вимог.

Згідно зі статтею 14 [25] Закону України «Про охорону праці» працівник зобов'язаний: дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт чи під час перебування на території підприємства; знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, правила поведінки з устаткуванням та засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту; проходити у встановленому законодавством порядку попередні та періодичні медичні огляди. Працівник несе безпосередню відповідальність за порушення зазначених вимог.

Відповідно до статті 15 [25] Закону України «Про охорону праці» на підприємстві з кількістю працюючих 50 і більше осіб роботодавець створює службу охорони праці відповідно до типового положення, що затверджується центральним органом виконавчої влади з питань нагляду за охороною праці.

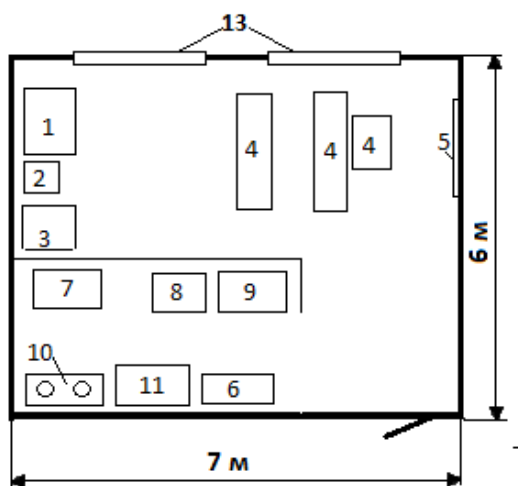
Припис спеціаліста з охорони праці може скасувати лише роботодавець. Ліквідація служби охорони праці допускається тільки у разі ліквідації підприємства чи припинення використання найманої праці фізичною особою [24].

Служба охорони праці підпорядковується ректору КПІ ім. Ігоря Сікорського М.З. Згуровському. Очільник відділу охорони праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського — Е.Г. Луцик. Відповідальний за охорону праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського — М.М. Полторацький, на інженерно-фізичному факультеті — Лобода П.І., на

кафедрі фізики металів — С.Б. Васільєв. В лабораторії 036-09, де виконувалась робота відповідальним за охорону праці є А.І Мазур.

### 5.3 Аналіз параметрів приміщення

Дослідження проводилось на кафедрі фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського в лабораторії електроіскрового легування 036-09. Схематичне зображення лабораторії, а також розташування всіх елементів представлено на рис. 5.1.



1 — твердомір ПМТ-3; 2 — тумба; 3 — комп'ютер; 4 — робочі столи; 5 — дошка; 6 — шафа; 7 — стіл для шліфування; 8 — прилад для вимірювання зносостійкості; 9 — прилад «Элитрон-26А»; 10 — полірувальні круги; 11 — стіл

Рисунок 5.1 — Схематичне зображення розташування робочих елементів в лабораторії 036-09

Було проведено вимірювання параметрів приміщення лабораторії та розрахунки площі і об'єму, що припадають на одну особу. Розрахунки наведені в табл. 5.1.

Згідно зі СНиП 2.09.04-87 [26] норма площі на одну особу становить  $4,5 \text{ м}^2$ , а норма об'єму приміщення на одну особу —  $15 \text{ м}^3$ . Отже, з цього слідує, що лабораторія 036-09 відповідає нормам.

Таблиця 5.1 — Параметри науково-дослідної лабораторії

Характеристика	Виміряні дані
Довжина, м	7
Ширина, м	6
Висота, м	3,8
Площа, м <sup>2</sup>	42
Об'єм м <sup>3</sup>	159,6
Площа на одну особу, м <sup>2</sup>	6
Об'єм на одну особу м <sup>3</sup>	42

Для забезпечення оптимального мікроклімату «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 [27] встановлюють оптимальні і допустимі значення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні в залежності від пори року та категорії важкості робіт [28].

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 категорія важкості робіт в даному дослідженні — І б. Відповідно до даної категорії енерговитрати організму можуть бути до 150 Ккал/год.

Результати дослідження та нормовані величини параметрів мікроклімату в робочій зоні лабораторії 036-09 та їх порівняння з допустимими та оптимальними нормами наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 — Оптимальні та допустимі мікрокліматичні умови

Період року	Категорія робіт	$t, +^{\circ}\text{C}$	Відносна вологість, %	Швидкість руху пов., $\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Холодний	І б	Оптимальні: 21-23 Допустимі: 17-25	Оптимальні: 40-60 Допустимі: до 75	Оптимальні: 0,1 Допустимі: до 0,2
Теплий	І б	Оптимальні: 22-24 Допустимі: 19-30	Оптимальні: 40-60 Допустимі: 60	Оптимальні: 0,2 Допустимі: 0,1-0,3
Отримані дані	І б	Холодний: 10 Теплий: 15	Холодний: 70 Теплий: 60	Холодний: 0,1 Теплий: 0,2

Оптимальним нормам в холодну пору не відповідають температурний режим та відносна вологість, в теплу пору — лише температурний режим. Також температура в обидві пори не відповідають допустимим нормам.

