

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**«Оптимізація процесу електролітичного хромування
поверхонь сегментів різучих апаратів
сільськогосподарських машин»**

Рівень вищої освіти другий магістерський
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 132 Матеріалознавство
Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр КвРМТВА. 24344.01.12.00

Виконав студент 2 курсу група МТВАм-24-1


Підпис

Богдан КОВАЛЕЦЬ

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ


Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ

5. 12. 2025

Дата


Підпис


Олександр ДИХА

Хмельницький, 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти другий магістерський
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 132 Матеріалознавство
Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


Диха О.В.
10.10 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ковальцю Богдану Михайловичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Оптимізація процесу електролітичного хромування поверхонь сегментів різучих апаратів сільськогосподарських машин.*
керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

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

Затверджено наказом університету від 25.08.2025 р. № 65 (Д 27)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.12.2025 р.

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

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

1) *Вимоги та специфіка роботи різучих елементів збиральної сільськогосподарської техніки.*

2) *Технологічні аспекти хромування поверхневого шару виробів.*

3) *Методика експериментальних досліджень.*

4) *Результати досліджень покриттів.*

4) *Висновки, рекомендації.*

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 10 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Вимоги та специфіка роботи ріжучих елементів збиральної сільськогосподарської техніки</i>	30.10.25	вик
2	<i>Технологічні аспекти хромовання поверхневого шару виробів</i>	18.11.25	вик
3	<i>Методика експериментальних досліджень</i>	30.11.25	вик
4	<i>Результати досліджень покриттів</i>	8.12.25	вик
5	<i>Висновки, рекомендації</i>	11.12.25	вик
6	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	20.12.25	вик
7	<i>Захист дипломної роботи</i>	22.12.25	

Студент


Підпис

Богдан КОВАЛЕЦЬ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-24-1 Ковалець Богдан Михайлович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Оптимізація процесу електролітичного хромування поверхонь сегментів ріжучих апаратів сільськогосподарських машин» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 22 найменування, розміщених на 3 сторінках, та 2 додатків розміщених на 18 сторінках. Роботу викладено на 88 сторінках, з них 80 сторінок основного тексту, на яких розміщено 28 рисунків і 8 таблиць.

Мета роботи полягає у підвищенні зносостійкості робочих органів ріжучих апаратів шляхом електролітичного хромування їхніх поверхонь з урахуванням оптимізації параметрів процесу: щільності струму, температури електроліту та товщини покриття.

Встановлено, що вирішальним фактором, який визначає зносостійкість хромованих ножів і сегментів, є товщина хромового шару. Параметри щільності струму та температури електроліту чинять приблизно однаковий вплив на інтенсивність зношування ножів, тоді як для сегментів більш суттєвим виявляється саме вплив щільності струму. Загальна тенденція дії цих трьох параметрів для обох типів деталей є подібною: зі збільшенням товщини покриття, щільності струму та температури електроліту швидкість зносу зменшується, що забезпечує зростання зносостійкості.

Результати експериментів свідчать про таке:

- покриття, сформовані за оптимальних технологічних режимів, характеризуються дрібнозернистою та рівномірною структурою з мінімальною кількістю пор і тріщин, що сприяє підвищенню їх корозійної та зносостійкої здатності;

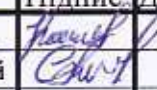
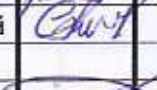


- внутрішні напруження та мікротвердість шару не є визначальними чинниками, адже навіть покриття з найменшими напруженнями чи максимальною твердістю не завжди демонструють найкращі результати щодо стійкості до зношування;

- ножі та сегменти, хромовані в оптимальних умовах, мають зносостійкість, що перевищує аналогічні показники необроблених деталей у середньому в 1,78 разів для сегментів та в 1,95 разів для ножів.

Ключові слова: РІЖУЧІ АПАРАТИ; ХРОМУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНЕ; ТОВЩИНА ПОКРИТТЯ; ЩІЛЬНІСТЬ СТРУМУ; ТЕМПЕРАТУРА ЕЛЕКТРОЛІТУ; ЗНОСОСТІЙКІСТЬ; МІКРОТВЕРДІСТЬ; КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ВИМОГИ ТА СПЕЦИФІКА РОБОТИ РІЖУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗБИРАЛЬНОЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ	7
1.1 Характер зношування робочих органів	7
1.2 Класифікація ріжучих механізмів.	10
1.3 Аналіз методів подовження ресурсу ріжучих елементів збиральної техніки.	16
1.4 Аналіз методів підвищення зносостійкості поверхонь тертя.	27
2 ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ХРОМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ВИРОБІВ	39
2.1 Електролітичне хромування як ефективний спосіб зміцнення поверхні деталей.	39
2.2 Вплив параметрів електролітичного хромування на якість і характеристики покриття.	43
2.3 Теоретична оцінка швидкості зношування хромованих лез ріжучих елементів.	47
2.4 Теоретична оцінка впливу режимів електролітичного хромування на властивості покриттів.	51
3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	55
3.1 Програма дослідження процесу електролітичного хромування.	51
3.2 Методика проведення металографічного аналізу хромового покриття.	57
3.3 Методика визначення внутрішніх напружень у хромовому покритті.	61

КвРМТВА. 24344.01.12.00				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис.	Дата
Виконав		Ковалець		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Оптимізація процесу електролітичного хромування поверхонь сегментів ріжучих апаратів сільськогосподарських машин				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		4	88	
ХНУ МТВАм-24-1				

3.4	Методика оцінювання корозійної стійкості хромових покриттів.	63
3.5	Методика дослідження зносостійкості.	65
4.	РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКРИТТІВ	67
4.1	Результати аналізу металографічного	67
4.2	Результати досліджень залишкових напружень у хромовому покритті.	71
4.3	Результати випробувань хромового покриття на корозійну стійкість.	73
4.4	Результати випробувань на зносостійкість.	76
4.5	Порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних показників.	78
	ВИСНОВКИ	83
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85
	ДОДАТКИ	88

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Ріжучі крайки робочих органів у збиральній сільськогосподарській техніці, зміцнені методом СВЧ-загартовування, мають досить обмежений термін служби. Це призводить до порушення агротехнічних вимог, зростання втрат врожаю під час збирання та значних витрат на проведення робіт. Крім того, необхідність частих замін або заточування зношених деталей спричиняє додаткові витрати, знижує продуктивність праці і викликає простої техніки через ремонт.

З урахуванням того, що середній ресурс сегментів для збиральної техніки становить не більше 3,5 га на одну деталь, щорічна потреба у цих елементах, виготовлених з інструментальної сталі, може сягати 140 тисяч штук. Схожа ситуація спостерігається і з елементами, що працюють у машинах для заготівлі кормів. При цьому комплектуючі, які швидко зношуються і досягають граничного зносу, зазвичай утилізуються як металобрухт. Зважаючи на це, нагальною є потреба у проведенні наукових досліджень та конструкторських розробок, спрямованих на збільшення довговічності таких деталей.

