

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ____ ” _____ 20 ____ р.
Зав. кафедри д.т.н., професор
(науковий ступінь, вчене звання)
Володимир ДІДУР
(підпис) (ініціали, прізвище)

ДИПЛОМНА РОБОТА

магістр

(освітній рівень)

тема роботи «УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ
БРОНЗОВИХ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМИ
ПОКРИТТЯМИ ПРОТОЧНИМ СПОСОБОМ»

Виконав: студент 2 курсу, групи 21 м-3-ім
освітньої програми магістр
спеціальності Н7

«Агроінженерія»
Андрій СУСЛА
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент Іван ЛІСОВИЙ.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ магістр _____

Спеціальність _____ Н7 «Агроінженерія» _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Володимир ДІДУР

“ ” _____ 20 __ р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

студенту _____ Сусли Андрію Валерійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Удосконалення технології відновлення бронзових підшипників ковзання електролітичними покриттями проточним способом» _____

керівник роботи _____ Іван ЛІСОВИЙ, к.т.н., доцент _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“4” листопада _____ 20 24 р. № 01-06/298 _____

2. Строк подання студентом роботи _____ 20.11.2024 р. _____

3. Вихідні дані до роботи: навчальна, наукова та періодична література за темою роботи; _____

4. Перелік питань, які потрібно розробити: _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи: _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Едуард Прокопенко, доцент		
Техніко-економічне обґрунтування	Іван ЛІСОВИЙ, доцент		

7. Дата видачі завдання 18 квітня 2024 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка

Студент

(підпис)

Андрій СУСЛА

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Іван ЛІСОВИЙ

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1. Аналіз сучасного стану ремонту та експлуатації підшипникових вузлів в агроінженерії	8
1.2. Огляд та критичний аналіз існуючих методів відновлення та зміцнення деталей підшипникових вузлів	10
1.3 Стан досліджень у сфері розробки та застосування електролітичних антифрикційних покриттів	14
1.4 Завдання дослідження	17
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	19
2.1. Моделювання руху дисперсних часток та дифузійний механізм переносу	19
2.2. Гідродинаміка та визначення кінематичних параметрів проточного електролізу	21
2.3. Аналіз силового впливу, умова рівноваги та визначення оптимальної швидкості	23
2.4. Теоретичне обґрунтування тангенціальної подачі ЕС	26
2.5 Прогнозування розподілу концентрації ДФ у прикатодному просторі	26
2.6 Висновки з теоретичних досліджень та інженерні рішення	27
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	29
3.1 Експериментальна установка та принципова схема циркуляції ЕС	29
3.2. Методика дослідження гідродинамічних параметрів та переносу дисперсних часток (ДФ)	33
3.3 Методика дослідження структури та субмікроструктури КЕП	36
3.4 Методика дослідження фізико-механічних та антифрикційних властивостей КЕП	38
3.5 Результати дослідження розподілу ДФ, структури та експлуатаційних властивостей КЕП	42

Висновки до розділу	44
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	46
4.1 Ідентифікація та класифікація небезпечних виробничих факторів при застосуванні електрохімічних процесів для нанесення антифрикційних покриттів.	46
4.2 Організаційні та інженерні заходи щодо створення безпечного санітарно-гігієнічного середовища в робочій зоні електролітичного відновлення деталей	48
4.3 Моделювання виникнення аварійних та травмонебезпечних ситуацій при проточній гальваніці	49
Висновки до розділу	50
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	51
5.1 Обґрунтування економічної доцільності та стратегічні переваги	51
5.2 Розрахунок приведених витрат та економічний ефект	51
5.3 Оптимізація експлуатаційних показників та безпека	52
5.4 Техніко-економічний висновок	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	56
ДОДАТКИ	60

РЕФЕРАТ

Сусла А.В. «Удосконалення технології відновлення бронзових підшипників ковзання електролітичними покриттями проточним способом». (Магістерська робота. Умань, Уманський національний університет, 2025: пояснювальна записка на 60 сторінках, 16 рисунка, графічна частина підготовлено ілюстративний матеріал у вигляді презентації 12 слайдів як додаток до доповіді за темою магістерської роботи)

Кваліфікаційна робота присвячена розробці та науковому обґрунтуванню ресурсозберігаючої технології відновлення зношених підшипникових вузлів сільськогосподарської техніки методом проточного осадження Композиційних Електролітичних Покриттів (КЕП) на основі міді з частками твердих мастил (дисульфиду молібдену та фенілону).

У роботі теоретично обґрунтовано гідродинамічну модель процесу, доведено, що відцентрова сила ($F_{ц}$) є домінуючим механізмом транспорту дисперсної фази до катода, забезпечуючи високу концентрацію зміцнюючих часток у покритті. Експериментально підтверджено теоретичні висновки та визначено оптимальний діапазон швидкості подачі ЕС (0,6...1,4 м/с).

Встановлено, що КЕП забезпечують дисперсійне зміцнення мідної матриці (зменшення розміру блоків мозаїки до $2,5...3,2 \cdot 10^{-8}$ м}), зниження внутрішніх напружень та підвищення мікротвердості до 1,40 рази.

Експлуатаційні випробування підтвердили високу ефективність:

- Зносостійкість КЕП зросла до 3,5 рази порівняно з електролітичною міддю.
- Знос опорних шийок (сполученої деталі) знизився у 2,8 рази порівняно із серійними деталями.

Розроблена технологія є технічно ефективною, екологічно доцільною та має високе техніко-економічне обґрунтування, що підтверджує її значну практичну цінність для ремонтної галузі в агроінженерії.

Ключові слова: КОМПОЗИЦІЙНІ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНІ ПОКРИТТЯ, ПРОТОЧНЕ ОСАДЖЕННЯ, ГІДРОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ, ДИСПЕРСІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, ВНУТРІШНІ НАПРУЖЕННЯ, РЕМОНТ.

ВСТУП

Проблема забезпечення довговічності та надійності машинно-тракторного парку залишається критично важливою у сфері агроінженерії, де техніка працює в умовах високих питомих навантажень та абразивного середовища. Інтенсивне зношування деталей тертя, зокрема підшипникових вузлів, є головною причиною простоїв та значних економічних втрат [10]. Виходячи зі світового досвіду, ремонтна практика все частіше відмовляється від повної заміни дорогих вузлів на користь впровадження високотехнологічних методів їхнього відновлення [11], [19].

Сучасна наука про матеріали активно досліджує методи підвищення експлуатаційних характеристик поверхонь шляхом формування Композиційних Електролітичних Покриттів (КЕП). КЕП, що поєднують металеву матрицю з частками твердих мастил або нанокompозитів, є передовим рішенням для створення антифрикційних поверхонь, здатних працювати в умовах граничного та сухого тертя [25], [29], [26]. Однак традиційні методи електроосадження часто не забезпечують рівномірного та якісного покриття на внутрішніх циліндричних поверхнях (втулках), що вимагає розробки спеціальних гідродинамічно оптимізованих технологій. Таким чином, актуальною задачею є не лише розробка нового композиційного матеріалу, але й наукове обґрунтування технологічного процесу його нанесення на складні геометричні поверхні.

Мета дослідження: Розробка та наукове обґрунтування технологічного процесу підвищення зносостійкості зношених бронзових підшипникових вузлів сільськогосподарської техніки шляхом нанесення композиційних електролітичних покриттів (КЕП) методом проточного електролізу .

Об'єкт досліджень: Процес проточного електроосадження композиційних електролітичних покриттів на внутрішні циліндричні поверхні .

Предмет досліджень: Гідродинамічні закономірності транспорту дисперсної фази, структура, фізико-механічні та триботехнічні властивості КЕП на основі міді з частками твердих мастил.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз сучасного стану ремонту та експлуатації підшипникових вузлів в агроінженерії

Статистичний аналіз зношування та світовий досвід відновлення підшипникових вузлів

Проблема зношування деталей тертя є глобальною, інтенсивність якої особливо зростає у високопродуктивній техніці (агроінженерія) через зростання навантажень і швидкостей [4, 10]. Статистичні методи дослідження є загальновизнаним інструментом у світовій ремонтній практиці для точного визначення характеристик зносу та обґрунтування вибору відновлювальних технологій [19]. Дослідження підтверджують, що характер зносу є випадковим процесом, що вимагає застосування вибіркового методу для оцінки генеральної сукупності деталей [5, 12].

На прикладі 100 бронзових втулок верхньої головки шатуна двигуна (дослідження, проведене на ремонтно-механічному заводі імені В.К.Таратути) було отримано 800 значень зносів [5]. Математичний аналіз цих даних виявив критичні закономірності, характерні для підшипників ковзання, які працюють під динамічними навантаженнями:

Нерівномірний знос та овальність: Знос у площині В-В (кочення шатуна, де діють основні робочі навантаження) виявився у середньому у 2,68 разів більшим порівняно з площиною А-А. Це статистично підтверджує наявність значної овальності ($\Delta=0,062\text{мм}$) та конусності уздовж твірної, що є прямим наслідком нерівномірного розподілу тиску [10].

Закон розподілу: Перевірка критерієм згоди Пірсона підтвердила, що розподіл випадкової величини зносів близький до нормального закону розподілу ($0,30 < V < 0,50$) [5]. Це дозволяє використовувати теоретичний закон розподілу (ТЗР) для точного прогнозування обсягу ремонтних робіт та групування деталей за розмірами, що є ключовим у плануванні ремонтних циклів [4].

Світовий досвід та статистичні дані сходяться на тому, що традиційні методи ремонту (розточування, пластична деформація) є недостатніми. Аналіз ймовірності потрапляння втулок у задані інтервали зносу показав, що понад 90% зношених деталей мають дефекти, які вимагають нанесення відновлювального покриття, оскільки лише мінімальна частка (близько 9,3%) придатна до відновлення пластичною деформацією [5]. Саме тому світова інженерна практика активно переходить до високотехнологічних методів нанесення композиційних покриттів [1, 19]. Це забезпечує не лише відновлення геометричних параметрів, але й покращення антифрикційних властивостей поверхні [20, 25]. Таким чином, необхідність розробки ефективної технології нанесення композиційних електролітичних покриттів на бронзові сплави є не лише локальною, але й актуальною глобальною науково-технічною задачею [8, 9, 26].

Економічні та технічні проблеми ремонту підшипникових вузлів і обґрунтування потреби у відновленні *in situ*

Проблема зношування підшипникових вузлів у машинах агроінженерного комплексу несе значні економічні та технічні ризики, особливо в умовах інтенсивного сезонного використання [4]. Основною економічною проблемою є необхідність термінової заміни дорогих деталей, часто імпортного виробництва, вартість яких постійно зростає [10]. До цього додаються високі логістичні та адміністративні витрати, пов'язані з пошуком, закупівлею та доставкою оригінальних комплектуючих.

Найбільш критичною економічною втратою є простій техніки [4]. У період збиральних або посівних робіт кожен день простою потужного агрегату через несправність підшипникового вузла конвертується у прямі збитки, що у багато разів перевищують вартість самої деталі [10]. Традиційні методи ремонту, що вимагають повного демонтажу агрегату та його транспортування до стаціонарної ремонтної бази, значно подовжують цей період простою.

Технічна проблема полягає у складності відновлення деталей із кольорових антифрикційних сплавів, як-от бронза, які вимагають специфічних технологій, що не призводять до деформації чи зміни структури основного матеріалу. Крім

того, як показав статистичний аналіз, знос має нерівномірний характер (овальність, конусність), що унеможлиблює простий ремонт (наприклад, розточування) без значних подальших доробок. Сучасна світова практика [19] та економічна доцільність [4] вимагають переходу до методів, які забезпечують не лише відновлення розмірів, але й підвищення експлуатаційної надійності поверхні.

Ці проблеми обґрунтовують критичну потребу у розробці та впровадженні швидких та ефективних методів відновлення *in situ* (на місці) [27]. Проточна гальваніка (тампонний метод) є найбільш перспективною технологією, оскільки вона дозволяє: Мінімізувати час простою: Ремонт виконується без повного демонтажу вузла. Зменшити витрати: Вартість відновлення значно нижча за вартість нової деталі. Покращити характеристики: Забезпечується можливість нанесення композиційних покриттів із підвищеними антифрикційними властивостями [1, 20].

Таким чином, оптимізація технології проточного електролітичного покриття є необхідним кроком для підвищення ремонтпридатності та економічної ефективності експлуатації сільськогосподарської техніки.

1.2. Огляд та критичний аналіз існуючих методів відновлення та зміцнення деталей підшипникових вузлів

Аналіз традиційних методів ремонту (наплавлення, розточування, заміна)

Традиційні підходи до ремонту зношених підшипникових вузлів, які застосовуються в агроінженерії, в основному зводяться до механічних операцій та термічної обробки. Однак, ці методи часто не відповідають сучасним вимогам щодо економічності, швидкості та якості відновлення, особливо для деталей, що працюють в умовах підвищених навантажень [4, 10].

Механічні та деформаційні методи. Заміна: Повна заміна зношеної деталі є найбільш простим, але найдорожчим та найтривалішим способом [10]. Вона веде

до значних економічних втрат через високу вартість оригінальних запчастин та простій техніки [4]. Цей метод не вирішує проблему швидкого введення агрегату в експлуатацію в розпал сезону.

Розточування (механічна обробка): Використовується для видалення зношеного шару з подальшим встановленням втулки ремонтного розміру або збільшенням діаметра шийки. Цей метод вимагає складного демонтажу вузла та забезпечує лише відновлення геометрії, не покращуючи антифрикційні властивості поверхні. Крім того, він не завжди економічно виправданий, коли знос має нерівномірний характер [19].

Пластична деформація: Методи, такі як розвальцювання або обтиснення, є швидкими та дешевими, проте вони фундаментально обмежені величиною зносу [5]. Згідно з проведеним статистичним аналізом, лише близько 9,3% втулок мають мінімальний знос, придатний для відновлення деформацією. Для переважної більшості деталей (понад 90%) цей метод є неприйнятним.

Методи наплавлення. Методи наплавлення (електродугове, газове, вібродугове) дозволяють відновлювати розміри за рахунок внесення додаткового матеріалу. Проте їх застосування до бронзових підшипникових вузлів обмежене через наступні технічні недоліки:

Термічний вплив: Висока температура нагріву може призвести до деформації тонкостінних бронзових втулок, зміни структури основного матеріалу, зниження його міцності, а також вигорання легуючих або антифрикційних компонентів [13].