Таким чином можна зробити висновок, що мікроклімат в лабораторії не повністю відповідає вимогам санітарних норм і потрібно провести заходи по поліпшенню температурного режиму. Наприклад: утеплення вікон, використання електрифікованих обігрівальних систем.

#### **5.4 Аналіз освітленості приміщення**

Розрізняють освітлення трьох видів: природне, штучне та суміщене. Природне у свою чергу поділяється на верхнє, бічне та комбіноване. Штучне буває місцевим і загальним. [24]

До проблем можна віднести недостатню або надмірну освітленість та нерівномірність освітлення. Це може призводити до зниження продуктивності праці, що зазвичай призводить до зростання потенційної небезпеки помилкових дій і нещасних випадків.

У лабораторії здійснюється природне бокове освітлення (вікна з північного боку) та штучне. Відстань від вікна до місця основної роботи складає 1 м. Для місцевого освітлення використовуються лампи розжарювання, для загального — люмінесцентні ЛБ-40 (24 одиниці у лабораторії) [26].

Для забезпечення нормованих значень освітленості в приміщенні потрібно проводити очищення скла, віконних рам і світильників не рідше двох разів у рік, а також проводити своєчасну заміну перегорілих ламп. дмірна яскравість джерел світла може спричинити головний біль, різь в очах, розлад гостроти зору; світлові відблиски — тимчасове засліплення. Отже освітлення, що забезпечує нормальні зорові роботи, є важливим чинником в організації і проведенні НДР.

У лабораторії здійснюється природне бокове освітлення (вікна з північного боку) та штучне. Відстань від вікна до місця основної роботи складає 1 м. Для



місцевого освітлення використовуються лампи розжарювання, для загального – люмінесцентні ЛБ-40 (24 одиниці у лабораторії) [26].

Для забезпечення нормованих значень освітленості в приміщенні потрібно проводити очищення скла, віконних рам і світильників не рідше двох разів у рік, а також проводити своєчасну заміну перегорілих ламп.

### **5.5 Аналіз наявності шуму в приміщенні**

Процес легування зразків проводився на установці «Елітрон-26А», що видає певний шум під час роботи, також шум надходив у процесі дослідження зразків на зносостійкість.

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються стандартом ДСТУ ГОСТ 12.1.003-86 [29]. У ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних видів ДСН 3.3.6.037-99 [30].

Шум може викликати різні загально біологічні подразнення, патологічні зміни, функціональні розлади та механічні ушкодження. Під час роботи в шумних умовах продуктивність ручної роботи може знизитись на 40%, а при розрахунках на 50% [30]. При тривалій роботі в шумних умовах перш за все уражається нервова та серцево-судинна системи та органи дихання.

У даному випадку наявний імпульсний шум. Так як робота на установках, які викликають шум, проводилась рідко, тому від шуму використовували засоби індивідуального захисту — біруші.

### **5.6 Виробниче випромінювання**

Дані про виробничі випромінювання нормуються документом: Санітарні правила і норми «Гігієнічні вимоги до відео-дисплейних терміналів, ПЕОМ і організації роботи» ДСанПіН 3.3.2-007-98 [31].

При роботі з ЕОМ, яка входить в устаткування, виникає небезпека впливу на організм робітника: невикористаного рентгенівського випромінювання, ультрафіолетового випромінювання, електростатичного поля.

Для попередження соматичних та генетичних наслідків у відповідності з НПАОП 0.00-1.28-10 [32] для побутової радіоелектронної апаратури (РЕА) встановлені норми потужності експозиційної дози рентгенівського випромінювання, яке не повинно перевищувати  $2,7810 \times 10^{-12}$  мкР/с (100 мкР/год) в будь-якій точці на відстані 5 см від зовнішньої поверхні, яка обернена до оператора. Потужність експозиційної дози НРВ в будь-якій точці простору на відстані 0,05 м від корпусу установки не повинна перевищувати 0,07 мкР/с при робочому тижні в 41 годину. Також робота частково проводиться за ЕОМ, тому запропоновано щоб час роботи за монітором не перевищував 4 години за зміну, з технологічними перервами.