Проблемами підвищення надійності збиральної техніки та продовження строку служби ріжучих елементів її робочих вузлів займалося чимало дослідників. У результаті проведених досліджень було встановлено, що найбільш поширеними є технологічні способи підвищення зносостійкості, які зосереджені на зміцненні поверхні деталей без зміни їх конструкційних особливостей або основного матеріалу.

Одним із ефективних технологічних способів підвищення зносостійкості поверхонь, що контактують, є електролітичне хромування. Наукові дослідження свідчать, що до основних переваг цього методу зміцнення відносяться висока твердість покриття, надійне зчеплення з базовим матеріалом, стійкість до хімічного впливу та низький коефіцієнт

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тертя [1]. Характеристики зносостійкості хромованих шарів значно залежать від параметрів їх нанесення, що дозволяє адаптувати технологію до різних умов експлуатації. Окрім режимів осадження, на якість покриття також суттєво впливають етапи підготовки основи та специфіка подальшого використання деталей.

У зв'язку з викликами, пов'язаними зі зносом ріжучих елементів збиральної техніки, що піддаються електролітичному хромуванню, виникає потреба у вивченні закономірностей цього процесу. Це дозволить визначити оптимальні умови та універсальні підходи до створення покриттів з максимальною зносостійкістю.

Мета дослідження полягає у підвищенні зносостійкості робочих органів ріжучих апаратів шляхом електролітичного хромування їхніх поверхонь з урахуванням оптимізації параметрів процесу: щільності струму, температури електроліту та товщини покриття.

Основні завдання роботи:

1. Проаналізувати умови експлуатації ріжучих апаратів сільськогосподарських машин.
2. Виконати теоретичні розрахунки впливу режимів електролітичного хромування на властивості покриттів та визначити швидкість зношування як стандартних, так і хромованих лез.
3. Експериментально встановити залежність зносостійкості хромового шару від температури електроліту, щільності струму та товщини покриття.
4. Провести лабораторні дослідження впливу умов хромування на твердість, мікроструктуру, корозійну стійкість та опір зношуванню покриттів.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ВИМОГИ ТА СПЕЦИФІКА РОБОТИ РІЖУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗБИРАЛЬНОЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

1.1 Характер зношування робочих органів.

Основними чинниками, що призводять до втрати ефективності та скорочення експлуатаційного ресурсу ріжучих частин збиральної техніки, є механічне стирання, руйнування або кришення сегментів і контрножів. Додатково до цього, значну загрозу становлять раптові поломки, які виникають у результаті потрапляння твердих сторонніх об'єктів у зону дії ріжучого механізму. Швидкість зношування таких елементів значною мірою визначається видом рослинності та вмістом абразивних домішок, що вступають у контакт із ріжучими кромками.

Зношування верхньої ріжучої поверхні розглянутих компонентів здебільшого відбувається внаслідок тертя об зрізані частини рослин та через взаємодію з твердими включеннями ґрунту. При цьому нижня ріжуча кромка зазнає значно більшого механічного впливу, оскільки безпосередньо контактує зі стернею й частинками ґрунту. Для сегментів додаткове тертя виникає також внаслідок дотику до краю протиріжучої пластини. Унаслідок цього стирання нижньої частини відбувається швидше, що призводить до порушення первинної форми ріжучої кромки та погіршення її ефективності.

Найбільш значне стирання сегментів і ножів спостерігається в їх передній (носовій) зоні. Для сегментів це зумовлено тим, що саме через носову частину проходить найбільший обсяг стебел під час роботи, що веде до збільшеного тертя на цій ділянці. Крім того, під час різання саме на передню частину сегмента припадає основне навантаження, тоді як зона біля основи зазнає меншого тиску. Різна інтенсивність зношування уздовж довжини ріжучої кромки ілюструється на рисунку 1.1.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Величини зносу крайок сегментів в плані.

Підвищений рівень зносу у передній частині леза ротаційних косарок зумовлений тим, що ця зона має найбільшу окружну швидкість, оскільки розташована на найбільшій відстані від центру обертання. Зміна геометрії ріжучої кромки, яка виражається в її затупленні, виникає через процеси стирання, округлення, відколювання або деформації, що залежать від надмірної або недостатньої твердості робочої поверхні.

Таким чином, підвищення твердості матеріалу ріжучих частин вище певного рівня не завжди сприяє покращенню їх зносостійкості. Згідно з джерелом [2], при перевищенні твердості понад HRC 55 спостерігається тенденція до зниження зносостійкості через ламкість та ймовірність відколів на кромках. Враховуючи наявні дані про процеси зносу ріжучих компонентів, можна зробити висновок, що збільшення їх експлуатаційного ресурсу можливе шляхом нанесення твердих захисних шарів, які не призводять до надмірної крихкості основного матеріалу. Такі покриття повинні зменшувати швидкість затуплення ріжучої частини у поперечному напрямку та водночас підвищувати опірність до корозії, що особливо актуально для деталей, які зберігаються тривалий час.

									Арк.
									9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КвРМТВА. 24344.01.12.00				

1.2 Класифікація ріжучих механізмів.

Ріжучі механізми, які використовуються в конструкції збиральної техніки, поділяються на два основні типи – сегментні та ротаційні. Така класифікація базується на відмінностях у будові та принципі функціонування. Для ротаційних робочих органів характерний коефіцієнт ковзання в діапазоні від 5 до 30, тоді як у сегментних він, як правило, не перевищує значення 2. У випадках, коли робочі елементи функціонують при низьких значеннях цього коефіцієнта, сила зрізу має менший вплив порівняно з тим, коли коефіцієнт ковзання високий. Інакше кажучи, ротаційні ножі діють переважно за принципом рубання завдяки підвищеному тиску, тоді як інші – більше ріжуть. Саме через це процес зрізу ротаційними механізмами є складнішим з технічної точки зору. Тому особливості зрізування рослинного матеріалу варіюються в залежності від типу ріжучого пристрою [3].

Серед зрізуючих механізмів, які використовуються у збиральній техніці, найбільше поширення отримали сегментні системи. Їх конструкція передбачає використання сегментів, які закріплюються на спеціальній опорній пластині. Такі механізми належать до типу підпірного зрізу, оскільки в процесі роботи одночасно задіяні як ріжучі, так і протиріжучі елементи. Робоча швидкість таких пристроїв зазвичай знаходиться в межах 1...3 м/с. У залежності від особливостей будови протиріжучої частини ці системи поділяються на сегментно-пальцеві та сегментні конструкції без пальців (див. рис. 1.2, а, б).

Під час зрізання стебло спирається на конструктивні елементи збирального пристрою. У випадку сегментно-пальцевих ріжучих механізмів (рис. 1.2, а), процес зрізання здійснюється за участю пари елементів: сегмента (2) та протиріжучої пластини ножа (1). Сегмент спрямовує стебло до протиріжучої пластини, при цьому відбувається його затискання в зазорі

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

між цими частинами, що й забезпечує зріз. У момент різання стебло підтримується одночасно протиріжучою пластиною та піроподібним виступом пальця, утворюючи двоточкову опору. Така конструкція сприяє зниженню ймовірності згину стебла, що особливо важливо для м'яких і тонких рослин з низькою жорсткістю [3].