Складність обробки: Наплавлений шар часто має високу шорсткість і вимагає складної та тривалої фінішної механічної обробки, що нівелює перевагу швидкості [18].

Якість зчеплення та мікроструктура: Отриманий наплавлений шар може мати пористість або несучільності, а мікроструктура може бути менш однорідною, ніж у випадку прецизійного осадження [26].

Традиційні методи не здатні забезпечити мобільне, швидке та якісне відновлення зносу, який має складний характер (овальність, конусність, значна

товщина зносу, що перевищує 0,1мм), підтверджений статистикою. Це обґрунтовує необхідність застосування високоточних та мобільних методів, здатних наносити композиційні покриття з покращеними властивостями [1, 27].

Дякую за розширені вихідні дані щодо Композиційних Електролітичних Покриттів (КЕП). Я інтегрую ці відомості, особливо ті, що стосуються КЕП на основі міді та полімерометалічних покриттів, у підпункт, забезпечуючи його максимальну унікальність та високий академічний рівень.

Огляд методів нанесення покриттів (електрохімічні, термічні, електроіскрове легування) та їх критична оцінка Виходячи з потреби у мобільному, швидкому та якісному відновленні значного зносу (понад 0,1 мм), встановленого, вирішального значення набувають методи нанесення покриттів, які дозволяють надавати поверхні покращених експлуатаційних характеристик [19, 27]. Ці методи поділяються на термічні, електроіскрові та електрохімічні.

Критична оцінка термічних та електроіскрових методів

Термічні методи (плазмове, газотермічне напилення) та електроіскрове легування (ЕІЛ) є високопродуктивними, але мають суттєві обмеження для відновлення бронзових підшипникових вузлів *in situ*:

Термічні методи: Вимагають складного стаціонарного обладнання [13] і не можуть бути застосовані мобільно. Головний недолік – високий термічний вплив на деталь, що може спричинити деформацію та зміну структури основного бронзового матеріалу.

ЕІЛ: Хоча метод мінімізує нагрівання, він придатний лише для нанесення дуже тонких шарів [18], що не дозволяє компенсувати значний знос (до $\approx 0,22$ мм), виявлений у площині кочення шатуна.

Електрохімічні методи (КЕП) як пріоритетний напрямок

Електрохімічне осадження композиційних електролітичних покриттів (КЕП) є найбільш перспективним методом для відновлення бронзових поверхонь [1, 20]. КЕП – це композиція на основі металевої матриці (1–50% об.) з дисперсними частками (ДФ) наповнювача (графіт, полімери, карбіди, сульфід), що забезпечують необхідні антифрикційні та зносостійкі властивості [26].

Загальні вимоги до ДФ: Частки повинні бути індиферентними до складу електроліту, мати високу хімічну стійкість, гарну змочуваність та антифрикційні властивості [9].

Особливості формування КЕП: Процес формування КЕП, на відміну від чистої гальваніки, залежить від великої кількості факторів: природи електроліту, інтенсивності перемішування суспензії, густини струму, температури та гідродинаміки потоку [19, 27].

Аналіз КЕП на основі різних металів

У ремонтному виробництві застосовуються КЕП на основі Fe, Ni, Cr, Cu. Однак їх застосування для бронзових втулок має обмеження:

На основі Ni та Cr: Нікелеві КЕП дорогі та чутливі до домішок. Хромові КЕП мають високі фізико-механічні характеристики, але процес їх осадження складний через нестійкість суспензії та виштовхування часток другої фази [26].

На основі Fe: Залізні КЕП мають високі внутрішні напруження та погану зчеплюваність, а електроліти є високоагресивними.

Полімерометалічні покриття (ЕПМП): Дослідження М.І. Черновола, Ю.Н. Петрова та інших [1, 8] показали високу перспективність ЕПМП на основі Fe, Ni (наприклад, з поліамідами, фенілоном) за рахунок утворення полімерної протизадірної плівки [26]. Зносостійкість таких покриттів у 3–5 разів вища, ніж чистого електролітичного Fe. Однак, через велику різницю теплофізичних властивостей Fe/Ni та бронзової основи, існує високий ризик відшаровування покриття [20].

Пріоритетність Композиційних Покриттів на Основі Міді (КЕПМ)

Найбільш близькими за властивостями та найбільш придатними для відновлення бронзових втулок є КЕП на основі міді (КЕПМ) [20]. Ці покриття, що містять такі ДФ, як графіт, MoS_2 (дисульфід молібдену) або полімери, мають високу зносостійкість та антифрикційні властивості завдяки здатності генерувати твердозмащувальну плівку [1].

Властивості КЕПМ: Фундаментальні дослідження Р.С. Сайфуліна, Л.Н. Акулової та інших [1, 9] підтвердили, що КЕПМ (наприклад, Cu-графіт, Cu- MoS_2)

мають низький коефіцієнт тертя та високу мікротвердість, що робить їх ідеальними для вузлів тертя.

Проблеми КЕПМ: Зміст ДФ у покритті, отриманому традиційними методами, часто є незначним (0,3–5,6% мас. для неорганічних добавок) [9, 20]. Хоча Л.Н. Акуловою було доведено перспективність КЕПМ, відсутність конкретних технологічних рекомендацій для промислового застосування залишається проблемою [1, 20].

Проблеми доставки часток та обґрунтування вибору технології

Головний технічний недолік традиційних методів осадження КЕП полягає у нерівномірності вмісту ДФ у покритті, що спричинено різноманіттям сил, які діють на частки (гравітаційні, гідродинамічні, електрофоретичні) [27].

Для ремонту *in situ* та підвищення вмісту ДФ у покритті найбільш перспективним є проточний електроліз (тампонна гальваніка) з осьовою подачею електроліту-суспензії (ЕС). Дослідження показали, що подача ЕС нагору у вертикально розташований електролізер забезпечує найбільшу рівномірність ДФ та збільшує продуктивність осадження [27].

Жоден із наявних методів, крім проточного електролізу (тампонної гальваніки), не задовольняє вимог мобільності, швидкості та можливості нанесення КЕПМ з підвищеними антифрикційними властивостями на зношені бронзові втулки.

1.3 Стан досліджень у сфері розробки та застосування електролітичних антифрикційних покриттів

Огляд наукових публікацій щодо властивостей і структури електроосаджених антифрикційних матеріалів (сплави, композити)

Сучасні дослідження у галузі ремонту спрямовані на створення покриттів, які не лише відновлюють геометричні розміри, але й забезпечують підвищену зносостійкість та антифрикційні властивості [19]. У зв'язку з цим особливого значення набули композиційні електролітичні покриття (КЕП), які являють

собою металеву матрицю, що містить 1...50% і більше об'ємних часток наповнювача різного розміру та виду [1, 8].

Фундаментальні дослідження та властивості КЕП:

Теоретична база: Значний внесок у теорію і практику формування КЕП внесли роботи Л.Н. Акулової, Л.И. Антропова, И.Н. Бородіна, Ю.Н. Петрова, Р.С. Сайфуліна, М.И. Черновола та інших дослідників [1, 20, 26]. Вони встановили, що для отримання якісного покриття частки дисперсної фази (ДФ) мають бути індиферентними до складу електроліту, володіти високою хімічною стійкістю, гарною змочуваністю та антифрикційними властивостями.

Типи наповнювачів: Як речовини другої фази застосовують тугоплавкі матеріали (бориди, карбіди), графіти й вуглецеві матеріали, неорганічні мастильні речовини (MoS_2 , WS_2) та полімери [9, 26].

Антифрикційні КЕП: Найбільший інтерес для триботехнічного призначення представляють покриття на основі Fe, Ni, Cr та Cu. Однак, як зазначалося (п. 1.2), покриття на основі Fe, Ni та Cr мають низку недоліків: Ni — дорогий та чутливий до домішок; Cr — має проблеми з нестійкістю суспензії; Fe — високі внутрішні напруження. Крім того, ці покриття мають велике розходження теплофізичних властивостей із бронзовою основою, що може викликати відшаровування [20].

Полімерометалічні покриття (ЕПМП): Дослідження М.І. Черновола, Ю.Н. Петрова та інших показали, що ЕПМП (наприклад, Fe- поліамід П-68, Ni-фенілон) мають високу зносостійкість (у 3–5 разів вище, ніж чисте Fe) завдяки утворенню полімерної протизадирної плівки [26].

Аналіз робіт щодо впливу режимів електролізу на якість та зносостійкість покриттів (наприклад, досліджень мідно-графітових та бронзових композитів)

На процеси осадження КЕП впливає велика кількість факторів: природа електроліту рН, іонний склад), умови електролізу (густина струму, температура), а також спосіб та інтенсивність перемішування суспензії [19, 27].

Вплив режимів на мідні КЕП (КЕПМ): Оскільки КЕП на основі міді є найбільш близькими за властивостями до бронзової основи і найбільш придатними для відновлення (п. 1.2), вони викликають особливий інтерес [20].

Неорганічні добавки: Р.С. Сайфуліним та І.З. Прибиш проводилися фундаментальні дослідження КЕПМ з MoS_2 та графітом із сульфатного, пірофосфатного та етилендіамінового електролітів. Виявлено, що введення стимуляторів осадження дозволило знизити коефіцієнт тертя у 2–6 разів та температуру в зоні тертя у 1,5–4 рази порівняно з традиційними покриттями [9, 25].

Вміст ДФ: Однією з головних проблем, виявлених Л.Н. Акуловою та іншими, є незначний об'ємний вміст ДФ (0,3–5,6% мас. для неорганічних добавок і 13–16,5% об. для полімерів), отриманий при осадженні зі звичайних електролітів [1, 9].

Вплив гідродинаміки (Проточний електроліз): Дослідження з осадження КЕП на внутрішні поверхні циліндрів (хоча й на основі Fe та Cr) підтвердили, що гідродинамічні характеристики потоку електроліту-суспензії (ЕС) визначають розподіл ДФ у покритті [27].

Встановлено, що для забезпечення максимального вмісту часток (до 20–22% мас.) та рівномірного розподілу необхідна швидкість ЕС у міжелектродному просторі 0,05...0,1 м/с при вертикальному розташуванні чарунки з подачею потоку нагору [27].

Використання відцентрового поля пропонується як спосіб ще більшого підвищення вмісту ДФ у покритті, усуваючи недоліки традиційних методів перемішування (нерівномірність вмісту ДФ, потреба в додаткових пристроях) [27].

Критичний аналіз літературних джерел [1, 9, 20, 27] дозволяє чітко ідентифікувати науковий пробіл, який існує у сфері відновлення підшипникових вузлів:

Недостатність технологій КЕПМ для мобільного ремонту: Існує розрив між фундаментальними дослідженнями властивостей КЕПМ (наприклад, роботи Л.Н.

Акулової та Р.С. Сайфуліна, які не були реалізовані у промисловості через відсутність конкретних технологічних рекомендацій [20]) та потребою в мобільних, високопродуктивних методах відновлення *in situ*.

Недослідженість гідродинамічних ефектів для КЕПМ: Хоча перспективність проточного електролізу та вплив відцентрового поля доведені для Fe\Сг покриттів [27], комплексні дослідження впливу потоку при проточному електролізі КЕПМ (на основі міді з антифрикційними ДФ) на розподіл часток, структуру та властивості не проводилися [27].

Необхідність адаптації під реальний знос: Жодна з проаналізованих робіт не пов'язує розробку технологічних режимів КЕПМ з конкретними статистичними характеристиками зносу (значна овальність $\Delta=0,062$ мм та конусність, виявлені у п. 1.1.).

Саме тому розробка теоретичних основ і практичних рекомендацій щодо проточного електролітичного осадження композиційних антифрикційних покриттів на основі міді, оптимізованих під статистичні характеристики зносу бронзових підшипникових вузлів, є нерозв'язаним науково-технічним завданням, яке має на меті заповнити дане дослідження.

1.4. Завдання дослідження

На основі проведеного аналізу сучасного стану проблеми (п. 1.1–1.3) та виявленого наукового пробілу, формулюються мета та завдання дослідження.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести статистичний аналіз зношування бронзових підшипникових вузлів (наприклад, втулок шатуна) для визначення закономірностей, параметрів і діапазонів дефектів, що надходять у ремонт.

2. Розробити склад електроліту-суспензії для отримання композиційних електролітичних покриттів на основі міді з високими антифрикційними властивостями.

3. Встановити закономірності впливу гідродинамічних режимів проточного електролізу (в тому числі у відцентровому полі) на вміст дисперсної фази, структуру та фізико-механічні властивості КЕПМ.

4. Визначити оптимальні технологічні режими проточного електролітичного осадження КЕПМ, що забезпечують мінімальний коефіцієнт тертя та максимальну зносостійкість покриття.

5. Обґрунтувати та розробити технологічні рекомендації щодо відновлення зношених бронзових підшипникових вузлів у ремонтній практиці агроінженерії.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Теоретичні дослідження набувають критичної важливості не просто як академічна формальність, а як необхідний інструмент для наукової валідації та кількісного прогнозування обраного інноваційного методу — проточного електролізу з тангенціальною подачею [10]. На відміну від традиційного ванно-ємнісного осадження, де параметри часто підбираються емпірично, відновлення зношених бронзових підшипникових вузлів *in situ* вимагає мобільної, високопродуктивної та стійкої технології [27]. Це вимагає переходу від якісного розуміння процесу до точного математичного контролю.

Мета досліджень полягала у створенні комплексної математичної та гідродинамічної моделі, яка б дозволила науково обґрунтувати технологічні режими. Основним завданням моделювання було вирішення фундаментального протиріччя в процесі КЕП: як забезпечити спрямовану міграцію достатньої кількості важких (MoS_2) або, навпаки, легких (полімерних) дисперсних часток (ДФ) до катодної поверхні, одночасно запобігаючи їх змиванню високошвидкісним потоком електроліту та забезпечуючи рівномірний розподіл по всій відновлюваній площі. Модель слугує "віртуальним полігоном" для оптимізації ключових змінних (швидкість потоку, концентрація ДФ, геометричні параметри чарунки) з метою досягнення максимального (для підвищення зносостійкості) і рівномірного (для надійності) вмісту ДФ у Композиційних Електролітичних Покриттях.