## 5.7 Електронебезпека

Відповідно до діючих правил побудови електроустановок ПУЕ:2009 [33] приміщення лабораторій з точки зору безпеки враження людини електричним струмом відноситься до приміщень без підвищеної безпеки електротравм. Це сухі приміщення з температурою повітря від  $+18^{\circ}\text{C}$  до  $+25^{\circ}\text{C}$  та з підлогою, що не проводить струм. Електроустановки, що використовуються при виконанні даної НДР, живляться напругою 220 В змінного струму частотою 50 Гц. Причинами враження електричним струмом під час виконання трудового процесу з електрообладнанням є:

- випадковий дотик до струмоведучих частин, які перебувають під напругою, через відсутність засобів недоступності або безвідповідальне відношення до безпеки персоналу;
- дотик до не струмо-ведучих частин електроприладів, які випадково потрапили під напругу через ушкодження ізоляції чи іншого

ушкодження;

- потрапляння під напругу під час проведення ремонтних робіт на відключених електроприладах через помилкове їх включення.

Вплив електричного струму на організм може мати дуже небезпечні для здоров'я людини наслідки і навіть привести до смерті. Імовірність смертельного результату при враженні електричним струмом вище, ніж при інших причинах травматизму. На дію цю впливає ряд факторів:

- величина струму (1 мА);
- рід струму (струм змінний);
- частота струму ( 50 Гц);
- шлях струму в організмі (голова-нога, рука-рука, рука-голова);
- тривалість дії струму;
- стан організму;
- виробниче середовище, відноситься до 1 класу.

При розробці захисних заходів, вважають небезпечним струм у 25 мА, при якому важко самотійно відірватись від провідника, а струм величиною 100 мА може призвести до смертельного результату. З напругою 42 В найбільш небезпечний змінний струм, а більше 42 В вплив однаковий як постійного так і змінного струму. Найбільш небезпечна частота в межах від 50 Гц до 60 Гц. [24]

У лабораторії, де проводилися дослідження, є наступні електроприлади: ПЕОМ, «Элитрон-26А», ПМТ-3, полірувальні круги, прилад для вимірювання зносостійкості. У лабораторії правильно виконане захисне заземлення корпусів, електроустаткування і приладів. Розташування робочих місць таке, що виключається можливість дотику до корпусів, електроустаткування і приладів.

## 5.8 Пожежна безпека

Пожежна безпека об'єкта — стан об'єкта, за яким з регламентованою імовірністю виключається виникнення і розвитку пожежі та впливу на людей її

небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей [24]. Основними напрямками забезпечення пожежної безпеки є попередження виникнення пожежі та мінімізація її наслідків.

Залежно від агрегатного стану й особливостей горіння різних горючих речовин і матеріалів, пожежі за ДСТУ 7097:2009 [34] поділяються на відповідні класи та підкласи:

- клас А — горіння твердих речовин, що супроводжується (підклас А1) або не супроводжується (підклас А2) тлінням;
- клас В — горіння рідких речовин, що не розчиняються (підклас В2) у воді;
- клас С — горіння газів;
- клас Д — горіння металів легких, за винятком лужних (підклас Д1), лужних (підклас Д2), а також металовмісних сполук (підклас Д3);
- клас Е — горіння електроустановок під напругою [33].

Відповідно до ДСТУ 7097:2009 лабораторія за пожежною безпекою належить до категорії В, тому що в ній знаходяться тверді та важко горючі матеріали та вона одночасно не належить до категорій А, Б.

У випадку пожежі у лабораторії може горіти:

- електроустановки та їхня проводка;
- паркет та штори;
- шафи та паперові документи, що знаходяться в них.

Виникнення пожеж у лабораторії можливо за наступними причинами:

- порушення технологічного режиму;
- несправність електроустаткування;
- необережне звертання з вогнем;
- ремонт устаткування на ходу;
- неправильне користування устаткуванням.

План евакуації в разі виникнення пожежі наведено на рисунку 5.2. Для запобігання пожеж необхідно вимкнути перераховані недоліки і строго дотримуватись правил протипожежної безпеки [24]. У випадку пожежі на

електроустановці, що знаходиться під напругою, полум'я не гаситься водою, а використовується вуглекислотний вогнегасник.