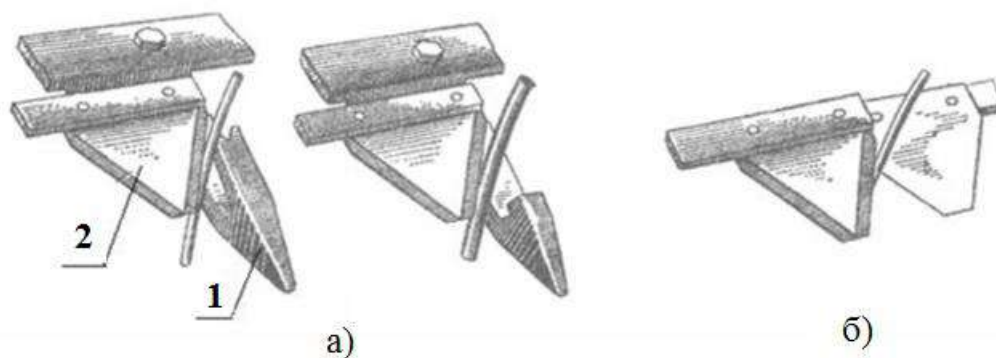


Рисунок 1.2 – Типи сегментних пристроїв.

Під час збирання рослин із товстим стеблом, таких як соняшник, кукурудза, коноплі чи очерет, наявність подвійної опори в зоні зрізання може негативно впливати на процес. Це спричиняє сильніше защемлення стебла, що призводить до зростання навантаження на сегмент і палець. У результаті підвищується ризик послаблення з'єднань, що нерідко закінчується поломкою робочих елементів. Саме тому в конструкціях, призначених для зрізання таких культур, доцільно використовувати пальці без виступів. Варто зазначити, що сегментно-пальцеві ріжучі механізми мають низьке енергоспоживання завдяки роботі на невеликих швидкостях, що робить їх популярними у жатках і косарках.

Сегментно-пальцеві зрізаючі пристрої: ключові параметри

На рисунку 1.3 відображено основні геометричні та кінематичні характеристики сегментно-пальцевих пристроїв:

Крок ріжучої частини (t) – відстань між осями сегментів.

Крок протиріжучої частини (t_0) – відстань між осями пальців.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Хід ножа (s) – амплітуда переміщення ножа між крайніми положеннями.

Нормальне різання: одинарний хід ножа (рис. 1.3 а) при співвідношенні $(s)=(t)=t(0)$ становить 76,2 або 90 мм. Значення 76,2 мм застосовується для косарок і жаток, що працюють із травами, зерновими та технічними культурами. Крок 90 мм використовується при обробці культур з товстим стеблом (кукурудза, соняшник).

Нормальне різання: подвійний хід ножа (рис. 1.3 б). Крокові значення К: 152,4 або 101,6 мм. 152,4 мм підходить для косарок та жаток. 101,6 мм застосовується в косарках, призначених для трав степових ділянок.

Низьке різання (рис. 1.3 в). Значення К: 76,2 або 101,6 мм. Для косарок, зазвичай 76,2 мм. В комбайнах – застосовують $K=101,6$ мм.

Середнє різання (рис. 1.3 г). Крок К: 76,2 або 101,6 мм при коефіцієнті $1,2 < C < 1,4$.

Конструкції з такими розмірами використовуються переважно в невеликих та іноземних косарках.

Основним недоліком таких пристроїв є відносно низька швидкість зрізу, що зумовлено зворотно-поступальним рухом ножа. Це спричиняє появу змінно спрямованих інерційних навантажень, які ускладнюють збільшення робочих швидкостей косарок та жаток. Крім того, деталі ріжучого апарату працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування, що також вимагає особливої уваги до їх експлуатації й технічного обслуговування [3].

У безпальцевому сегментному зрізаючому механізмі (див. рис. 1.2, б) ріжуча дія виконується парою сегментів, які зістригали рослину при опорі в єдиній точці. Така конструкція забезпечує кращу прохідність при збиранні полеглих або заплутаних рослин, оскільки менше схильна до забивання. Проте через деформації носиків сегментів під час експлуатації також може виникати засмічення механізму. Недоліком є й складність заміни

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

пошкодженого сегмента. Відомі як однокомпонентні, так і двокомпонентні (двоножові) системи. В останніх обидва ножі здійснюють взаємно зустрічні (аппозитивні) рухи, що позитивно впливає на балансування машини загалом. У таких системах хід кожного ножа вдвічі менший, ніж у конструкціях з одним рухомим ножем, що дозволяє знизити інерційні навантаження.

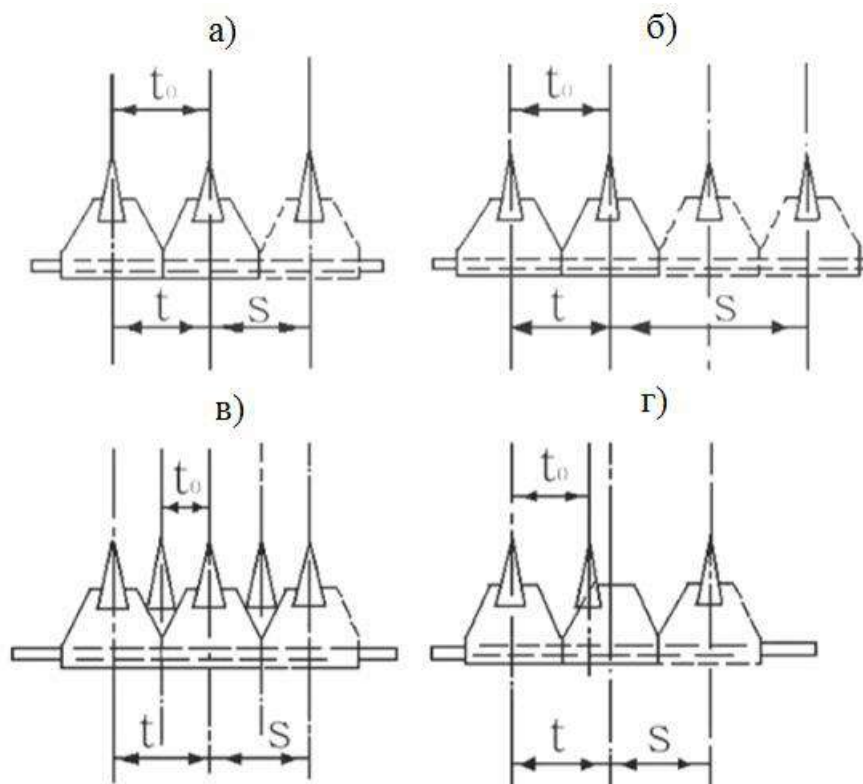


Рисунок 1.3 – Основні конструктивні варіанти сегментно-пальцевих механізмів:

а – нормальне різання з одинарним ходом ножа; б – нормальне різання з подвійним ходом ножа; в – низьке різання; г – середнє різання.

Головним недоліком сегментних пристроїв без пальців є їхня схильність до забивання при збиранні переплутаних або полеглих рослин, а також складна конструкція механізму приводу ножів.