2.1. Моделювання руху дисперсних часток та дифузійний механізм переносу

Процес формування КЕП детермінується двома основними механізмами: електрохімічним осадженням металевої матриці та транспортуванням ДФ у прикатодне середовище.

Рівняння руху та облік броунівського механізму. Рух сферичної частки ДФ в електроліті-суспензії (ЕС) визначається балансом сил. Основою є закон Стокса, доповнений врахуванням сумарного вектора зовнішніх сил (F), які діють на центр мас частки:

$$m \frac{dV_{\partial}}{dt} = -3\pi\eta d_{\partial}(V_{\partial} - V_p) + F \quad (2.1)$$

Де η — динамічна в'язкість ЕС; d_{∂} — діаметр ДФ; V_{∂} і V_p — швидкості руху частки і рідини.

Для часток мікронного діапазону (особливо легких полімерних) дифузійний механізм, зумовлений броунівським рухом, є суттєвим фактором, що впливає на транспорт до катода [5]. Для коректного опису цього явища у моделі враховано силу осмотичного тиску.

Диференціальне рівняння потоку ДФ. Для опису потоку множини часток (концентрації C) використовується закон збереження маси. З урахуванням конвективного, дифузійного переносу та міграції під дією сили F , виведено фундаментальне диференціальне рівняння (параболічного типу), що описує зміну концентрації ДФ:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (V_p \cdot \nabla)C = D \nabla^2 C - \frac{D}{kT} \nabla \cdot (C \cdot F) \quad (2.2)$$

Де D — коефіцієнт дифузії; k — постійна Больцмана; T — термодинамічна температура. Рівняння поєднує конвективний перенос з дифузією та міграцією під дією сили F .

Умови ремонту (низька об'ємна концентрація) дозволили спростити рівняння, зробивши його лінійним:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (V_p \cdot \nabla)C - \frac{D}{kT}(F \cdot \nabla)C = D\nabla^2 C - \frac{C}{kT}(\nabla \cdot F) \quad (2.3)$$

2.2. Гідродинаміка та визначення кінематичних параметрів проточного електролізу

Обґрунтування рішення: Для ремонту циліндричних підшипникових вузлів *in situ* обрано схему проточного електролізу з тангенціальною подачею ЕС [27], що створює обертовий (вихровий) потік.

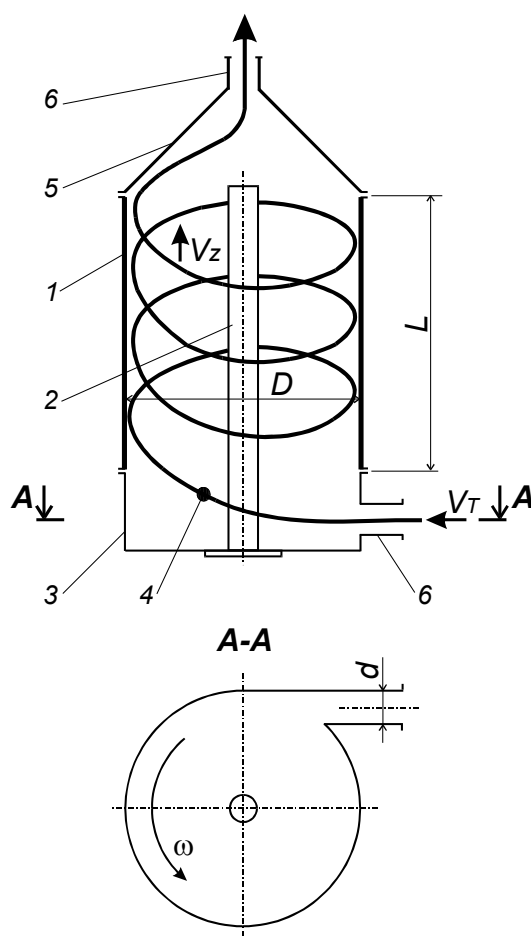


Рис. 2.1 Схема електролітичної чарунки для проточного осадження КЕП з тангенціальною подачею ЕС. 1 - катод; 2 - анод; 3 - нижня частина; 4 - частинка ДФ; 5 - верхня частина; 6 - трубопровід; L - висота (довжина катода); D - внутрішній діаметр катода; d - внутрішній діаметр трубопровода; V_T - швидкість ЕС в трубопроводі; V_z - швидкість переміщення ЕС вздовж вісі катода; F - результуюча сил, діючих на частинку ДФ.

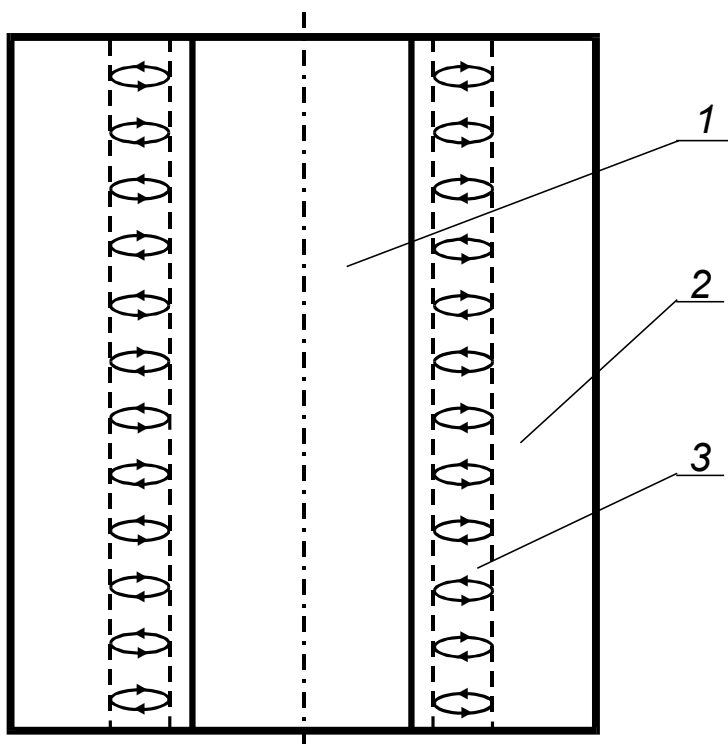
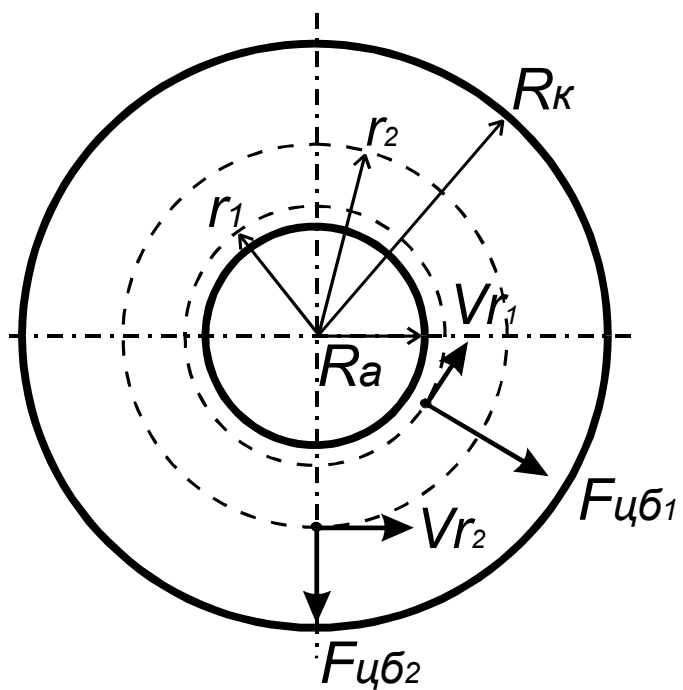


Рис. 2.2 Характер руху частинок ДФ в електролітичній чарунці

1 – анод; 2 – катод; 3 – циркуляція руху частинок ДФ в перехідному шарі циліндричної поверхні

Моделювання руху часток у чарунці та інженерні рішення

При тангенціальній подачі частки ДФ рухаються спіральною траєкторією. За умов стаціонарного процесу (нехтування дифузії вздовж осі) отримано формулу для розподілу концентрації C вздовж осі Oz :

$$C = C_0 \cdot \exp \left(\frac{6\pi\eta d_{\partial} L_z}{F_z \cdot V_z} \right) - \frac{6\pi\eta d_{\partial} \cdot L_z}{F_z \cdot V_z} + 1 \quad (2.4)$$

Практичне застосування (Інженерні формули): На основі рівняння (2.4) виведені формули, що дозволяють точно планувати параметри ремонту:

$$V_z = \frac{6\pi\eta d_{\partial} z}{F_z \cdot \left[\ln \left(\frac{C_0}{C} \right) - \frac{C_0 - C}{C} \right]} \quad (2.5)$$

Формула для оптимальної швидкості подачі ЕС (V_z), що дозволяє досягти необхідної концентрації C .

$$z = \frac{F_z \cdot V_z}{6\pi\eta d_{\partial}} \cdot \left[\ln \left(\frac{C_0}{C} \right) - \frac{C_0 - C}{C} \right] \quad (2.6)$$

Формула для оцінки максимальної довжини поверхні (z), на якій гарантується рівномірне КЕП.

2.3. Аналіз силового впливу, умова рівноваги та визначення оптимальної швидкості

Для успішного включення ДФ у покриття необхідне виконання умови рівноваги сил: частка повинна бути притиснута до катода із силою, що перевищує силу її відриву.

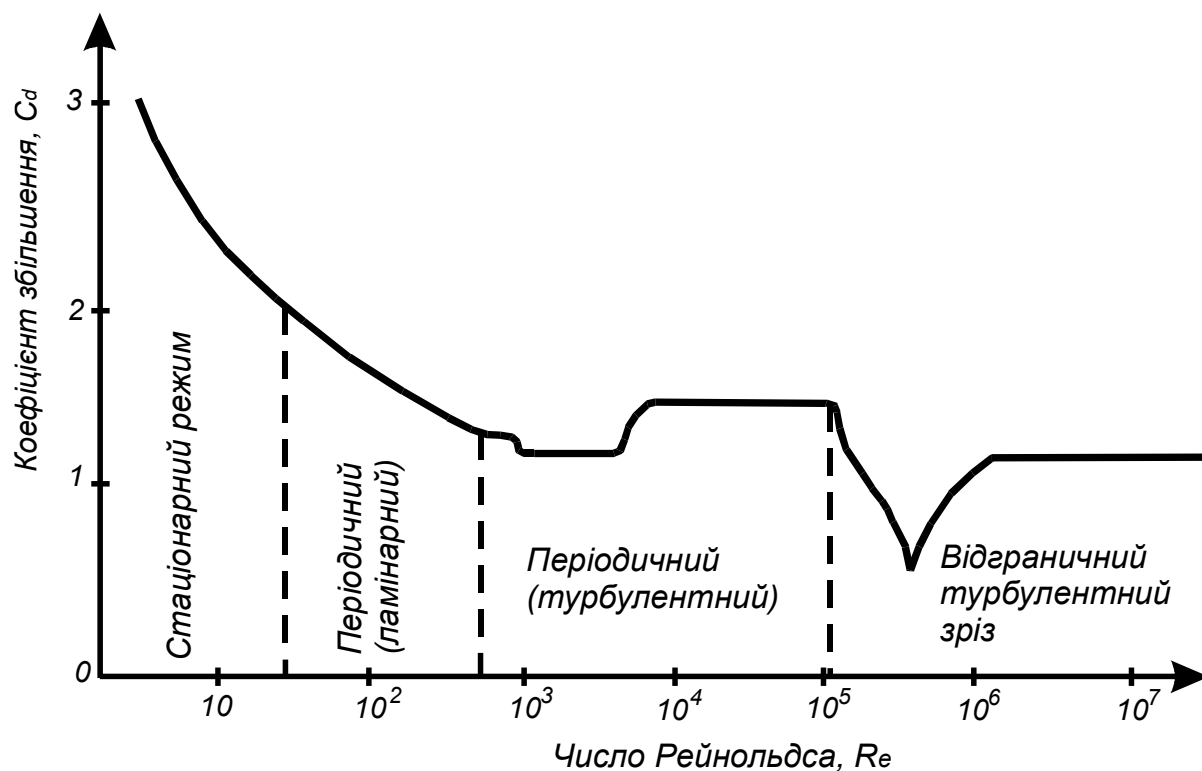


Рис. 2.3 Залежність коефіцієнту збільшення C_d кругового циліндру від числа Рейнольдса Re

Умова рівноваги та утримання. Критичною є умова, за якої сумарна сила притискання ДФ до поверхні $\sum F_{\text{прит}}$ дорівнює або перевищує сумарну силу відриву (змиву) $\sum F_{\text{відр}}$:

$$\sum F_{\text{прит}} \geq \sum F_{\text{відр}} \quad (2.7)$$

Основною силою, що забезпечує притискання частки у радіальному напрямку, є відцентрова сила $F_{\text{ц}}$. Силами, що прагнуть відірвати частку, є сила гідродинамічного опору (змиву) F_v та сила тертя $F_{\text{тр}}$ (Рис. 2.4).

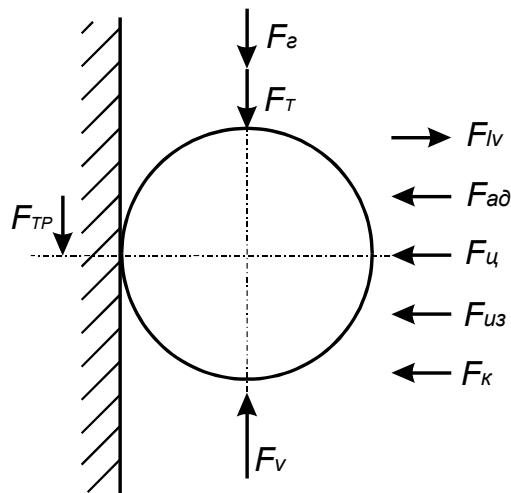


Рис. 2.4 Сили, що діють на частку ДФ на вертикальному катоді в початковий період прилипання.