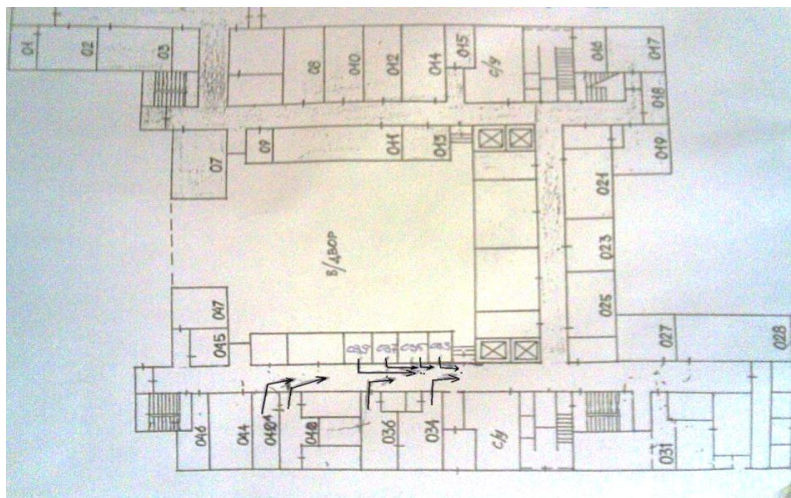


Рисунок 5.2 — План евакуації

На випадок пожежі в лабораторії є водопровід, вогнегасник вуглекисотно-брометиловий ОУБ-3 (ГОСТ 111564-65), а на сходових клітках і в коридорах шухляди з піском, вогнегасники ОХП-10, ОП-1Б та пожежні крани. Приміщення обладнане пожежною сигналізацією автоматичної дії комбінованого типу (оповісник КИ-1).

Основними заходами по пожежній безпеці є регулярна перевірка працездатності засобів гасіння пожежі і систем пожежної сигналізації; перевірка справності електричної проводки; щорічне випробування опору ізоляції підвищеною напругою близько 500 В; обережне відношення з легкоплавкими речовинами.

## 5.9 Висновки до розділу 5

Були розглянуті шкідливі фактори, які присутні на місцях проведення дослідної роботи. Зважаючи на основні ДСТУ, ДСН, ДБН та СНИП, що регулюють необхідні для безпечної роботи параметри, було встановлено, що робоча лабораторія в якій проводилася НДР відповідає всім зазначеним нормам, окрім температурного режиму. Наведені приклади покращення.

## ВИСНОВКИ

Встановлена можливість створення функціональних покриттів товщиною від 15 мкм до 30 мкм на поверхні сталі 45 в процесі пошарового електроіскрового легування W-, Cr-, C-анодами.

Встановлено підвищення поверхневої мікротвердості сталі 45 у діапазоні від 11,5 ГПа до 18,9 ГПа після нанесення електроіскрових покриттів за всіма запропонованими схемами за рахунок наявності твердих розчинів матеріалів електродів та карбідів WC, W<sub>2</sub>C, Fe<sub>3</sub>C, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, CrC.

Виявлено, що зносостійкість покриттів зростає в ряду C-Cr-W → W-C-Cr → W-Cr-C → Cr-W-C у 2,9 разів та у 23 рази у порівнянні з необробленою поверхнею сталі 45. Найвищу зносостійкість має покриття Cr-W-C за рахунок наявності вільного графіту.

Для науково-дослідної роботи був розрахований коефіцієнт умовної економічної ефективності, який становить 1,02. З цього слідує, що проведення НДР є економічно доцільним.

Були розглянуті шкідливі фактори для здоров'я людини на місцях проведення науково-дослідної роботи. Таким чином було встановлено, що робоча лабораторія в якій проводилася НДР відповідає всім зазначеним нормам, окрім температурного режиму.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский, В.М. Ревуцкий ; Под ред. Ю.Н. Петров. — Кишнев : Штиинца, 1985. — С. 196.
2. Иванов В.И. Электроискровое нанесение покрытий / В.И. Иванов, А.Ю. Костюков // Ритм машиностроения. — 2016. — № 10. — С. 36–41. — Режим доступа: [ritm-magazine.ru/sites/default/files/rhythm\\_of\\_machinery\\_10\\_2016\\_0.pdf](http://ritm-magazine.ru/sites/default/files/rhythm_of_machinery_10_2016_0.pdf). — Дата доступа: 28.05.2016.
3. Ярков Д.В. Формирование функциональных покрытий методом ЭИЛ с применением электродных материалов из минерального сырья дальневосточного региона : дис. ... канд. наук / Д.В. Ярков ; Хабаровский научный центр, Институт материаловедения. — [Б. м. : б. и.], 2004. — Режим доступа: [elspark.narod.ru/eil.pdf](http://elspark.narod.ru/eil.pdf). — Дата доступа: 28.05.2016.
4. Мулин Ю.И. Электроискровое легирование рабочих поверхностей инструментов и деталей машин электродными материалами, полученными из минерального сырья / Ю.И. Мулин, А.Д. Верхотуров. — Владивосток : Дальнаука, 1999. — С. 110.
5. Изучение динамики процесса переноса материалов электродов в сильноточном импульсном разряде / М.К. Мицкевич, А.И. Бушик, И.А. Бакуто, В.А. Шилов // Электронная обработка материалов. — 1977. — № 4.
6. Лазаренко Н.И. О механизме образования покрытие при электроискровом легировании металлических поверхностей / Н.И. Лазаренко // Электронная обработка материалов. — 1965. — № 1.
7. Верхотуров А.Д. Обобщенная модель процесса электроискрового легирования / А.Д. Верхотуров // Электрофизические и электрохимические методы обработки. — 1983. — № 1. — С. 3–6.
8. Верхотуров А.Д. Электродные материалы для электроискрового легирования /