Ріжучі ротаційні пристрої застосовуються для скошування як звичайних трав, так і культур з жорсткими або товстими стеблами – наприклад, кукурудзи, соняшника чи очерету. Ці механізми поділяють на три основні типи: дискові, комбіновані та барабанні (рис. 1.4). Дискові системи

									Арк.
									13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

(рис. 1.4, а) можуть мати як один, так і два диски. У першому випадку процес зрізання відбувається за участі одного обертового диска та протиризальної пластини, у другому – двох дисків, які обертаються назустріч один одному.

Диски мають заточку по всьому периметру ріжучої кромки. У процесі обертання та одночасного руху машини вперед, стебла, що потрапляють у зону дії, зрізаються. Цей тип обладнання забезпечує високоякісний зріз завдяки великим швидкостям різання. Однак у випадку затуплення або пошкодження ріжучої частини виникає потреба у повній заміні диска.

Привідна конструкція цього типу механізму не дозволяє здійснювати зріз стебел на малій висоті. Комбіновані ріжучі пристрої (рис. 1.4, б) є обертовими дисками з прикріпленими до них ножовими елементами – прямокутними пластинами або сегментами з гострими краями. За необхідності окремі елементи можна замінювати. Популярністю користуються конструкції з шарнірним кріпленням пластин, які під час роботи самостійно займають оптимальне положення для ефективного зрізу, що знижує енерговитрати. Крім того, після зношення ріжучої кромки пластину можна перевернути і використовувати з іншого боку.

Барабанні ріжучі механізми (рис. 1.4, в) мають у своєму складі обертовий барабан із шарнірно закріпленими ножами, що працюють у вертикальній площині. При русі агрегату щит (2) нахиляє стебла вперед, а ножі на барабані (6), обертаючись зі швидкістю 40...60 м/с, завдають удару по стеблах. У результаті ці дії обрізують рослини, які потім через щілину між нерухомим ножем (1) і обертовими ножами (3) направляються вгору. Для запобігання забиванню зазор витримується не менше 12 мм. У процесі переміщення стебла піддаються додатковому подрібненню та транспортуються трубою (4) до завантажувального пристрою. Такі машини ефективно скошують як ніжні трави, так і культури з грубими стеблами – наприклад, соняшник або кукурудзу.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Роторно-ламаючий тип ріжучого механізму використовується для прибирання культур з товстими стеблами, які мають виражені вузли та міжвузля. Відокремлення стебла від кореня здійснюється не традиційним різанням, а шляхом механічного перелому в області вузла. Основним робочим елементом таких апаратів виступають пальці, змонтовані на обертовому роторі, розташованому під нахилом. У процесі руху агрегату по полю пальці обертаються та наносять удари по прикореневій зоні стебел, викликаючи їхнє переламування поблизу нижніх вузлів. Завдяки цьому досягається досить рівна та чиста лінія зрізу, а витрати енергії на здійснення процесу залишаються мінімальними [4].

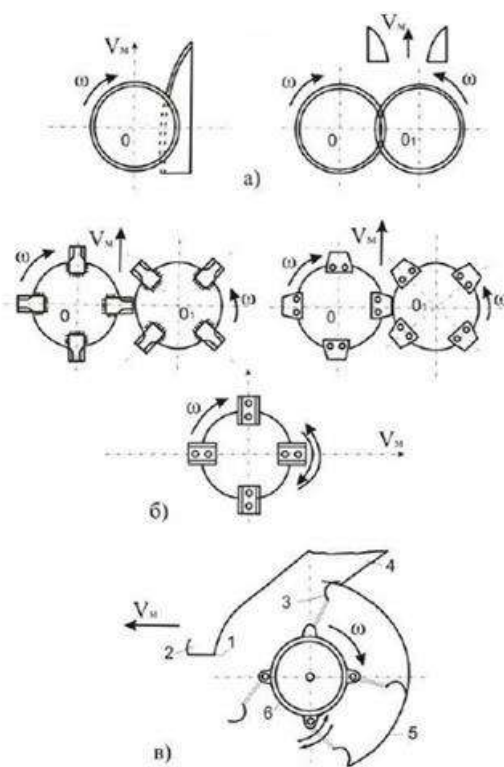


Рисунок 1.4 – Види ротаційних пристроїв для різання.

До основних недоліків ротаційних ріжучих механізмів відносять недотримання агротехнічних норм, що призводить до збільшення втрат врожаю під час збирання. Крім того, експлуатація таких пристроїв супроводжується підвищеним споживанням енергії через інтенсивний знос ріжучих елементів та зміну їхньої початкової геометрії. Великі габарити

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

ріжучих органів також ускладнюють їх обслуговування. Внаслідок цього, заміна чи заточування зношених деталей потребує значних витрат, що знижує ефективність праці і викликає вимушені простої машин на ремонт.

1.3 Аналіз методів подовження ресурсу ріжучих елементів збиральної техніки.

Існуючі підходи до збільшення терміну служби ріжучих органів збиральних машин базуються на підвищенні зносостійкості їхніх поверхонь та вдосконаленні конструкції.

Безупинна та тривала робота техніки в значній мірі залежить від довговічності ріжучих компонентів, які зазнають інтенсивного абразивного зносу при контакті зі стеблами, ґрунтом, протиріжучими пластинами тощо.

Враховуючи ці проблеми та виявлені недоліки в конструкції, інженери й науковці активно працюють над вдосконаленням методів збільшення ресурсу ріжучих частин. Основна мета — розробити технології, які продовжують нормальний термін експлуатації ріжучих органів, що сприятиме підвищенню надійності та ефективності роботи збиральної техніки.

У дослідженні [6] описано технологію підвищення зносостійкості ріжучих елементів збиральної техніки. Зносостійке покриття наноситься методом електроіскрової обробки із використанням електродів, виготовлених із нанокристалічних або аморфних сплавів.

Нанесення виконується в два етапи — спочатку в «м'якому» режимі, а потім у «грубому». Ширина електроду, що залишає слід, коливається в діапазоні від 1,5 до 2,0 мм. За результатами металографічного аналізу та експлуатаційних випробувань нанесення шару товщиною 20–25 мкм з такої обробки дозволяє приблизно вдвічі підвищити зносостійкість протиріжучих елементів. Автор дослідження [6] також зазначає, що при цьому не

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

встановлено суттєвих відмінностей у швидкості зносу між вітчизняними та імпортними протиріжучими пластинами.

Оптимізований ріжучий апарат косарки складається з ріжучої пари – сегмента та протиріжучої пластини, яку доповнено інноваційним дизайном. Для підвищення зносостійкості пластини мають відгин лез, нижня грань якого паралельна основі. На бічні грані цих лез нанесено зміцнений шар (див. рис. 1.5). Така конструкція дозволяє апарату працювати, поки сегмент і пластина не зношуються до критичної межі: через відгин лез зі зміцненими гранями контакт між ріжучими і контр-пластинами зменшується, що знижує інтенсивність тертя. Водночас знос починає концентруватися на цій зоні, що спричиняє самозагострення лез під час роботи [6].