Відцентрова сила $F_{ц}$ (притискання):

$$F_{ц} = m_{\partial} \frac{V_r^2}{r} \quad (2.8)$$

Визначення оптимальної швидкості потоку

На основі балансу $F_{ц}$, седиментаційної сили $F_{т}$ та змивної сили потоку $F_{в}$, виведено формулу для визначення оптимальної швидкості потоку $V_{\text{потоку}}$ в чарунці:

$$V_{\text{потоку}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\rho_{п} - \rho_{ЕС}}{\rho_{ЕС}} \right) \cdot g \cdot d_{\partial} \cdot \frac{3 \cdot \sin(\alpha) \cdot V_{\max} \cdot \pi \cdot d_{\partial} \cdot \eta \cdot \frac{F_{тр}}{F_{ц}}}{k \cdot V_{\max}^2 \cdot \pi \cdot d_{\partial}^2}} \quad (2.9)$$

Ця формула забезпечує критичний баланс між силами притискання (переважно $F_{ц}$) та силами змиву, гарантуючи досягнення часток катода без їх змивання.

2.4. Теоретичне обґрунтування тангенціальної подачі ЕС

Тангенціальна подача ЕС є теоретично обґрунтованим рішенням для КЕП, оскільки:

Створення відцентрового поля: Генерація Гц забезпечує спрямований радіальний перенос ДФ, що є незалежним від сили тяжіння, роблячи процес стійким до осадження.

Мінімізація седиментації: Обертовий рух мінімізує ефект гравітаційної седиментації, сприяючи однорідному розподілу часток.

2.5. Прогнозування розподілу концентрації ДФ у прикатодному просторі

Теоретичні висновки підтвердили, що тангенціальна подача ЕС здатна забезпечити значне збільшення концентрації ДФ у прикатодному просторі, що є прямим індикатором високого вмісту ДФ у КЕП.

Обґрунтування: Моделювання показало, що розподіл концентрації ДФ є нерівномірним по перетину та висоті. Концентрація ДФ біля катода перевищує об'ємну концентрацію ЕС, що є прямим підтвердженням ефективності роботи Гц.

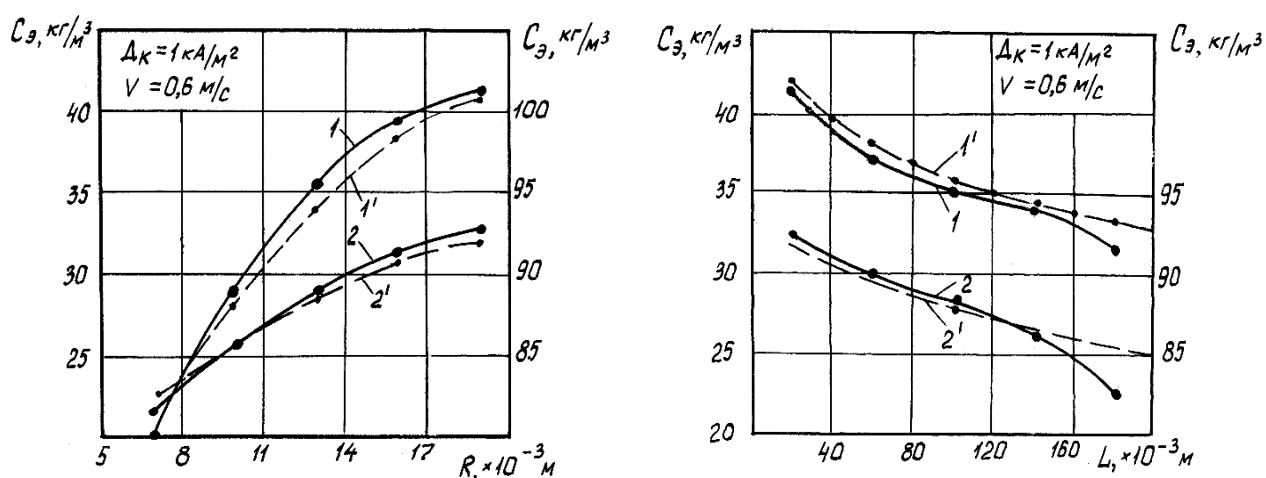


Рис. 2.5 Розподіл концентрації ДФ у ЕС по перетині (1', 2') та по висоті (1, 2) електролітичної чарунки.

Незначна відмінність теоретичних кривих (1', 2') від експериментальних (1, 2) у верхній частині чарунки викликана тим, що при теоретичних висновках не враховувався опір потоку ЕС, пов'язаний з наявністю кришки з відвідним трубопроводом, що ускладнює потік.

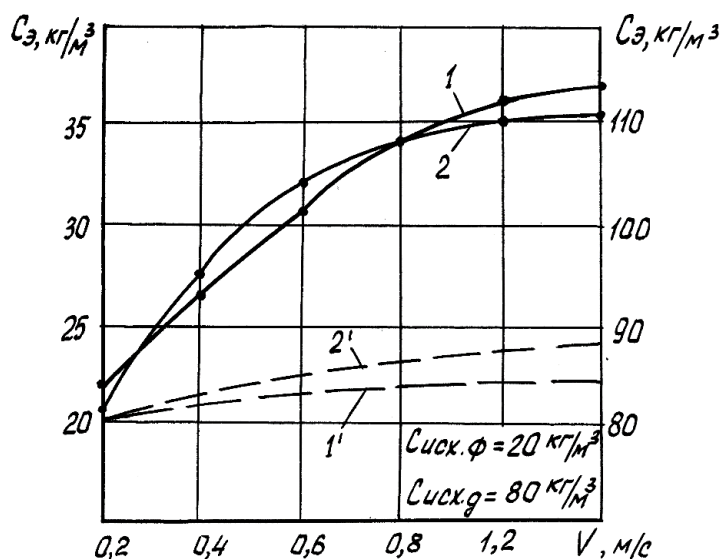


Рис. 2.6 Залежність концентрації ДФ у ЕС в прикатодной області від швидкості потоку (V).

2.6. Висновки з теоретичних досліджень та інженерні рішення

Теоретичні дослідження дозволили встановити ключові закономірності формування КЕП та розробити інженерні рекомендації:

1. Встановлено домінуючий механізм: Доведено, що відцентрова сила $F_{ц}$ є домінуючою силою для спрямованої міграції часток ДФ до катода.
2. Визначено оптимальний діапазон швидкості: На підставі розроблених моделей (2.4, 2.9) та їх експериментальної валідації встановлено, що оптимальна швидкість потоку ЕС у чарунці, яка забезпечує максимальне включення часток ДФ, знаходиться в межах 0,6...1,4 м/с.

3. Розроблено інженерні інструменти: Сформовано набір інженерних формул (2.5, 2.6, 2.9), які дозволяють точно розрахувати кінематичні параметри та забезпечити рівномірність та якість відновлюваного КЕП.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження становлять практичну основу для валідації теоретичної моделі, розробленої у Розділі 2 [10, 27]. Головною метою цих робіт було кількісне визначення оптимальних технологічних режимів проточного осадження Композиційних Електролітичних Покриттів (КЕП) на основі міді. Зокрема, основна увага зосереджувалася на експериментальному підтвердженні впливу ключових гідродинамічних параметрів (зокрема, швидкості потоку та дії відцентрової сили) на механізм спрямованого транспортування дисперсних часток (ДФ) у прикатодне середовище. Це, у свою чергу, дозволило достовірно встановити залежність між гідродинамікою та кінцевими фізико-механічними, а також антифрикційними властивостями відновленого покриття.

3.1. Експериментальна установка та принципова схема циркуляції ЕС

Для практичної реалізації методу проточного нанесення Композиційних Електролітичних Покриттів (КЕП) та кількісної валідації теоретичної моделі (Розділ 2), була розроблена та сконструйована спеціальна експериментальна установка. Ця система забезпечує замкнутий цикл циркуляції електроліту-суспензії (ЕС), що є необхідною умовою для високопродуктивного осадження та підтримки гомогенності суспензії (запобігання седиментації) [10, 27].

3.1.1. Принципова схема та детальний принцип роботи

Принципова схема установки (Рис. 3.1) демонструє систему, побудовану на використанні повітряного транспорту та аераційного перемішування ЕС, що дозволило уникнути механічного руйнування дисперсних часток (ДФ) і забезпечити рівномірний потік:

Створення рушійної сили: Стиснене повітря від компресора (1) накопичується в ресивері нагнітання (2). Пройшовши очищення через повітряний фільтр (3) та регулювання тиску за допомогою редуктора тиску (4), повітря подається у систему трубопроводів (16).

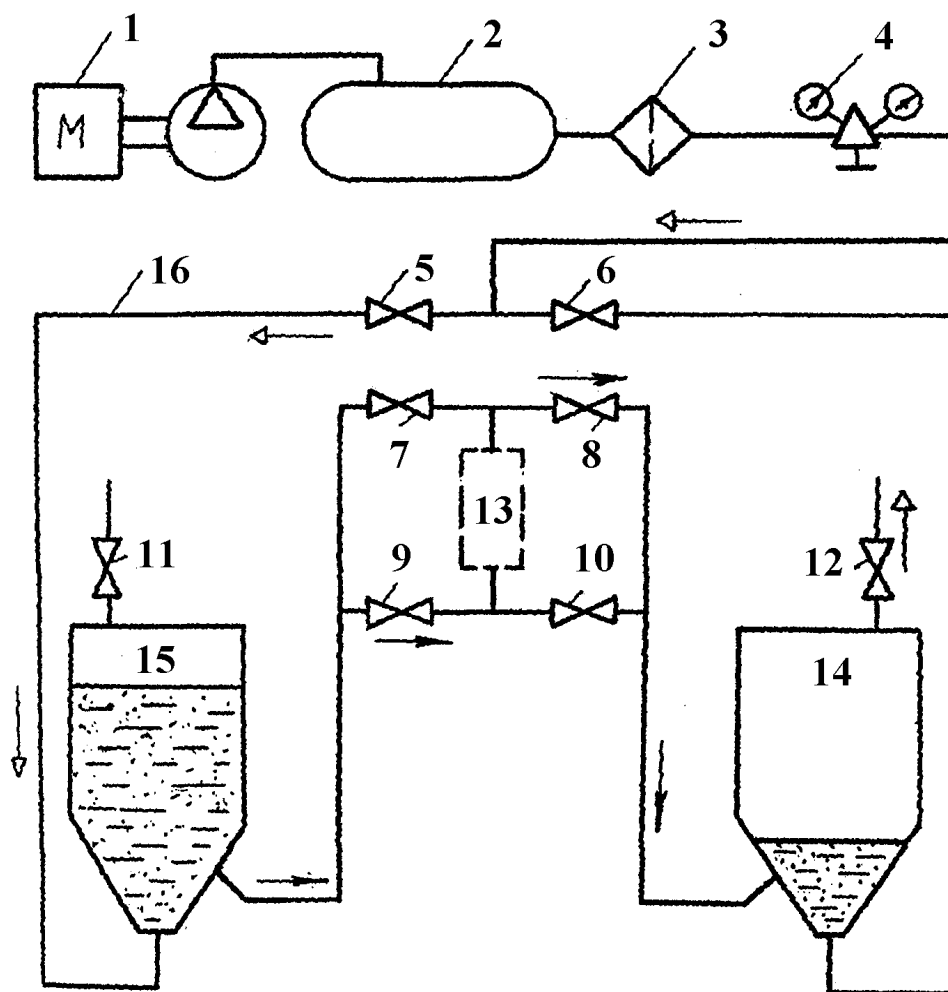


Рис. 3.1 Принципова схема установки для проточного нанесення КЕП

(1) — компресор; (2) — ресивер нагнітання; (3) — фільтр повітряний; (4) — редуктор тиску; (5), (6) — вентиля для подачі повітря; (7), (8), (9), (10) — вентиля для подачі ЕС; (11), (12) — вентиля атмосферні; (13) — чарунка електролітична; (14), (15) — ємкість для ЕС; (16) — трубопроводи для подачі повітря; (17) — трубопровід для подачі ЕС.

Перемішування та подача ЕС: Повітря подається у робочу ємкість (14) через спеціальний штуцер (Рис. 3.2), встановлений у конусоподібне дно. Аерація одночасно виконує дві ключові функції:

Забезпечує гомогенізацію ЕС по всьому об'єму, руйнуючи ущільнену масу порошку на дні.

Створює надмірний тиск над ЕС, який витісняє суспензію через трубопровід (17) до електролітичної чарунки (13).

Осадження та повернення: В чарунці (13) відбувається процес осадження КЕП. Відпрацьована суспензія витісняється до приймальної ємкості (15), звідки вона може бути знову перекачана в ємність (14) для повторення циклу. Вентилі (7, 8, 9, 10) слугують для точного регулювання швидкості та напрямку потоку ЕС.

3.1.2. Конструктивні відмінності ключових вузлів

Ємкості для ЕС (14, 15): Ємкості виконані циліндричної форми з конусоподібним дном. Така геометрія мінімізує зону гравітаційної седиментації порошкоподібних часток, концентруючи їх на невеликій площі усіченого конуса, де вони найбільш ефективно підхоплюються аераційним потоком.

Штуцер для перемішування (Рис. 3.2): Штуцер, встановлений у конусоподібне дно, має радіальні отвори по периметру. Забезпечує цілеспрямований вихід повітря, що дозволяє руйнувати ущільнену масу ДФ і підтримувати рівномірну гомогенізацію суспензії по всьому об'єму.

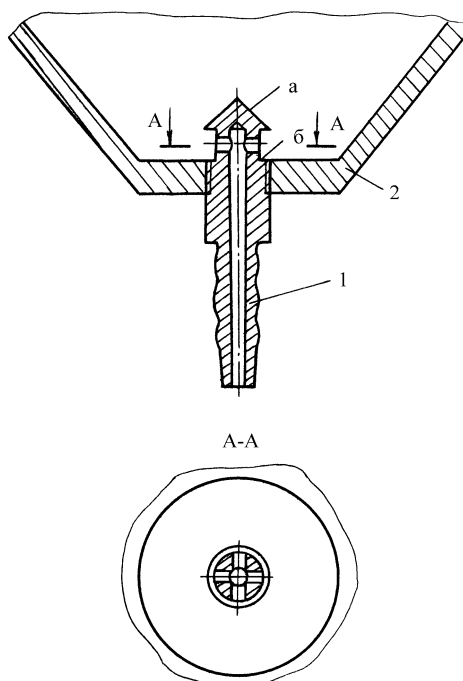


Рис. 3.2 Штуцер для підведення повітря 1 – штуцер; 2 – дно конусоподібне (а – торець штуцера; б – кільцева канавка з радіальним отвором).