- А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняева, Л.Ф. Прядко ; Под ред. Ф.Ф. Егоров. — Москва : Изд-во Наука, 1988. — С. 224.
9. Tungsten, Tungsten Alloys, and Tungsten Compounds / Erik Lassner, Wolf-Dieter Schubert, Eberhard Lüderitz, Hans Uwe Wolf. — [S. l.] : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2000. — ISBN: 9783527306732.
  10. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник в 3 томах. / Под ред. Н.П. Лякишев. — Москва : Машиностроение, 1997. — Т. 1. — ISBN: 5-217-02688-X.
  11. Daintith John. Chemistry / John Daintith. — [S. l.] : Infobase Publishing, 2014.
  12. Повышение эксплуатационных свойств железных гальванических покрытий путем легирования вольфрамом и молибденом / В.И. Серебровский, А.Ю. Молодкин, В.В. Бедин, Л.Н. Серебровская // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. — 2012. — № 9. — С. 75–76.
  13. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник в 3 томах. / Под ред. Н.П. Лякишев. — Москва : Машиностроение, 1997. — Т. 2. — ISBN: 5-217-01569-1.
  14. Сидоренко С.І. Матеріалознавство і розробка електронної техніки / С.І. Сидоренко, Є.В. Іващенко, Г.Г. Лобачова // Науковий вісник КУЕІТУ. — 2013. — № 3-4(41-42). — С. 3–7.
  15. Каденаций Л.А. Упрочнение деталей оборудования для легкой промышленности электроискровым Легированием / Л.А. Каденаций, Н.Б. Лисовская, С.Ф. Селиверстов // Технология и организация производства. — 1989. — № 2.
  16. Особенности формирования и трибологического поведения многослойных износостойких  $ZrB_2$ -содержащих электроискровых и лазерно-электроискровых покрытий на титановом сплаве / И.А. Подчерняева, В.М. Панашенко, А.И. Духота [и др.] // Проблемы трибології. — 2012.
  17. Верхотурова И.В. Исследование свойств двухслойных электроискровых покрытий на основе сплавов и графита / И.В. Верхотурова,



- Д.А. Салыкина, Н.А. Волкова. — 2013. — Режим доступу: [old.amursu.ru/attachments/article/9526/N59\\_9.pdf](http://old.amursu.ru/attachments/article/9526/N59_9.pdf). — Дата доступу: 22.04.2017.
18. Лобачова Г.Г. Поверхневе зміцнення сплавів заліза електроіскровим легуванням цирконієм, титаном, хромом та хіміко-термічною обробкою : дис. канд. техн. наук. за спец. 05.16.01 — Металознавство та термічна обробка металів / Г.Г. Лобачова ; НТУУ «КПІ». — Київ : 2012. — С. 200.
  19. Центральный металлический портал РФ Сталь марки 45. — 2010. — Режим доступу: [metallcheckiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/45](http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/45). — Дата доступу: 28.05.2016.
  20. Горелик С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев ; Под ред. В.П. Моловкова. Учеб. пособие для вузов. — 3-е изд. доп. и перераб. изд. — Москва : МИСИС, 1994. — С. 328.
  21. Maillet David. Mind-wandering and task stimuli: Stimulus-dependent thoughts influence performance on memory tasks and are more often past-versus future-oriented / David Maillet, Paul Seli, Daniel L. Schacter // *Consciousness and Cognition*. — 2017. — jul. — Vol. 52. — P. 55–67.
  22. Resistivity and Temperature Coefficient at 20°C. — Режим доступу: [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/rstiv.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/rstiv.html). — Дата доступу: 14.06.2017.
  23. Electro-spark deposition of Fe-based amorphous alloy coatings / Dongyan Liu, Wei Gao, Zhengwei Li [et al.] // *Materials Letters*. — 2007. — jan. — Vol. 61, no. 1. — P. 165–167.
  24. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Запарний [та ін.] ; Під ред. К.Н. Ткачука, М.О. Халімовського. — Київ : Основа, 2006. — С. 448. — ISBN: 966-699-156-X.
  25. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. — Парлам. вид-во. — 1992.
  26. СНиП 2.09.04-87. Строительные нормы и правила. Административные и