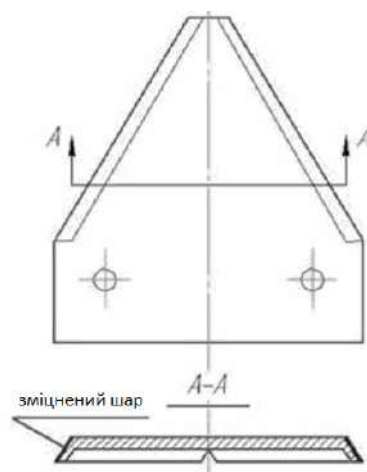


Рисунок 1.5 – Сегмент після модернізації.

Один із прогресивних способів обробки ріжучих елементів — це магнітно-абразивне доведення (МАД). Метод базується на застосуванні магнітно-абразивної суміші, яка ущільнюється під дією магнітного поля та розміщується між двома полюсними наконечниками. Ці наконечники пов'язані між собою магнітопроводом, котушками й обертальним приводом. Значна частина сегментів, що випускаються вітчизняною промисловістю, не відповідає вимогам, викладеним, і має низку конструктивних недоліків.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Головною перевагою технології є можливість змінювати густину абразивного середовища в зоні обробки. Це дозволяє досягти оптимального тиску на деталь і забезпечити точне, щадне знімання матеріалу з її поверхні.

Для підвищення надійності технологічного процесу застосовується інноваційна конструкція сегмента, яка дозволяє уникнути потреби в його періодичній заточці. Сегмент виконано у вигляді пластини (рис. 1.6, поз. 1), на бічних гранях якої закріплено ріжучі елементи з гофрованої стрічки (поз. 3). Ця стрічка має гребені (поз. 4) та скати (поз. 5), які під час експлуатації ефективно зрізають стебла рослин. Завдяки гофрованій формі, ріжуча конфігурація сегментів зберігається навіть після значного зносу, що забезпечує постійно високу ефективність роботи.

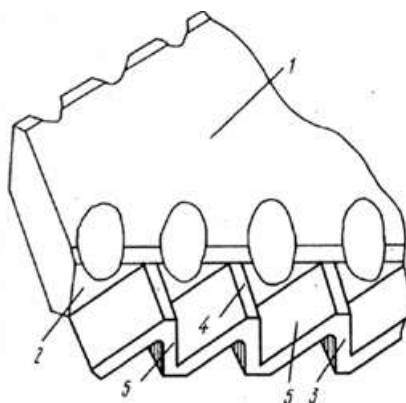


Рисунок 1.6 – Сегмент у вигляді пластини з ребрами.

Сегмент (рис. 1.7) складається з основної частини 1 та двох ідентичних трапецієподібних елементів 2, кожен з яких має ріжучі кромки 3. Конструкція також передбачає зону для кріплення. Заточення виконане у вигляді послідовно розташованих сегментних виїмок 4, що проходять уздовж усього ріжучого краю 3 під гострим кутом до площини сегмента. На місці з'єднання двох трапецієподібних частин передбачено заглиблення, яке може бути реалізоване у формі круглого отвору.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

опорній площині сегмента виконано фаску (поз. 7) під певним кутом нахилу для забезпечення оптимальних умов роботи [5].

Запропоновано конструкцію ріжучого елемента, що включає основу базової ступені з насіченими лезами, симетрично розташованими по обидва боки під певним кутом різання. Леза виконані у вигляді ступінчастих трапецій, які послідовно зменшуються у висоту по напрямку до низу. Кожна нижча трапеція має довжину основи, меншу на 0,9...0,2 від попереднього рівня.

Завдяки такій конфігурації, під час руху машини стебла рослин втягуються та переміщуються крізь щілини між ріжучими ступенями — з верхнього до нижнього, що дозволяє збільшити швидкість розрізання агрегату.

Описується варіант конструкції сегмента (рис. 1.12), що включає трапецеїдальну частину 1 BFGC, леза 2 та основу 3, яка має форму паралелограма ABDE. В кутах A та D на нижній площині сегмента передбачені скошені поверхні (фаски) 4.

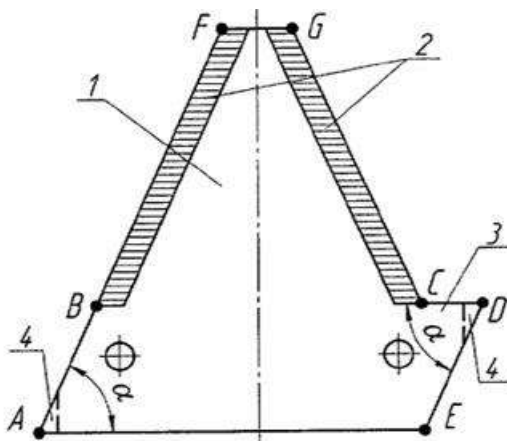


Рисунок 1.12 – Сегмент, що містить трапецеїдальну частину.

Довжина нижньої сторони трапецевидної частини менша за довжину основи приблизно на 5–15%. Бічні сторони основи мають нахил, що відповідає куту відхилення ріжучих кромки. При цьому одна з бічних граней

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

основи розміщена на продовженні сторони трапецевидного фрагмента. Крім того, в місцях гострих кутів основи сегмента передбачено фаски. Таке конструктивне рішення дозволяє уникнути сильного ударного навантаження в місцях зіткнення основ сегментів, що підвищує загальну надійність ріжучих елементів.

Описано конструкцію ножа для косарки, сегмент якого (рис. 1.13) складається з основи у формі трапецієподібної плоскої пластини з двома боковими ріжучими кромками. У нижній частині основи передбачені отвори для монтажу. Кожна ріжуча кромка оснащена щонайменше двома виїмками, що допомагає утримувати стебла зрізаних рослин у потрібному положенні під час їх перерізання між сегментом і протиріжучими пластинами. Це сприяє більш рівномірному зносу ріжучого елемента. На лезах можуть бути виконані зубці з нижньою або бічною насічкою. Крім того, в основі можуть бути розміщені додаткові отвори — базові та захисні.

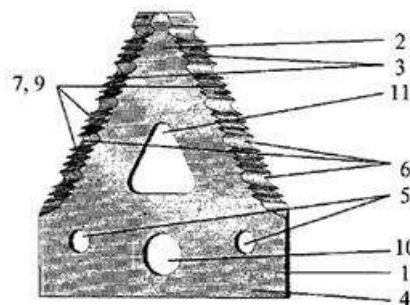


Рисунок 1.13 – Сегмент з окремими висічками.