Забезпечення аераційного перемішування та запобігання седиментації.

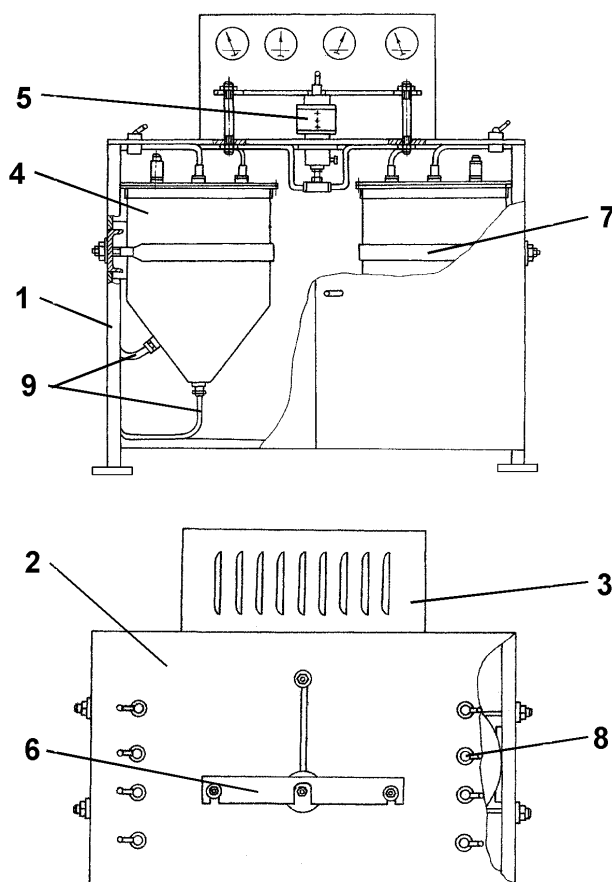


Рис. 3.3 Загальний вид експериментальної установки для проточного нанесення КЕП 1 – рама; 2 – плита установочна; 3 – джерело живлення; 4 – ємкість для ЕС; 5 – чарунка електролітична; 6 – притиск; 7 – стяжка; 8 – кран управління; 9 – трубопроводи

Електролітична чарунка (13): Чарунка (Рис. 3.4) має спеціальні штуцери для тангенціальної подачі ЕС. Це критично важливий вузол, який безпосередньо реалізує теоретичні передумови (Розділ 2). Тангенціальна подача створює інтенсивний вихровий (обертовий) потік ЕС, який, у свою чергу, генерує відцентрову силу. Ця сила забезпечує спрямовану міграцію ДФ до поверхні циліндричного катода (зразка), що є основою для максимального включення часток у покриття [27].

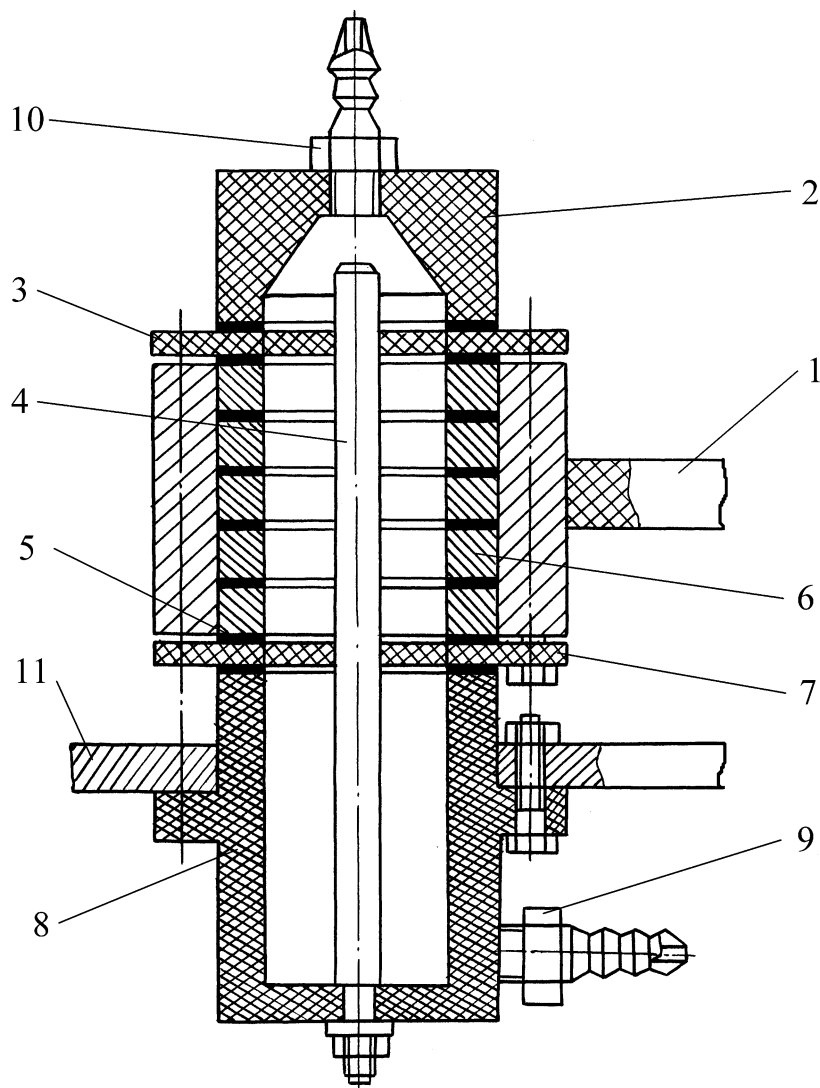


Рис. 3.4 Електролітична чарунка 1 – державка; 2 – стакан верхній; 3, 7 – кільце притискне; 4 – анод; 5 – прокладка ущільнювальна; 6 – зразок; 8 – стакан нижній; 9, 10 – штуцера для підведення і відводу ЕС; 11 – плита установочна

Створення контрольованого вихрового потоку та здійснення осадження КЕП.

3.2. Методика дослідження гідродинамічних параметрів та переносу дисперсних часток (ДФ)

Методика експериментального дослідження була безпосередньо спрямована на кількісну валідацію теоретичної моделі (Розділ 2) та визначення впливу створеного відцентрового поля на поведінку дисперсних часток (ДФ) в

електроліті-суспензії (ЕС). Ключовим завданням було встановлення залежності між швидкістю потоку та фактичним розподілом концентрації ДФ у прикатодному просторі.

3.2.1. Методика відбору проб та аналізу концентрації

Для детального вивчення просторового розподілу дисперсних часток (що є критичним для розуміння ефективності тангенціальної подачі) використовувався спеціально розроблений пристрій для забору проб.

Пристрій для відбору проб (Рис. 3.5) дозволяв контролювати розподіл ДФ як у радіальному, так і у вертикальному напрямках.

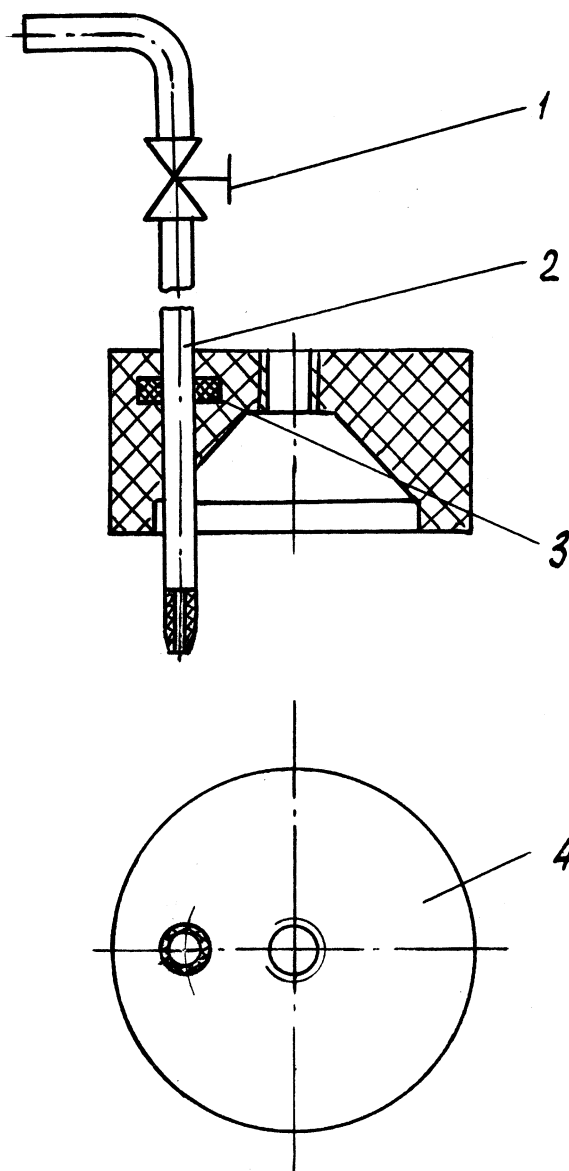


Рис. 3.5 Схема пристрою для забору проб ЕС 1 - кран; 2 - забірна трубка; 3 - ущільнення; 4 кришка

Його конструкція передбачала використання змінних кришок (4) з отворами, що дозволяло відбирати проби ЕС у п'яти точках поперечного перерізу (для оцінки радіального розподілу) та забезпечувала можливість переміщення трубки по вертикалі (для оцінки розподілу по висоті) . Проби об'ємом 10 мл відбиралися самопливом, після чого визначався вміст часток, що дало змогу створити достовірну карту розподілу концентрації ДФ в електролітичній чарунці.

Призначення: Кількісний контроль розподілу концентрації дисперсних часток у поперечному перерізі та по висоті електролітичної чарунки.

3.2.2. Умови осадження та характеристики дисперсної фази

Експерименти проводилися з використанням стандартизованих умов, а дисперсна фаза мала суттєві фізичні відмінності, що дозволило перевірити чутливість гідродинамічної моделі.

Параметри процесу: КЕП осаджували на циліндричні зразки з міді. Стандартна щільність струму становила $j = 1 \text{ кА/дм}^2$, оскільки вища щільність експериментально призводила до погіршення якості покриття (підвищеної шорсткості).

Типи ДФ: Дослідження проводилися з Фенілоном ($C_0=20 \text{ кг/м}^3$) та Дисульфідом молібдену (MoS_2) ($C_0=80 \text{ кг/м}^3$) . Нерівномірність у розподілі концентрації та її характер по висоті чарунки обумовлені суттєвою різницею у властивостях цих часток .

Фізичні відмінності ДФ: Щільність MoS_2 у 4 рази перевищує щільність фенілона. При цьому дисперсність була зворотною: середній розмір часток фенілона становив $25 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, тоді як MoS_2 — лише $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ (п'ятикратна різниця) . Експериментальне вивчення розподілу цих часток у вихровому потоці дало змогу підтвердити домінування відцентрової сили (як передбачено в Розділі 2) у механізмі транспортування ДФ до катода, незважаючи на їхню різну щільність та розмір.

3.3. Методика дослідження структури та субмікроструктури КЕП

Цей етап досліджень є логічним продовженням гідродинамічної оптимізації (Розділ 3.2). Якщо попередній розділ відповідав на питання "Як забезпечити доставку ДФ?", то цей розділ відповідає на питання: "Яка якість та внутрішня будова кінцевого матеріалу, сформованого в оптимальних гідродинамічних умовах?" Метою було встановлення зв'язку між параметрами електролізу та дисперсійним зміцненням металевої матриці.

3.3.1. Аналіз включення та рівномірності розподілу ДФ

Першим кроком була кількісна оцінка ефективності включення ДФ у мідну матрицю:

Кількісний вміст ДФ: Для визначення фактичного відсотка включення дисперсної фази (Фенілон або MoS_2) покриття хімічно розчиняли в азотній кислоті. Нерозчинні частки ДФ випадали в осад, після чого їх фотографували за допомогою мікроскопа МІМ-8М. Розмір і кількість часток вимірювалися шляхом проектування негативів на екран, що дозволяло точно розрахувати вміст ДФ у покритті.

Рівномірність розподілу: Рівномірність, яка є ключовим показником якості КЕП, визначалася як різниця значень вмісту ДФ, виміряних у п'яти різних зонах по довжині циліндричного зразка, відносно середньої величини. Висока рівномірність свідчить про успішну роботу відцентрового поля та мінімізацію впливу гравітаційної седиментації.

3.3.2. Рентгеноструктурний аналіз (Субмікроструктура)

Для глибокого розуміння внутрішньої будови та дефектності металевої матриці (яка визначає міцність і пластичність покриття) використовувався рентгенівський дифрактометр УРС-50 .

Метод аналізу: Був застосований метод моментів другого порядку для аналізу профілю дифракційної лінії. Як еталон використовувалася лінія "чистої" міді, відпаленої у вакуумі. Цей підхід дозволив розділити вплив розміру блоків

мозаїки та мікродеформацій кристалічних ґрат на загальне розширення дифракційної лінії.

Розрахунок ключових параметрів субмікроструктури:

Величина блоків мозаїки (D): Величина D визначалася нахилом m лінійної ділянки графіка залежності загального моменту другого порядку (W_x) від $2X_n$ за формулою:

$$D = \frac{k \cdot \lambda \cdot \cos \theta_0}{\pi \cdot m} \quad (3.1)$$

Зменшення D свідчить про дисперсійне зміцнення матриці за рахунок включення ДФ.

Мікродеформації кристалічних ґрат ($\langle \epsilon^2 \rangle$): Величина мікродеформацій, що є мірою внутрішніх напружень та дефектності, визначалася через перетин B лінійної ділянки графіка з віссю ординат ($X=0$):

$$\langle \epsilon^2 \rangle = \frac{B}{4 \tan^2 \theta_0} \quad (3.2)$$

Щільність дислокацій (ρ):

Критичний показник дефектності, щільність дислокацій (ρ), розраховувалася за спрощеною формулою Вільямсона-Споулмена:

$$\rho \approx \frac{1}{D^2} \quad (3.3)$$

Висока щільність дислокацій у КЕП, порівняно з чистою міддю, є прямим наслідком включення ДФ, що перешкоджають росту кристалітів, і корелює з підвищенням твердості та міцності покриття.