- бытовые здания. — 1987.
27. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. — Міністерство охорони здоров'я (МОЗ). — 1999.
28. Желібо Є.П. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти України I-IV рівнів акредитації / Є.П. Желібо, Н.М. Заверуха, В.В. Зацарний. — Київ : Каравелла, 2001. — Р. 320.
29. ДСТУ ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартів безпеки праці. Робоче місце при виконанні робіт сидячи. Загальні ергономічні вимоги. — Київ. — 1978.
30. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. — 1999.
31. Гігієнічні вимоги до відео-дисплейних терміналів, ПЕОМ і організації роботи: ДСанПіН 3.3.2-007-98. — Міністерство охорони здоров'я (МОЗ). — 1998.
32. НПАОП 0.00-1.28-10. Правил охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин. — Державний комітет України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. — 2010.
33. ПУЕ:2009. Правила улаштування електроустановок. — Форт. — 2009.
34. ДСТУ 7097:2009. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Джерела техногенних надзвичайних ситуацій. Класифікація й номенклатура параметрів уражальних чинників. — Всеукраїнський науково-дослідний інститут цивільного захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру (ВНДІ ЦЗ). — 2009.

ДОДАТОК А  
ДІАГРАМИ СТАНУ

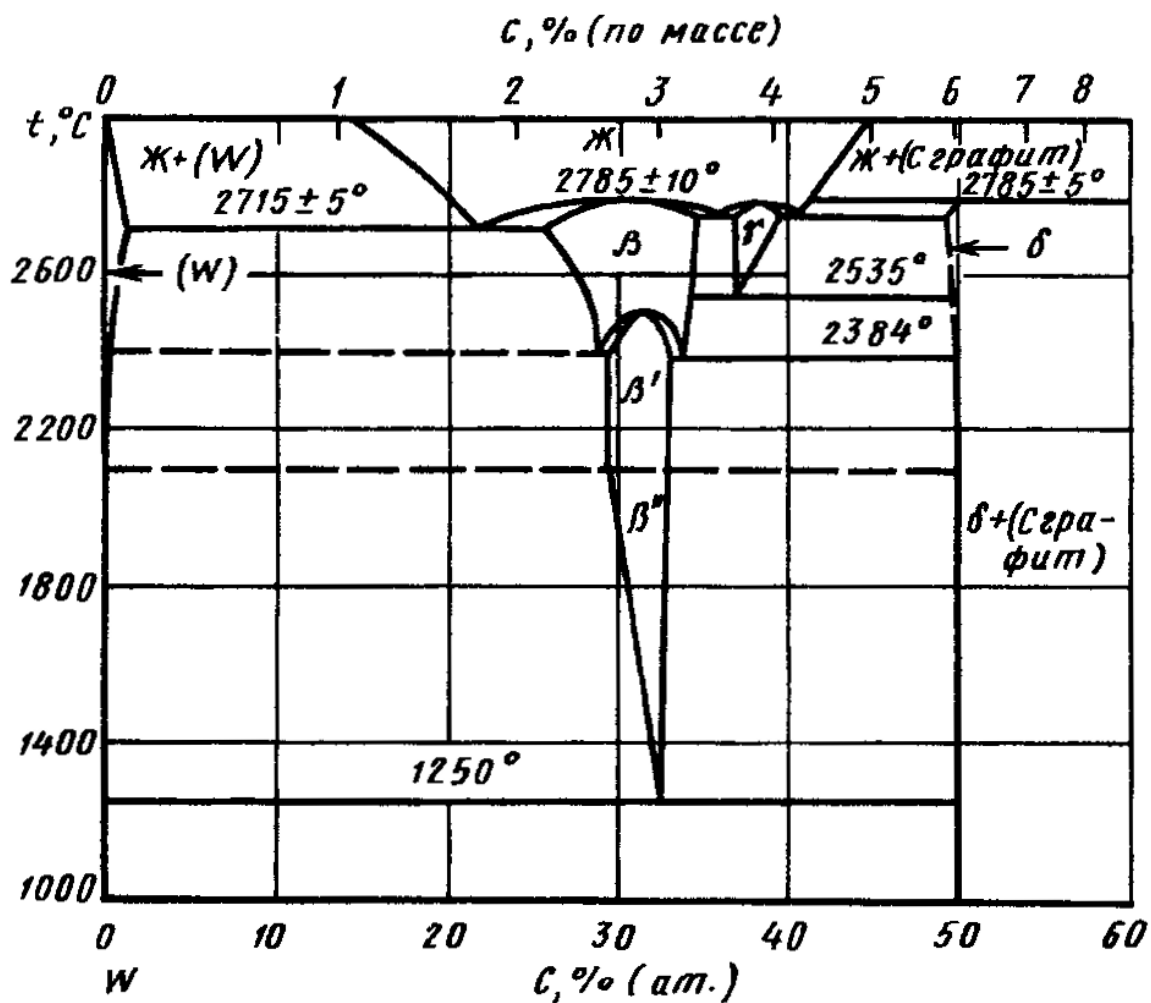


Рисунок А.1 — Діаграма стану системи С-В [10]