У дослідженні [2] розглядається технологія підвищення зносостійкості за допомогою лазерного оброблення поверхні (рис. 1.14). Зміцнення здійснюється лазерним променем на глибину від 254 до 1016 мкм, при цьому оптимальною вважається товщина шару близько 508 мкм. Окремо наголошується на доцільності обробки тільки вершин зубців сегмента 2, оминаючи підстави западин 3. Це дозволяє зменшити складність демонтажу та монтажу елементів, які зазнають зношення.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

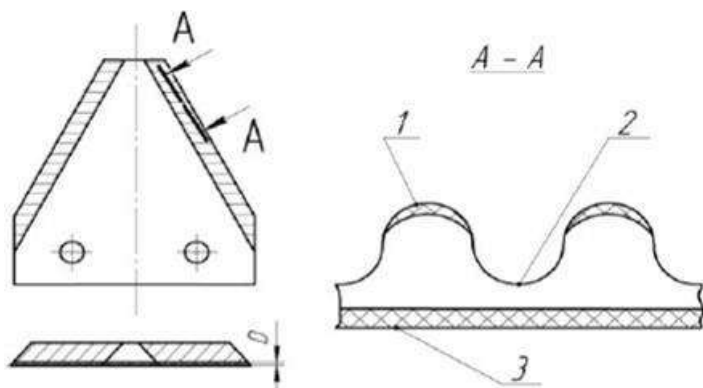


Рисунок 1.14 – Зміцнення сегменту променем лазера.

З метою підвищення коефіцієнта готовності збиральної техніки була розроблена конструкція сегмента (рис. 1.15), у якій використовується змінний ріжучий компонент 2. Цей елемент закріплюється на основі 1, яка, в свою чергу, приклепується до ножа ріжучого механізму [2]. Такий підхід дозволяє швидко замінювати зношені частини без повного демонтажу всього сегмента.

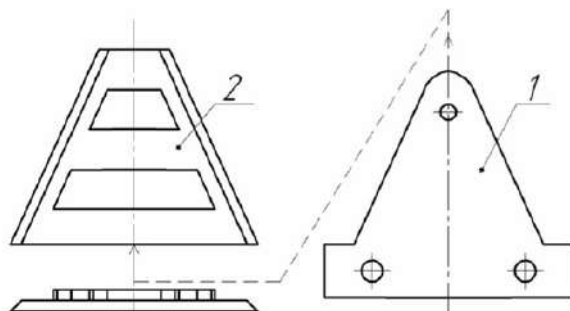


Рисунок 1.15 – Змінний ріжучий компонент на сегменті.

Застосування розробленого авторами [2] ротаційного ріжучого механізму для косарки (рис. 1.16) сприяє спрощенню конструкції та полегшенню технічного обслуговування. Це, у свою чергу, дозволяє підвищити коефіцієнт готовності збиральної техніки та скоротити час простоїв через ремонт. Конструкція апарата включає опорний елемент, до якого прикріплюється ріжуча частина 3 за допомогою пальця 1. Фіксація пальця здійснюється пружинним елементом 4, що має вигляд літери "Г".

									Арк.
									23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

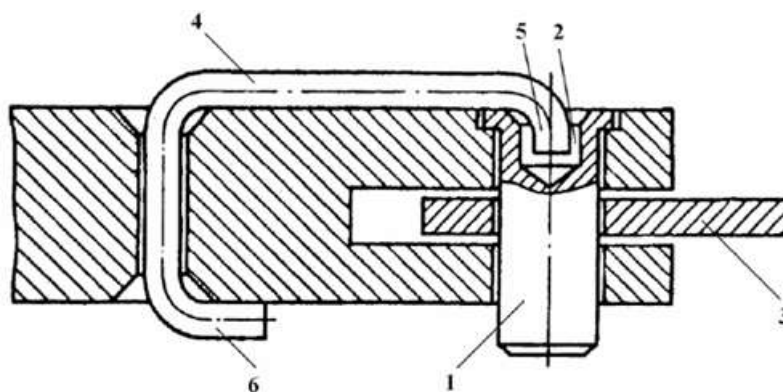


Рисунок 1.16 – Ріжучий апарат з опорним елементом.

Фіксуючий елемент 4 встановлюється в отворі 6 несучого вузла з можливістю обертання. Один його кінець має загин 5, що входить у глухий отвір 2 пальця 1. Протилежний кінець фіксатора 4 під час монтажу пружинно загинається назовні до зовнішньої поверхні.

Для здійснення заміни ріжучого елемента 3 необхідно підняти та повернути фіксатор 4 до виведення загину 5 з отвору 2. Після цього палець 1 виймається, що дозволяє легко демонтувати ріжучий компонент 3.

З метою підвищення надійності в роботі ріжучого механізму збиральних машин із ротаційними ножами пропонується модернізована конструкція робочих органів, як зображено на рисунку 1.17.

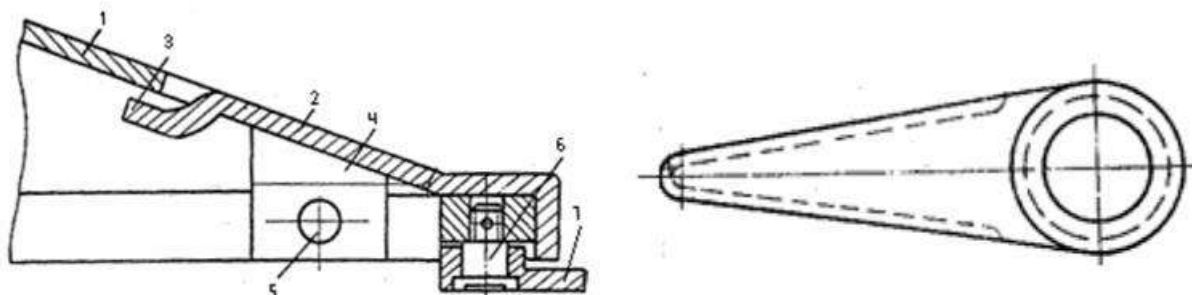


Рисунок 1.17 – Модернізована конструкція робочих органів.

Згідно з [2], конструкція ротаційного ріжучого механізму передбачає наявність диска 1, який жорстко фіксується на приводному валу. На

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

периферії цього диска симетрично розміщені отвори. По боках прорізів на диску розташовані нерухомо закріплені кронштейни, що мають консольні ділянки з отворами для шарнірного з'єднання з диском несучого елемента 2. Цей елемент також оснащений упором 3, що встановлений в отвір на диску 1 і повторює його геометричну форму.

У нижній частині елемента 2 на його бокових сторонах розташовані кронштейни 4, які також надійно закріплені. Через отвори в нижній частині кронштейнів 4 елемент 2 з'єднується з диском 1 за допомогою шарнірів. Це дає йому змогу обертатися навколо осей 5, вставлених у відповідні отвори. На осі 6 встановлений ніж 7, який шарнірно закріплюється.

Ніж має лезо, що звужується ближче до краю, з двома ріжучими кромками, загостреними з нижньої сторони. При наїзді на перешкоду (наприклад, камінь), ніж зіштовхується з нею загостреною похилою частиною і завдяки обертанню навколо осі 6 відхиляється вгору.

З метою продовження терміну експлуатації ротаційного ріжучого вузла, підвищення зручності його обслуговування та зниження виробничих витрат, у [2] пропонується застосування ножових елементів зі змінними ріжучими накладками. Конструкція ріжучого механізму (рис. 1.18) передбачає використання дискових роторів, на яких шарнірно встановлено по два ножа пластинчастого типу прямокутної форми.