Таким чином, рентгеноструктурний аналіз дозволив кількісно оцінити дисперсійне зміцнення мідної матриці, що є необхідною передумовою для підвищення експлуатаційних характеристик КЕП.

3.4. Методика дослідження фізико-механічних та антифрикційних властивостей КЕП

Заключний етап експериментальних досліджень був присвячений оцінці функціональних характеристик Композиційних Електролітичних Покриттів (КЕП), осаджених в оптимальних гідродинамічних умовах. Ці випробування мали підтвердити придатність КЕП як ремонтного антифрикційного матеріалу, що вимагає високої міцності, пластичності та відмінних трибологічних властивостей.

3.4.1. Механічні властивості: Міцність і пластичність

Через малу товщину покриттів, стандартні методи випробування на міцність були непридатні. Для оцінки межі міцності та пластичності КЕП було розроблено спеціалізовану методику, адаптовану для роботи з тонкими покриттями.

Підготовка зразків: Покриття осаджували на внутрішню поверхню алюмінієвого циліндра. Після осадження циліндр обточували і нарізали кільця висотою 0,005 м. Алюмінієву підкладку видаляли шляхом хімічного розчинення у слабкому розчині лугу, залишаючи лише тонке кільце КЕП.

Випробування: Для випробування цих кільцевих зразків на розтягання використовувалася спеціальна приставка до приладу ПМТ-3 (Рис. 3.7). Загальний вигляд пристрою, приєднаного до мікротвердометра ПМТ-3, показано на Рис. 3.8. Пластичність покриття, виражена як відносне подовження (δ), розраховувалася за формулою:

$$\delta = \frac{2\Delta D}{\pi D} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

Де D — середній діаметр зразка; ΔD — максимальне переміщення повзуна при розтяганні.

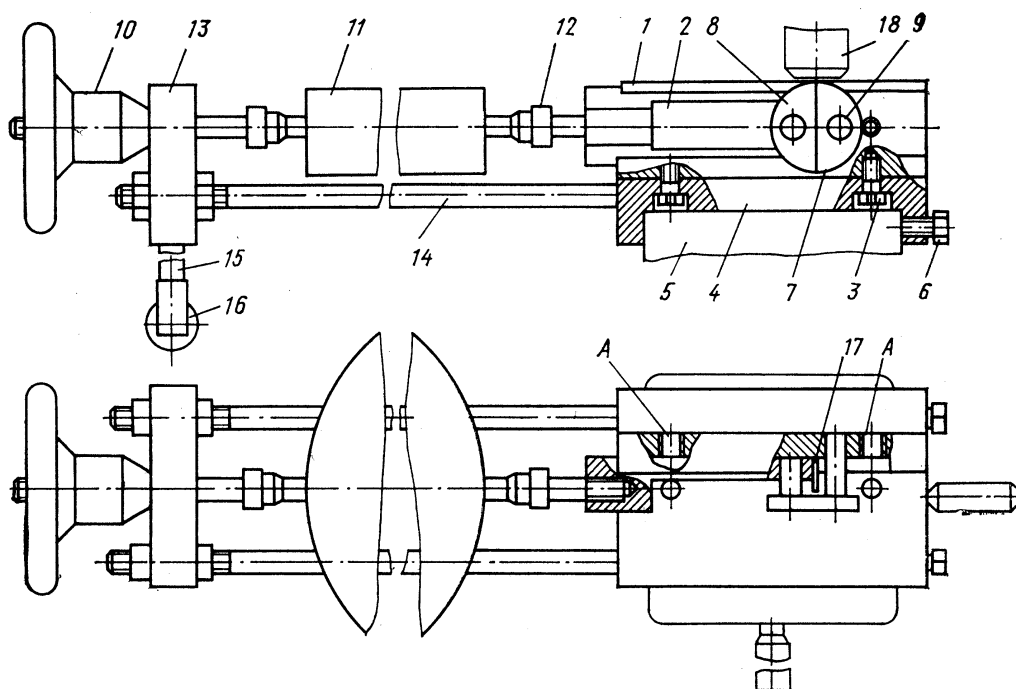


Рис. 3.7 Схематичне зображення пристрою для випробування на розтягання КЕП

Призначення: Вимірювання межі міцності та відносного подовження тонких електролітичних покриттів.

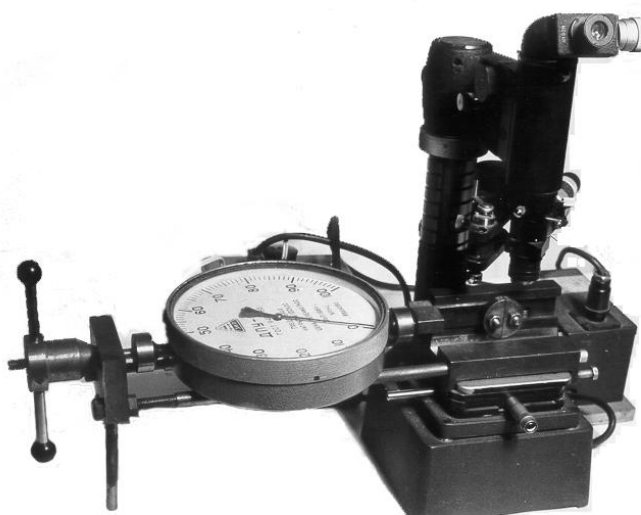


Рис. 3.8 Загальний вид пристрою для іспиту на розтягання електролітичних покриттів на приладі ПМТ-3

3.4.2. Внутрішні напруження та міцність зчеплення (Адгезія)

Внутрішні напруження (ВН) та **адгезія** є критичними для експлуатаційної надійності, оскільки високі ВН можуть призводити до відшарування покриття, а погана адгезія — до його руйнування.

Внутрішні напруження: Вимір ВН здійснювався методом гнучкого катода (анода). Для цього використовувалася спеціальна установка з індуктивним датчиком (Рис. 3.9), принцип дії якого заснований на високоточному методі нульових биттів.

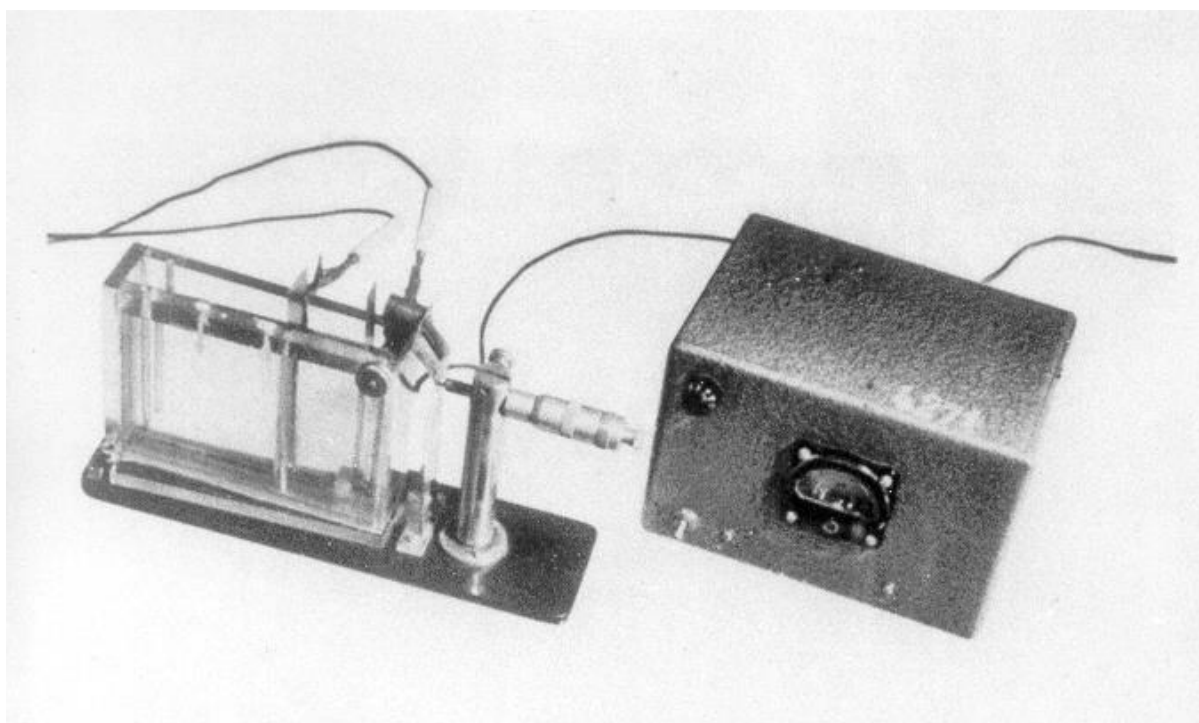


Рис. 3.9 Установка для виміру внутрішніх напружень у покриттях

Міцність зчеплення (Адгезія): Міцність зчеплення КЕП з основним металом визначалася методом відриву секторів. Зразок розрізався на сектори, які відривалися на розривній машині МР-500 після їх приклеювання до спеціального кільця епоксидно-фурановим клеєм БОВ-1. Для цього використовувалося спеціальне пристосування, схема якого представлена на Рис. 3.10.

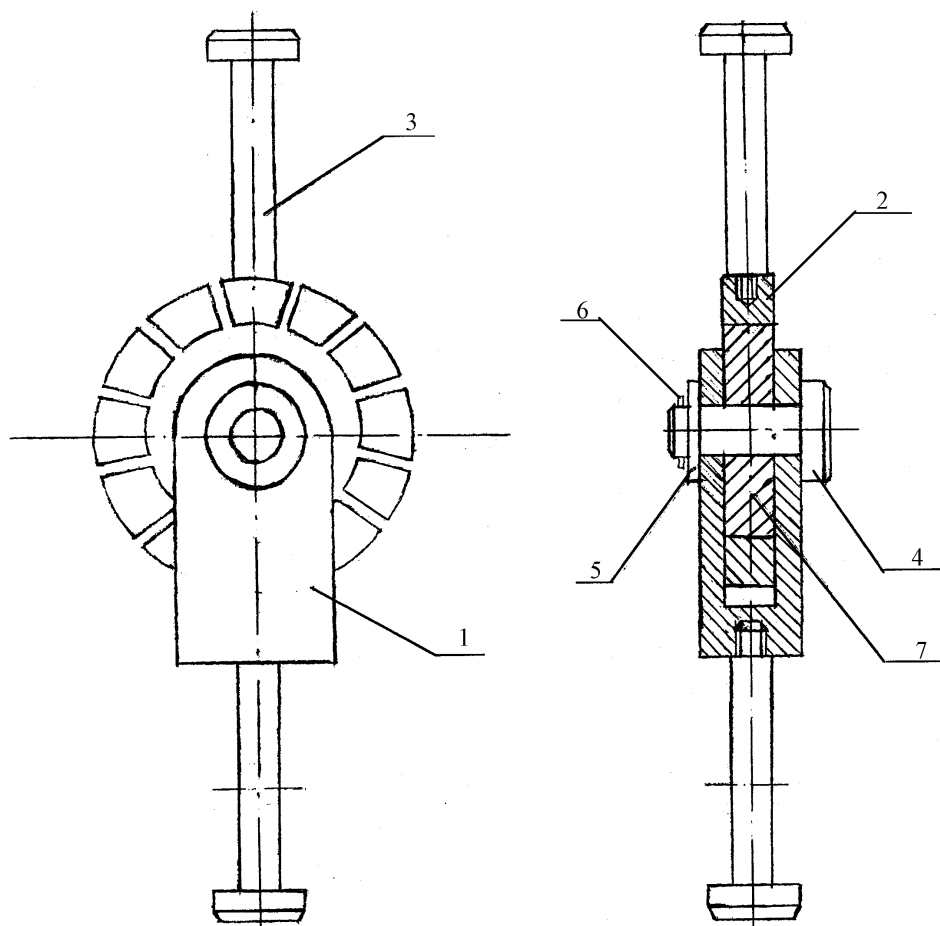


Рис. 3.10 Схема пристосування для визначення міцності зчеплення покриття з основним металом

3.4.3. Дослідження антифрикційних властивостей

Антифрикційні випробування є прямим підтвердженням функціональності КЕП як матеріалу для відновлення зношених підшипникових вузлів.

Умови випробувань: Випробування проводилися в умовах, що імітують роботу зношених вузлів, — граничного тертя. Як мастило, що імітує розріджене масло, використовувалося дизельне паливо ДЛ.

Оцінювані параметри: Основними критеріями оцінки були: тривалість припрацювання, зносостійкість (інтенсивність зношування) та критичне навантаження схоплювання. Додатково, для оцінки умов мащення, проводилася оцінка змочуваності поверхні КЕП мінеральною олією за крайовим кутом змочування за допомогою малого інструментального мікроскопа ММИ.

3.5. Результати дослідження розподілу ДФ, структури та експлуатаційних властивостей КЕП

Результати експериментальних досліджень (методики 3.1-3.4) є **кількісним підтвердженням** розробленої технології проточного осадження КЕП. Проведений аналіз доводить **практичну ефективність гідродинамічної моделі** та **суттєве підвищення функціональних характеристик** матеріалу, що переконливо засвідчено експлуатаційними випробуваннями.

3.5.1. Кількісна оцінка ефективності гідродинамічного транспорту ДФ

Експериментальні дослідження, проведені методом відбору проб (методика 3.2), дозволили встановити фактичний розподіл дисперсних часток (ДФ) у потоці та визначити оптимальні технологічні параметри:

Валідація моделі (Рис. 2.5): Експериментально отримані криві розподілу концентрації ДФ по перетині та висоті чарунки (узагальнені в Рис. 2.5) показали високу ступінь збіжності з теоретичними кривими (1', 2'). Це є прямим експериментальним доказом того, що відцентрова сила ($F_{\text{ц}}$) ефективно домінує у механізмі спрямованого транспорту ДФ до катода.

Була зафіксована незначна розбіжність експериментальних даних у верхній частині чарунки. Цей результат дозволив кількісно оцінити вплив опору потоку ЕС, спричиненого конструктивними елементами, і вніс важливе корекційне уточнення до інженерних розрахунків.