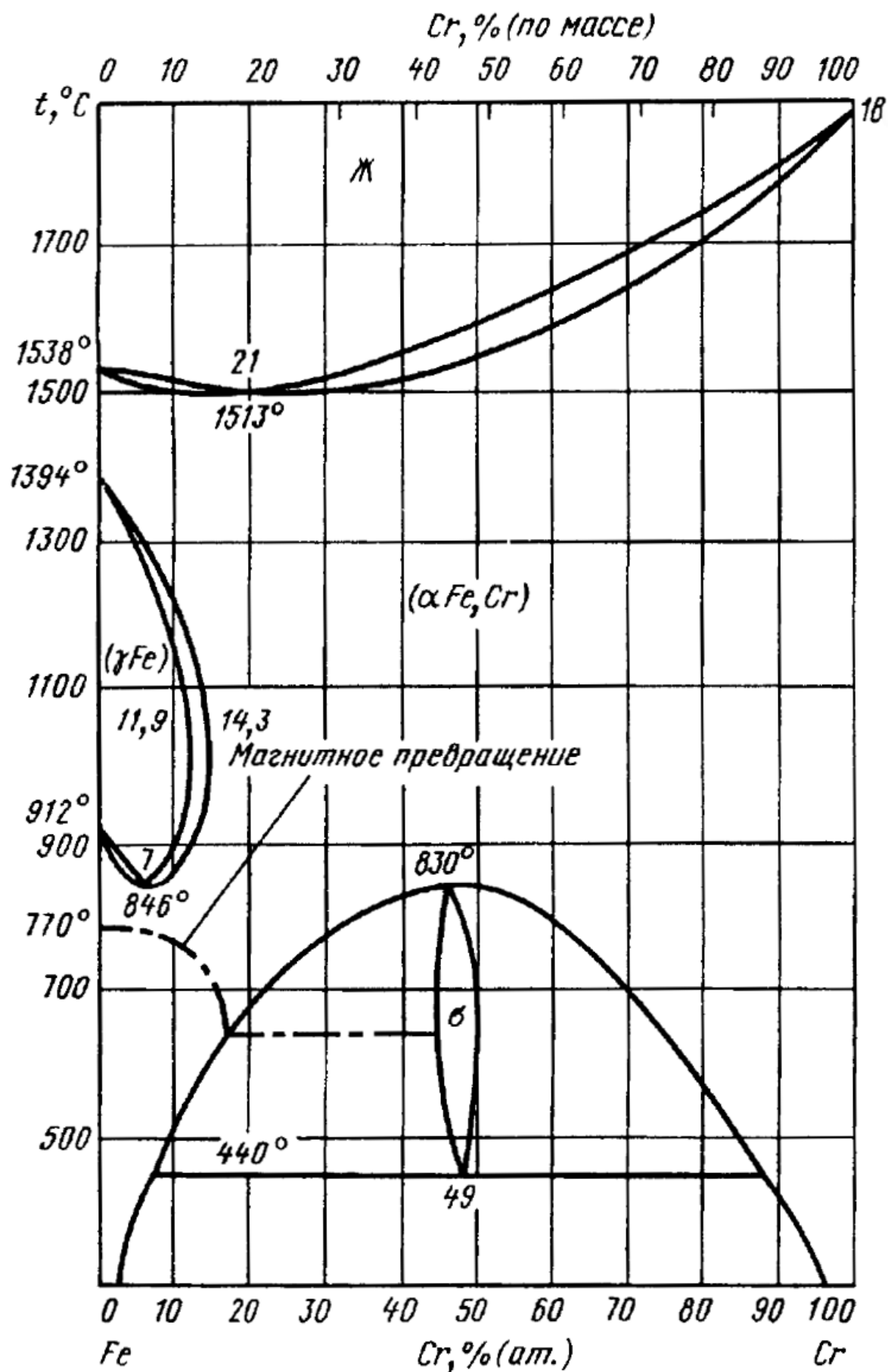


Рисунок А.2 — Диаграмма стану системи Cr-Fe [13]