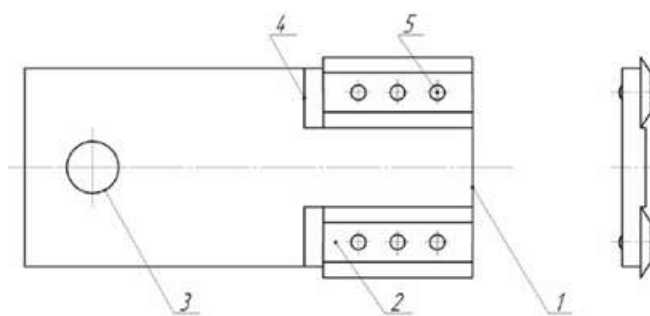


Рисунок 1.18 – Апарат з дисковими роторами.

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Такий ніж має складену структуру: він складається з прямокутної основи 1, до якої прикріплюються дві змінні ріжучі накладки 2. Це рішення дозволяє за необхідності швидко замінювати лише зношені частини, не змінюючи весь ніж повністю.

Прямокутна основа виготовляється з конструкційної вуглецевої сталі й містить отвір 3, призначений для шарнірного з'єднання з ротором дискового типу. Крім того, в основі передбачені два відкриті пази 4, які слугують місцем кріплення ріжучих накладок.

Самі накладки мають форму прямокутних пластин, виготовлених із легованої конструкційної сталі, з ріжучими крайками, заточеними вздовж двох довгих боків. Як на основі, так і на накладках передбачені отвори 5, через які здійснюється їхнє з'єднання.

У процесі експлуатації дискові ротори обертаються в протилежних напрямках один до одного. За такого режиму роботи одна з накладок виконує ріжучу функцію, тоді як інша — виступає в ролі балансувального елемента й резервного леза. Знос під час роботи відбувається лише на активній ріжучій крайці.

Один із напрямів підвищення довговічності ріжучих компонентів у збиральній техніці полягає у виготовленні сегментів із зносостійким алмазоподібним покриттям. Для зменшення ризику деформацій під дією вертикальних навантажень, у конструкції таких сегментів передбачаються спеціальні вирізи.

Існують також інші методи продовження терміну служби різальних деталей (зокрема ножів, сегментів, протиріжучих пластин тощо). Проте вони не набули широкого розповсюдження через наявність суттєвих недоліків, пов'язаних із конструкцією, виготовленням та експлуатацією.

До основних обмежень запропонованих рішень належать:

висока складність у виготовленні таких елементів (дорогі матеріали й обладнання, значні трудозатрати);

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

необхідність переосмислення або модифікації стандартної конструкції ріжучого вузла;

ускладнення загальної архітектури ріжучого механізму;

потреба в додатковому заточуванні ріжучих крайок у процесі експлуатації;

труднощі з механічною обробкою лез;

обмежена універсальність — придатність лише для окремих культур (наприклад, залежно від товщини стебел);

необхідність зміни конструкції суміжних елементів (зокрема, протиріжучих пластин);

підвищення навантажень на приводні вузли;

збільшення втрат під час збирання врожаю тощо.

1.4 Аналіз методів підвищення зносостійкості поверхонь тертя.

Як уже згадувалося, підвищення надійності ріжучих компонентів у складі збиральної техніки зазвичай досягається шляхом удосконалення конструктивних рішень вузлів ріжучого апарату, вибору нових матеріалів для ріжучих елементів, а також технологічного зміцнення їх робочих поверхонь для покращення зносостійкості.

Методи, що передбачають збільшення ресурсу шляхом зміни конструкції, мають певні обмеження. Зокрема, до них належать складність у виготовленні таких елементів, необхідність відходу від типових схем ріжучих вузлів, що призводить до загального ускладнення конструкції та підвищення навантаження на привідні частини механізму.

У виготовленні робочих елементів ріжучих механізмів (ножів, сегментів, протиріжучих пластин) зазвичай використовують інструментальні вуглецеві сталі марок У8, У9, У10. Їх традиційно піддають термічній обробці

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

— високочастотному гартуванню до твердості приблизно 55 HRC. Такі сталі забезпечують хорошу твердість при відносно невисокій крихкості.

Проте, як свідчать результати практичного використання, робочі органи, виготовлені з подібних матеріалів, мають обмежений термін служби. Навіть за умови належного гартування, вони швидко зношуються та досягають граничного стану експлуатаційної придатності. Зокрема, згідно з даними [6], ресурс подібних елементів становить близько 5–24 гектари на один ніж (від 4 до 20 годин безперервної роботи). Водночас, відповідно до норм ДСТУ 158-74, середній термін служби сегмента складає 3,5 га, а ножові планки повинні витримувати не більше двох сезонів.

Інтенсивне зношення призводить до частих простоїв збиральної техніки через ремонт і техобслуговування, що негативно впливає на її оперативну готовність у польових умовах.

Використання матеріалів із вищими показниками зносостійкості порівняно з інструментальними сталями здебільшого вважається економічно недоцільним через їхню високу вартість [6]. Окрім того, підвищення довговічності робочих елементів шляхом зміни матеріалу є виправданим лише у випадку специфічних умов експлуатації техніки — таких як ступінь засміченості полів, тип ґрунту, особливості культури, що збирається тощо.

Підібрати оптимальні матеріали для виготовлення окремих елементів ріжучих систем із урахуванням конкретних умов їхньої роботи є доволі складною задачею. Це пов'язано з труднощами виробничого характеру, особливостями обробки різних матеріалів, а також із суттєвим зростанням вартості виготовлення таких деталей.

Спроби продовжити термін служби ріжучих елементів шляхом зміни хімічного складу або структури матеріалу, зокрема шляхом переходу від сталі У12 до сталей Х05 та 13Х, не дали суттєвих результатів у підвищенні довговічності ріжучих пар [5, 6]. Найбільше покращення досягалося за

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рахунок конструктивних рішень, однак їх впровадження має певні обмеження й не завжди може бути реалізовано на практиці.

Аналізуючи недоліки наявних підходів до підвищення надійності ріжучих елементів збиральної техніки, можна зробити висновок, що технологічні методи зміцнення є більш доцільними, оскільки не потребують зміни конструкції або матеріалу виробу.

Проте через велику кількість варіантів технологій зміцнення, їх специфіку застосування, а також різницю у фізико-механічних та трибологічних характеристиках поверхонь, виникає складність у виборі найоптимальнішого способу їх реалізації.

Розглянемо класифікацію методів зміцнення поверхонь для оцінки технологічних переваг і недоліків [7].

1 група. Зміцнення шляхом утворення поверхневої плівки

1.1 Методи хімічного осадження:

а) Оксидування.

Цей процес характеризується тривалістю близько 60 хв при лужному середовищі, при цьому формується шар товщиною до 1,5 мкм. У разі кислотного оксидування товщина плівки може сягати 3 мкм, але сама операція відбувається у 2–3 рази швидше.

б) Фосфатування.

Покриття утворюється за 40–120 хв із товщиною в межах 2–4 мкм. Однак такі плівки мають низьку хімічну стійкість і можуть руйнуватись під дією кислот або лугів. Для забезпечення належної якості перед обробкою необхідне попереднє гідроабразивне очищення.