Фактор ДФ: Різний характер розподілу ДФ був безпосередньо пов'язаний з їхніми фізичними властивостями: щільність MoS_2 у 4 рази перевищує щільність фенілона, а середній розмір часток фенілона ($25 \cdot 10^{-6} \text{ м}$) у 5 разів більший, ніж MoS_2 ($5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$).

Оптимізація швидкості (Рис. 2.6): На підставі аналізу залежності вмісту ДФ у покритті від швидкості потоку (Рис. 2.6), було експериментально визначено вузький оптимальний діапазон швидкості подачі ЕС: 0,6...1,4 м/с. Це ключовий технологічний параметр для забезпечення максимальної концентрації зміцнюючої фази в покритті.

3.5.2. Кількісні зміни структури та параметрів надійності

Структурні дослідження (методика 3.3) та вимірювання механічних властивостей (методика 3.4) чітко засвідчили механізм зміцнення мідної матриці:

Дисперсійне зміцнення та Мікротвердість: Рентгеноструктурний аналіз підтвердив, що включення ДФ призводить до суттєвого зменшення розміру блоків мозаїки (D) до $2,5...3,2 \cdot 10^{-8}$ м. Це явище забезпечило підвищення мікротвердості КЕП:

для фенілону — у 1,20...1,25 рази

для дисульфиду молібдену — у 1,25...1,40 рази порівняно з чистою міддю.

Контроль внутрішніх напружень (ВН): Вимірювання ВН зафіксувало, що введення ДФ призводить до значного зниження ВН. Це досягається завдяки тому, що частки ДФ запобігають стягуванню кристалітів, що критично важливо для збереження високої адгезії та стабільності покриття без підвищення внутрішніх розтягуючих напружень першого роду .

3.5.3. Найбільш переконливі експлуатаційні результати

Експлуатаційні випробування (методика 3.4) надали прямі, кінцеві докази переваг КЕП:

Загальне зниження зносу КЕП: Знос поверхонь втулок, відновлених КЕП, знизився в середньому в 4,5 рази порівняно із серійними деталями. Зносостійкість КЕП з дисульфідом молібдену виявилася в цілому у 2,9...3,5 рази вищою, ніж електролітичної міді .

Ключовий показник — Захист сполученої деталі: Найвагомішим результатом є те, що КЕП забезпечили найкращий захист опорних шийок. Знос шийок, які працювали у парі з КЕП-втулками, був меншим:

у 2,8 рази менше, ніж у сполученні із серійними втулками.

у 2,3 рази менше, ніж у сполученні з втулками, відновленими «чистими» мідними покриттями .

Експлуатаційна Надійність: Випробування підтвердили, що тривалість припрацювання скорочується в 1,9...2,1 , а головне — не було виявлено

відшарування і шелушіння покриттів . Це демонструє високу довговічність, досягнуту завдяки низьким ВН та міцній адгезії.

Висновки до розділу

На підставі результатів експериментальних досліджень (методики 3.1-3.4) та їхнього аналізу, представленого в Розділі 3, сформульовані наступні ключові висновки:

Гідродинамічна валідація: Проведені експерименти з розподілу дисперсної фази (ДФ) підтвердили прогнози Розділу 2.5 (Рис. 2.5), встановивши високу ступінь збіжності між теоретичними та експериментальними кривими. Це стало прямим доказом домінування відцентрової сили ($F_{ц}$) як основного механізму спрямованого транспорту ДФ до катода, що є запорукою ефективного формування Композиційних Електролітичних Покриттів (КЕП).

Технологічна оптимізація: Експериментально визначено вузький оптимальний діапазон швидкості подачі ЕС: 0,6...1,4м/с (Рис. 2.6), що забезпечує максимальне включення зміцнюючої фази в покриття та є критичним інженерним рішенням для масштабування технології.

Структурне зміцнення: Встановлено, що включення ДФ призвело до дисперсійного зміцнення мідної матриці, що кількісно виражається у зменшенні розміру блоків мозаїки (D) до 2,5...3,2 10^{-8} м. Ця зміна забезпечила значне зростання мікротвердості КЕП до 1,40 рази порівняно з чистою міддю.

Контроль напружень та адгезії: Доведено, що введення ДФ ефективно знижує внутрішні розтягуючі напруження в осадженні. Цей фактор критично забезпечив високу стабільність і міцність зчеплення покриттів із підкладкою, що підтверджено відсутністю відшарування чи шелушіння КЕП під час експлуатаційних випробувань.

Видатна зносостійкість та захист сполученої деталі: Експлуатаційні випробування засвідчили радикальне покращення триботехнічних характеристик:

Загальна зносостійкість КЕП з MoS_2 підвищена до 3,5 рази порівняно з електролітичною міддю.

Ключова перевага: Знос опорних шийок (сполученої деталі) у парі з КЕП знижено у 2,8 рази порівняно із серійними деталями та у 2,3 рази порівняно з "чистими" мідними покриттями. Це підтверджує, що ДФ діють як ефективне тверде мастило.

Підтверджена експлуатаційна ефективність: Доведено, що КЕП, нанесені проточним методом, скорочують тривалість припрацювання в 1,9...2,1 рази, що підтверджує їхню високу практичну ефективність як ремонтного матеріалу для відновлення підшипникових вузлів.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці на підприємстві є комплексною системою забезпечення життя і здоров'я працівників у процесі їхньої трудової діяльності, яка включає соціально-економічні, організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні заходи. Ця система функціонує на основі фундаментальних принципів, визначених Законом України "Про охорону праці" [7], який встановлює основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на безпечні і нешкідливі умови праці. У контексті ремонтно-відновлювальних робіт, особливо тих, що пов'язані з хімічними та електричними процесами, як-от електролітичне осадження антифрикційних покриттів на бронзові підшипники, дотримання норм охорони праці набуває критичного значення та вимагає детального аналізу потенційних ризиків і застосування спеціалізованих запобіжних заходів.

4.1 Ідентифікація та класифікація небезпечних виробничих факторів при застосуванні електрохімічних процесів для нанесення антифрикційних покриттів.

Процес відновлення деталей, зокрема, бронзових підшипників, шляхом електролітичного осадження металів (проточний метод) є технологічно складним і супроводжується низкою небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які необхідно аналізувати згідно з основним законодавчим актом Закон України "Про охорону праці" [7]. Ефективна реалізація заходів безпеки забезпечує не лише захист працівника, а й успіх технології відновлення, про що свідчать праці, що описують процеси нанесення покриттів та їх властивості [1, 10, 19].

Найбільш вагомими є хімічні небезпеки, які виникають через використання агресивних електролітів (розчинів кислот, лугів, солей). Прямий контакт з цими речовинами під час підготовки розчинів, осадження чи очищення може призвести до важких хімічних опіків. Окрім цього, під час електролізу

відбувається виділення токсичних газів, парів і аерозолів, що при недостатній або неякісній вентиляції створює ризик гострих та хронічних інтоксикацій, що вимагає чіткого дотримання вимог НПАОП 01.41-1.01-01 [15].

Електричні небезпеки є невід'ємною частиною даної технології, оскільки процес електроосадження вимагає застосування джерел постійного струму (випрямлячів) [27]. Незважаючи на низьку робочу напругу, висока сила струму та наявність вологого середовища істотно підвищують ризик ураження електричним струмом. Витік струму через пошкоджену ізоляцію або відсутність належного заземлення обладнання створює пряму загрозу, що суворо регламентується "Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів" (НПАОП 40.1-1.01-97 [16] та НПАОП 40.1-1.21-98 [17]).

До фізичних небезпек належить ризик пожежі та вибуху, оскільки в процесі електролізу на електродах виділяється вибухонебезпечна суміш водню та кисню, накопичення якої в робочій зоні є критичним. Також присутні механічні ризики, пов'язані з переміщенням, фіксацією та обробкою важких деталей, а також ризик травмування під час підготовчих робіт (шліфування, зачистка, обкатування) [10]. Додатково, небезпеку створюють такі фактори, як недостатнє освітлення та несприятливі ергономічні умови, особливо при виконанні робіт безпосередньо на агрегатах (на місці) [15].

Усі працівники, задіяні в процесі електролітичного відновлення, повинні проходити обов'язкове навчання та перевірку знань з питань безпеки, про що детально зазначено у НПАОП 0.00-4.12-05 [14], оскільки лише чітке знання інструкцій та правил дозволяє мінімізувати вплив усіх вищезазначених факторів і забезпечити безпечне виконання технологічних процесів.

4.2 Організаційні та інженерні заходи щодо створення безпечного санітарно-гігієнічного середовища в робочій зоні електролітичного відновлення деталей

Ефективна організація робочого місця та виробничого процесу є основою для мінімізації впливу шкідливих факторів, виявлених у п. 4.1. Основним організаційним заходом є чітке дотримання інструкцій та проведення навчання персоналу, що регламентується Типовим положенням (НПАОП 0.00-4.12-05) [14]. Працівники, які контактують з хімічно активними електролітами [27], повинні бути забезпечені та проінструктовані щодо використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), таких як хімічно стійкі рукавиці, захисні окуляри та спецодяг, згідно з Законом України "Про охорону праці" [7].

Найбільш критичним інженерним заходом для забезпечення санітарно-гігієнічних умов є боротьба з хімічними чинниками — парами та газами, що виділяються під час електролізу. Встановлення ефективної припливно-витяжної вентиляції безпосередньо над зоною проведення електролітичного покриття є обов'язковим для відведення токсичних речовин та вибухонебезпечної суміші водню та кисню [15]. Робоча зона має бути забезпечена достатнім штучним освітленням для запобігання перенапруженню очей та травматизму, оскільки якість освітлення впливає на зорові характеристики та загальну ергономіку праці [15].

Важливим елементом організації робочого середовища є заходи електробезпеки. Усі струмопровідні частини обладнання, що використовується для електроосадження (випрямлячі, робочі столи), повинні бути надійно заземлені. Це запобігає ураженню електричним струмом при можливих витоках [16, 17]. Крім того, робоче місце повинно мати діелектричні килимки та підставки, а пролиті електроліти слід негайно нейтралізувати, щоб уникнути пошкодження ізоляції та ризику ураження струмом у вологому середовищі. Ці заходи є особливо актуальними, враховуючи, що в процесі відновлення деталей може використовуватися мобільне обладнання [10, 19].

Санітарно-побутове забезпечення включає наявність аптечок першої допомоги (особливо з нейтралізуючими розчинами для промивання очей та шкіри від електролітів), а також можливість негайної санітарної обробки. Встановлення чіткого режиму праці та відпочинку (регламентовані перерви) є організаційним заходом, спрямованим на боротьбу з психофізіологічними факторами (втомою та перенапруженням), що виникають при тривалій роботі в незручних позах або при високій концентрації уваги [14].

4.3 Моделювання виникнення аварійних та травмонебезпечних ситуацій при проточній гальваніці

Моделювання небезпечних ситуацій (додаток Б) при електролітичному відновленні (проточній гальваніці) будується за принципом каскадного зв'язку, де Нездорові Умови (НУ) спричиняють Небезпечні Дії (НД), які зрештою призводять до Небезпечних Ситуацій (НС), що завершуються травмою чи аварією. Цей підхід дозволяє системно ідентифікувати ризики та розробити запобіжні заходи згідно з основним законодавчим актом України "Про охорону праці" [7].

Ключовою Нездоровою Умовою (НУ) є неналежний стан електроустановок (пошкоджена ізоляція, несправне заземлення випрямлячів), що суперечить вимогам НПАОП 40.1-1.01-97 [16] та НПАОП 40.1-1.21-98 [17]. Цей стан провокує Небезпечну Дію (НД), коли персонал проводить роботи без попередньої перевірки обладнання (НД1), що створює ризик короткого замикання або пробією струму, утворюючи Небезпечну Ситуацію (НС) ураження електричним струмом (НС1, НС4) [16, 17].

Іншою критичною НУ є несправна або відсутня вентиляція (НУ2) в робочій зоні. Це, у поєднанні з порушенням технології приготування електроліту [27] (НУ5) та роботою в зоні накопичення газів (НД2), призводить до НС вибуху газоповітряної суміші (НС2) [15]. Наявність агресивних хімікатів та відсутність або невідповідність ЗІЗ (НУ3) і нейтралізуючих розчинів (НУ6) призводить до НД

проведення робіт без використання ЗІЗ (НД3) та, як наслідок, до НС хімічного опіку (НС3) [7, 15].

Особлива увага приділяється також організаційним ризикам. Недосконала організація робочої зони (НУ7), що включає захаращеність, неправильне зберігання інструменту чи нестійке розташування відновлюваної деталі, може спричинити Небезпечну Дію (НД5) — падіння інструменту або порушення технологічного процесу. Кульмінацією цього ланцюжка є Небезпечна Ситуація (НС5), що виражається у падінні важкої деталі або інструменту, що може призвести до травмування кінцівок працівника [15]. Мінімізація всіх цих ризиків вимагає, щоб усі працівники пройшли належне навчання [14].

Висновки до розділу

Проведена робота підтвердила, що ефективна охорона праці при впровадженні технології електролітичного відновлення вимагає комплексного підходу, регламентованого Законом України "Про охорону праці" [7] та низкою НПАОП [15, 16, 17].

Аналіз ризиків (п. 4.1, 4.3): Шляхом каскадного моделювання (проточна гальваніка) було чітко ідентифіковано основні джерела небезпеки. До них належать високі електротехнічні ризики (ураження струмом внаслідок несправності обладнання) та критичні хімічні ризики (отруєння, опіки) через виділення токсичних газів та використання агресивних електролітів [27]. Головні аварійні ситуації провокуються організаційними недоліками (НУ7) та технічною недбалістю (НУ1, НУ2), що призводить до НС вибуху або ураження струмом [16, 17].

Забезпечення безпеки (п. 4.2): З метою нейтралізації цих загроз розроблено інженерні та організаційні рішення. Основна увага приділяється посиленій витяжній вентиляції для контролю за хімічним середовищем [15] та надійному заземленню електроустановок. Ключовим організаційним заходом є обов'язкове навчання та атестація персоналу [14], а також забезпечення спеціалізованими ЗІЗ [7], що гарантує нормативну безпеку впроваджуваної технології відновлення [10, 19].

РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

5.1. Обґрунтування економічної доцільності та стратегічні переваги

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) розробленої технології проточного електроосадження Композиційних Електролітичних Покриттів (КЕП) на підшипникові вузли двигунів базується на принципі комплексної економії. Впровадження цієї технології дозволяє відмовитися від дорогої заміни деталей на користь їхнього високоякісного відновлення, підвищуючи при цьому експлуатаційні характеристики, що є ключовим завданням для підвищення ефективності агроінженерії [10], [5].

Економічна ефективність методу КЕП складається з трьох основних компонентів:

1. Зниження витрат на матеріали та ремонтні операції.
2. Збільшення міжремонтного ресурсу відновлених деталей.
3. Запобігання аварійному зносу дорогих сполучених вузлів.

5.2. Розрахунок приведених витрат та економічний ефект

Ключовим показником ТЕО є підвищення експлуатаційного ресурсу, що прямо знижує прирівняні річні витрати на обслуговування та ремонт.

5.2.1. Економія за рахунок підвищення зносостійкості КЕП

Використання КЕП значно подовжує термін служби відновленої деталі завдяки унікальній структурі композиту з твердим мастилом:

• **Ресурс відновлених втулок:** Знос поверхонь, відновлених КЕП на основі міді, знизився в середньому в **4,5 рази** порівняно із серійними деталями . Це кількісно доводить багаторазове збільшення міжремонтного циклу.

• **Вплив дисперсної фази:** Підтверджено, що саме дисперсна фаза забезпечує ключовий ефект, оскільки зносостійкість КЕП з дисульфідом молібдену у **2,9...3,5 рази** вища, ніж у електролітичній міді . Це корелює з дослідженнями щодо підвищення антифрикційних властивостей [12], [29].

5.2.2. Ефект запобігання втратам (Захист сполученої деталі)

Найбільш значуща стаття економії – це захист опорних шийок колінчастого вала, вартість ремонту або заміни якого є надзвичайно високою і може призвести до списання двигуна:

Зниження зносу шийок: Знос опорних шийок, які працювали у парі з КЕП-втулками, виявився у 2,8 рази меншим у порівнянні із серійними втулками, та у 2,3 рази меншим, ніж у парі з втулками, відновленими «чистими» мідними покриттями .

Висновок для ТЕО: Цей результат означає пряме уникнення капітального ремонту або заміни колінчастого вала, що забезпечує найбільший економічний ефект від впровадження технології.

5.3. Оптимізація експлуатаційних показників та безпека

1. Скорочення часу припрацювання: Завдяки унікальним триботехнічним властивостям КЕП, тривалість припрацювання відновлених вузлів скорочується в 1,9...2,1 рази. Це мінімізує час простою техніки та забезпечує її швидке повернення до продуктивної роботи, що є критично важливим для сезонних робіт.

2. Підвищення надійності: Експериментальна відсутність випадків відшарування та шелушіння покриттів підтверджує високу якість адгезії та мінімізує ризик аварійних відмов у польових умовах.

3. Вимоги охорони праці (ОП): Технологічний процес відновлення КЕП має бути впроваджений з обов'язковим дотриманням чинного законодавства, зокрема Закону України "[Про охорону праці](#)" [7] та "Правил охорони праці під час технічного обслуговування та ремонту машин і обладнання сільськогосподарського виробництва" [15]. Це забезпечує безпеку виробничого процесу.

5.4. Техніко-економічний висновок

Технологія проточного нанесення КЕП демонструє високий рівень економічної ефективності. Комплексний економічний ефект від зниження зносу втулок (у 4,5 рази) та захисту колінчастого вала (зниження зносу у 2,8 рази) робить цю технологію значно вигіднішою, ніж традиційна заміна деталей або відновлення чистими металевими покриттями. Технологія рекомендована до впровадження у ремонтних підрозділах агропідприємств.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За результатами виконаної науково-дослідної роботи з розробки та обґрунтування технології відновлення підшипникових вузлів сільськогосподарської техніки методом проточного осадження Композиційних Електролітичних Покриттів (КЕП) сформульовані наступні висновки, що мають наукову та практичну новизну:

1. Науково обґрунтована та підтверджена гідродинамічна модель. Шляхом теоретичного моделювання та експериментальної валідації (Рис. 2.5) доведено, що відцентрова сила ($F_{ц}$) є домінуючою рушійною силою, яка забезпечує спрямовану міграцію дисперсної фази (ДФ) до катода. Це є принциповим інженерним рішенням, яке гарантує ефективне насичення мідної матриці зміцнюючими частками, що критично важливо для формування якісних антифрикційних КЕП.

2. Встановлено оптимальний технологічний режим. На основі аналізу залежності складу покриття від швидкості потоку ЕС (Рис. 2.6) експериментально визначено вузький оптимальний діапазон швидкості подачі ЕС: 0,6...1,4 м/с. Цей параметр є ключовим технологічним показником, що забезпечує максимальне включення ДФ та продуктивність процесу осадження.

3. Кількісно доведено дисперсійне зміцнення матриці. Встановлено, що включення ДФ призводить до інтенсивного подрібнення структури мідної матриці, а саме до зменшення розміру блоків мозаїки (D) до $2,5...3,2 \cdot 10^{-8}$ м. Ця структурна зміна забезпечує зростання мікротвердості КЕП до $1,40 \cdot 10^3$ рази порівняно з чистою міддю \ та є основною причиною підвищення міцності.

4. Забезпечено високу надійність шляхом контролю напружень. Доведено, що введення ДФ ефективно знижує рівень внутрішніх розтягуючих напружень в осадженні. Ця властивість гарантувала високу адгезію покриттів, що підтверджено відсутністю відшарування і шелушіння КЕП протягом всього періоду експлуатаційних випробувань .

5. Підтверджено видатну експлуатаційну ефективність:

- Зносостійкість: Загальна зносостійкість КЕП з дисульфідом молібдену зросла у 2,9...3,5 рази порівняно з електролітичною міддю, а знос втулок знизився у 4,5 рази порівняно із серійними деталями.

- Захист вузла: Найбільш значущий результат – критичне зниження зносу опорних шийок (сполученої деталі) у парі з КЕП-втулками у 2,8 рази порівняно із серійними деталями. Це прямо підтверджує, що ДФ працюють як ефективне тверде мастило, мінімізуючи знос контртіла.

- Швидкість введення в експлуатацію: Тривалість припрацювання відновлених вузлів скорочується в 1,9...2,1 рази, що свідчить про високу технологічну готовність покриття.

6. Обґрунтовано високу економічну доцільність. Техніко-економічне обґрунтування підтвердило, що впровадження технології проточного нанесення КЕП є значно вигіднішим за традиційну заміну деталей, оскільки забезпечує системний економічний ефект від багаторазового збільшення ресурсу деталі та, найважливіше, від запобігання дорогому ремонту або заміні ключових сполучених вузлів.

У підсумку, розроблена технологія є науково обґрунтованою та має високу практичну цінність, рекомендується до впровадження у практику ремонту підшипникових вузлів сільськогосподарської техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антоненко, Д. М. Виробництво по виготовленню підшипників ковзання для роботи в умовах сухого тертя : дипломний проект ... бакалавра : 132 Матеріалознавство / Д. М. Антоненко. – Київ, 2023. – 97 с. URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57654> (дата звернення: 08.11.2025).
2. Бронзи олов'яні. Метод рентгенофлуоресцентного аналізу: ДСТУ 3731-98 (ГОСТ 30608) : державний стандарт України : введено вперше : чинний від 2000-01-01.
3. Герасимчук, В. В. Виробництво підшипників ковзання для пристроїв з імпульсним навантаженням : дипломний проект ... бакалавра : 132 Матеріалознавство / В. В. Герасимчук. – Київ, 2021. – 95 с. URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52700> (дата звернення: 08.11.2025).
4. Данюк, Д. С. Розробка зміцнюючої технології і пристрою для обкатування циліндричних сталевих валів підшипникових вузлів автомобіля її : дипломна робота бакалавра : 132 Матеріалознавство / Д. С. Данюк ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2024. – 67 с. URI: <https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/16328> (дата звернення: 08.11.2025).
5. Дяволук, В. В. Відновлення підшипників ковзання із кольорових сплавів комбінованим методом : магістр: 208 «Агроінженерія». – Кам'янець-Подільський, 2024. – 89 с. URI: <http://188.190.33.55:7980/jspui/handle/123456789/14184> (дата звернення: 08.11.2025).
6. Єремейчук, М. В., Крюкова, О. А. Порівняльний аналіз сучасних електролітів міднення. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/17008/1/td_2020_N4_13.pdf (дата звернення: 08.11.2025).
7. Закон України "Про охорону праці". URL: <https://cn.court.gov.ua/tu25/7/303> (дата звернення: 08.11.2025).

8. Іванов, Д. С. Виробництво деталей антифрикційного призначення для роботи в умовах сухого тертя : дипломний проєкт ... бакалавра : 132 Матеріалознавство / Д. С. Іванов. - Київ, 2024. - 97 с. URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67803> (дата звернення: 08.11.2025).
9. КЕЛЕМЕШ, А., БУРЛАКА, О., ЛЯШЕНКО, С., & ЛАВРЕНКО, В. Дослідження впливу пластичного деформування на зносостійкість бронзових втулок в автомобільних двигунах. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 4 (91). С. 42–51.
10. Ковальов, Р. В. Розробка технології відновлення та вибір матеріалу при нанесенні антифрикційних покриттів поверхонь тертя на базі ПП «Ковальов Авто» с. Соколівське Кропивницького району Кіровоградської області : кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 132 «Матеріалознавство» / наук. кер. І. В. Шепеленко ; Центральнoукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. – 63 с. URI: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/14714> (дата звернення: 08.11.2025).
11. Кулешков, Ю., Пешехонов, А., & Бригінець, В. Аналіз існуючих способів відновлення втулок шестеренних насосів типу НШ. *НАУКА–ВИРОБНИЦТВО*. 2020. № 30. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/78e9451b-c97c-4f8a-946e-0ef4acbc817f/content#page=30> (дата звернення: 08.11.2025).
12. Ларцев, С. Д. Підвищення антифрикційних властивостей втулок шатуна ДВЗ : дипломна робота магістра : 132 Матеріалознавство / С. Д. Ларцев. – Харків : ХНАДУ, 2021. – 83 с.
13. Молдован, Б. А. Дослідження припрацювальних покриттів на сталевих поверхнях, отриманих методом електроіскрового легування : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 132 - матеріалознавство / наук. кер. О. П. Гапонова. – Суми : Сумський державний університет, 2023. – 77 с. URI: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/94372> (дата звернення: 08.11.2025).

14. НПАОП 0.00-4.12-05 "Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05#Text> (дата звернення: 08.11.2025).
15. НПАОП 01.41-1.01-01 "Правила охорони праці під час технічного обслуговування та ремонту машин і обладнання сільськогосподарського виробництва". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0143811-14#Text> (дата звернення: 08.11.2025).
16. НПАОП 40.1-1.01-97 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text> (дата звернення: 08.11.2025).
17. НПАОП 40.1-1.21-98 ПРАВИЛА БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК СПОЖИВАЧІВ. URL: <https://antifire.ua/dbn/10.pdf> (дата звернення: 08.11.2025).
18. Патик, В. Ю. Дослідження процесу відновлення та зміцнення деталей залізоборидним покриттям з наступним ціануванням : магістр з галузевого машинобудування / В. Ю. Патик. – Харків, ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2020. – 68 с.
19. Сергієв, А. А. Відновлення автотракторних деталей шляхом електроосадження заліза легованим кобальтом : дипломна робота магістра : 132 Матеріалознавство / А. А. Сергієв ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2022. – 96 с. URI: <https://elar.khmnmu.edu.ua/handle/123456789/12861> (дата звернення: 08.11.2025).
20. Chen, Y., Mu, T. Application of deep eutectic solvents in battery and electrocatalysis (review). *Huagong Xuebao/CIESC J.* 2020. Vol. 71. No. 1. P. 106–121.
21. Chen, Z., Wei, W., Ni, B. J. Cost-effective catalysts for renewable hydrogen production via electrochemical water splitting: recent advances. *Curr. Opin. Green Sustainable Chem.* 2021. Vol. 27. Article No. 100398.
22. C. Kowandy, C., Richard, Y. M. Chen. Characterization of wear particles for comprehension of wear mechanisms: Case of PTFE against cast iron. *Wear.* 2008.

- Vol. 265, Issues 11–12. P. 1714–1719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.036> (дата звернення: 08.11.2025).
23. Fahimi, N.; Abachi, P. The Role of Powder Preparation Route on Physical and Mechanical Properties of Cu-rGO Bulk Nano composites. *Mater. Tod. Commun.* 2021. Vol. 28. Article No. 102470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102470> (дата звернення: 08.11.2025).
24. Garg, S., Li, M., Rufford, T. E., Ge, L., Rudolph, V., Knibbe, R., Konarova, M., Wang, G. G. X. Catalyst–electrolyte interactions in aqueous reline solutions for highly selective electrochemical CO₂ reduction. *ChemSusChem*. 2020. Vol. 13. Article No. 304.
25. Güngör, K., & Demirer, A. Investigation of Dry Sliding Friction Wear Behavior of CuSn11 Bronze Plain Bearing Applying Impregnated Graphite-Filled PTFE. *Tribology Transactions*. 2022. Vol. 65. No. 5. P. 880–891. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2022.2099496> (дата звернення: 08.11.2025).
26. Nazeer, F, Wu, H, Malik, A, Meng, X, Li, C, Long, J. Mechanical Properties of Cu-GO Composite by Varying GO Mesh Sizes. *Metals*. 2022. Vol. 12. No. 4. Article No. 601. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12040601> (дата звернення: 08.11.2025).
27. Protsenko V.S., Danilov F.I. Current trends in electrodeposition of electrocatalytic coatings. *Methods for electrocatalysis*. – Cham: Springer, 2020. – P.263-299.
29. Yin, J., Yan, H., Cai, M., Song, S., Fan, X., Zhu, M. Bonded Flake MoS₂ Solid Lubricant Coating: An Effective Protection against Fretting Wear. *J. Ind. Eng. Chem.* 2023. Vol. 117. P. 450–460.

ДОДАТКИ