## ДОДАТОК Б

### ЛІСТИНГИ ВИКОНУЮЧИХ СКРИПТІВ

Лістинг Б.1 — Обробка фотографій мікроструктури (./figures/ms.py)

```
# -*- coding: utf-8 -*-

from skimage import io
from skimage import exposure
from skimage import transform
from skimage.color import rgb2gray
import os

samples = {}
fileformat = '.jpg'
keyword = "microstr"

with open("sample_codes.txt") as f:
    for line in f:
        (key, val) = line.split(',')
        samples[int(key)] = val[:-1]

for file in os.listdir(os.getcwd()):
    if file.startswith(keyword):
        image = io.imread(file)

        image = image[0:1000, 0:2048]
        image = transform.rotate(image, 180)
        gray = rgb2gray(image)

        img_adapteq = exposure.equalize_adapthist(image, clip_limit=0.03)
        img_adapteq_gray = exposure.equalize_adapthist(gray, clip_limit=0.03)

        code = int(file[9])
        newfile = keyword + '_' + samples[code] + fileformat

        io.imsave('pre_adapt_'+newfile, img_adapteq)
        io.imsave('pre_adapt_gray_'+newfile, img_adapteq_gray)
```

Лістинг Б.2 — Гравіметричний аналіз (./calc/grav.py)

```
# -*- coding: utf-8 -*-

import os as os
import pandas as pd
import my_functions_for_diplom as my
```

```

def func(x):

    if x.first_valid_index() is None:
        return None
    else:
        return x.first_valid_index()

files = list()
matsum = 0
samples = my.decode()

keyword = "mass"

for file in os.listdir('data'):
    if file.startswith(keyword):
        files.append(file)

files.sort()
result = pd.DataFrame(index = ['Yx', 'Ycr'])

for file in files:

    df_d = pd.DataFrame()
    df_G = pd.DataFrame()
    df_K = pd.DataFrame()
    df_K1 = pd.DataFrame()

    df = pd.read_csv(my.dir_data+file, sep='\t', header=0, encoding="utf-8")
    del df['m']

    for name in list(df):
        if name == 'k':
            df_d[name] = df[name].diff()
            df_G[name] = df_d[name]/(1.5*60)
        else:
            df_d[name] = df[name].dropna().diff()
            df_G[name] = df_d[name].dropna()/(1.5*60)

    df_sum = df_d.cumsum()
    df_G = df_G.cumsum()

    first_non_nan = df_sum.apply(func) # find index of first num (
        nonNaN)

    for name in list(df_sum):
        i = first_non_nan[name]-1
        df_sum[name][i] = 0

    df_G = df_G[df_G.k != 0].dropna(subset=['k'])

num = 1

```

```

for s in file:
    try:
        num = int(s)
    except ValueError:
        pass

# CALC EFF
for name in list(df_G):
    if name != 'k':
        df_K[name] = - df_G[name] / df_G['k']
        df_K1 = pd.concat([df_K1, df_K[name].dropna()])

df_K1 = df_K1.sort_index()
df_K1 = df_K1[df_K1 > 0]

starttime = int(df_K1.apply(func))
xtime = df_sum['k'].iloc[starttime:].idxmax() #
crttime = df_sum['k'].iloc[starttime:]
crttime = crttime[crttime < 0].idxmax()

Kx = df_K1.iloc[:xtime].mean()[0]
Kcr = df_K1.iloc[:crttime].mean()[0]

if starttime == 1:
    Yx = Kx * xtime * df_sum['k'][xtime]
    Ycr = Kcr * crttime * df_sum['k'][crttime-1]
else:
    Yx = Kx * (xtime+1-starttime) * df_d['k'].iloc[starttime:(
        xtime+1)].sum()
    Ycr = Kcr * (crttime-starttime) * df_d['k'][starttime:(crttime -
        1)].sum()

colname = samples[num]
df_sum.to_csv(my.dir_output+"gravi_cumsum_"+colname+".csv", index=
    False, sep='\t', encoding='utf-8')
result[colname] = [Yx*1000, Ycr*1000]
result.to_csv(my.dir_output+"gravi_eff.csv", index=True, sep='\t',
    encoding='utf-8')
print(result)

```

### Лістинг Б.3 — МікродюрOMETричний аналіз

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import pandas as pd
import my_functions_for_diplom as my

samples = my.decode()

df = pd.read_csv(my.dir_data+'hardness.csv', sep='\t', header=0,
    encoding="utf-8")

```

```

df = my.rename_col(df, samples)
df = df.fillna(2.4) # average microhardness of steel_45

# taking max
df_max = pd.DataFrame(df.ix[:, df.columns != 'depth'].max(), columns=[
    'max_hard'])
df_max = df_max.round(1)

df_max.to_csv(my.dir_output+"hard_comparison.csv", index=True,
    index_label='sample', sep='\t', encoding='utf-8')
df.to_csv(my.dir_output+"hard.csv", index=False, sep='\t', encoding='
    utf-8')

```