в) Нікелювання.

Осадження шару нікелю відбувається зі швидкістю 6–9 мкм за 30–40 хв, загальна товщина покриття зазвичай складає 15–18 мкм. Після нанесення потрібно виконати термічну обробку при 350–400 °С протягом години.

г) Сульфидування.

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метод є тривалим. Наприклад, при твердому сульфідуюванні, яке виконується при 565 ± 5 °С з витримкою 5,5 годин, утворюється зміцнений шар глибиною до 0,255 мм.

д) Осадження з газової фази.

Найбільш ефективний при великосерійному виробництві, але потребує складного і дорогого обладнання. Метод застосовується здебільшого для покриття твердосплавного інструменту. Процес потребує температури близько 1000 °С, при цьому утворюється плівка товщиною 3–10 мкм. Наприклад, шар карбиду титану з мікротвердістю 3000 МПа та товщиною 10 мкм формується за 1–2 години.

1.2 Осадження із парової фази:

а) Термічне випаровування тугоплавких речовин

Процес має кілька обмежень: складність у випаровуванні матеріалів з високими температурами плавлення або складним хімічним складом; можливе порушення цілісності плівки через викид мікрочастинок; обмежений ресурс і висока інерційність випарювальних елементів; ризик забруднення покриття матеріалом, з якого виготовлено випарники; недостатня міцність зчеплення плівки з основою.

б) Катодно-іонне розпилення

Ця технологія здебільшого використовується для підвищення зносостійкості ріжучого інструменту. Вона вимагає складного та дорогого вакуумного обладнання, такого як плазмові генератори, оптичні сепаратори тощо. Незважаючи на хорошу адгезію покриття, існує ризик перегріву і навіть проплавлення мішені через надмірне зосередження катодної плями.

в) Електронно-променеве випаровування

Метод потребує складної технічної реалізації: необхідна вакуумна камера, електронна гармата та високовольтне живлення. Щоб забезпечити стабільність процесу, потрібно підтримувати тиск нижче 0,1 Па. Крім того, значна частина енергії витрачається на непрямі процеси — підігрів

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контейнера, вторинне випромінювання тощо, що знижує загальну ефективність. Додатково, потік високоенергетичних електронів може негативно впливати на основу, погіршуючи якість покриття.

1.3 Електролітичне осадження покриттів [8]:

а) Хромування

Процес має невисоку ефективність: струмовий вихід становить лише 13–15%, а за умов високої густини струму та понижених температур може досягати максимум 20%. До того ж, під час хромування утворюються токсичні випари, які шкодять довкіллю та здоров'ю персоналу. Покриття, що утворюються, мають значні внутрішні напруження, через що можуть виникати мікротріщини.

б) Нікелювання

Серед основних недоліків - ризик водневої крихкості, що призводить до погіршення механічних характеристик основного матеріалу. Покриття можуть мати слабке зчеплення з підкладкою та демонструють низьку хімічну стійкість до аміачного середовища. Надійна антикорозійна дія забезпечується лише за умови нанесення щільного, непористого шару. Також процес чутливий до наявності домішок у ванні. Максимальна твердість досягає близько 5,5 ГПа.

в) Нікель-фосфатне покриття

Недоліком цієї технології є необхідність високотемпературного режиму - понад 90 °С, що ускладнює реалізацію процесу.

г) Ожелізнення

Цей метод характеризується низькою стійкістю до корозії, потребує використання розчинних анодів та спеціального розгінного етапу перед основним нанесенням.

д) Цинкування

Покриття, що утворюються, мають підвищену крихкість і невисоку ударну в'язкість. Метод демонструє слабку корозійну стійкість без

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідних добавок. Можливе погіршення властивостей основного металу через дифузію водню. Після нанесення покриття зазвичай потребує додаткової обробки. До того ж, цинкові покриття не підходять для виробів, що контактують із харчовими продуктами.

1.4 Напилювання зносостійких покриттів [8, 9]:

а) Плазмове напилення порошкових матеріалів

Метод супроводжується інтенсивним шумовим навантаженням, сильним ультрафіолетовим випромінюванням та виділенням шкідливих сполук, що становлять небезпеку для здоров'я. Додатковою складністю є потреба у складному технічному оснащенні.

б) Детонаційне напилення

До основних недоліків належать нерівномірність нанесення покриття, складність конструкції обладнання, а також забруднення повітря приміщення токсичними продуктами згоряння та залишками порошкового матеріалу.

в) Електродугове напилення

Перед нанесенням покриття потрібно обов'язково підготувати поверхню. Самі покриття мають обмежену адгезію до основного матеріалу, існує ризик вигорання легуючих елементів та надмірного окислення металу під час процесу.

г) Лазерне напилення

Цей спосіб характеризується малою площею покриття за один прохід. При високих швидкостях нанесення можливе забруднення плівки розплавленими краплями чи твердими включеннями матеріалу з мішені, що може негативно впливати на якість шару.

2 група. Зміцнення шляхом модифікації структури поверхневого шару.

2.1 Фізико-термічні методи:

а) Плазмове гартування

Цей спосіб може призводити до виникнення залишкових напружень: на глибині до 0,1 мм переважають розтягувальні напруження до 600 МПа, а

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

нижче - стискуючі до 1000 МПа. Для сталі типу У8 можливе досягнення мікротвердості до 10000 МПа.

б) Лазерне гартування

До основних недоліків належать невисокий коефіцієнт корисного використання енергії, висока вартість обладнання, а також необхідність попереднього нанесення спеціального шару для кращого поглинання лазерного променя, що ускладнює процес.

2.2 Електрофізичні методи:

а) Електроконтактне зміцнення

Недоліком є погіршення якості обробленої поверхні через високу шорсткість, а також небажане термічне навантаження на матеріал.

б) Електроерозійне оброблення

Характеризується низькою продуктивністю при значному енергоспоживанні. У зоні обробки можуть виникати мікротріщини, залишкові напруження, а також поверхня часто має надмірну шорсткість.

2.3 Механічні способи зміцнення:

а) Вібраційне зміцнення

Метод відзначається великою витратою енергії на пластичну деформацію, зниженим ресурсом як інструментів, так і обладнання, через постійний вплив вібрацій.

б) Дробеструминна обробка

Збільшення інтенсивності впливу може знижувати антикорозійні властивості поверхні. Крім того, метод несе ризики для здоров'я працівників через утворення пилу, що негативно впливає на дихальну систему. Використовується для підвищення міцності елементів, що зазнають дії змінних навантажень — таких як ресори, торсіони, шестерні, свердла, матриці, бурові інструменти, зварні з'єднання тощо.

в) Обробка вибухом

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Процес вимагає використання вибухових речовин (зокрема, тротилу або гексогену), що накладає жорсткі вимоги до техніки безпеки. У разі використання водного середовища може спостерігатися руйнування поверхні внаслідок мікробибухів повітряних бульбашок.

г) Термомеханічна обробка (ТМО)

При низькотемпературному ТМО потрібне використання потужних установок через високі опори деформації. Також відзначається зниження опору до крихкого руйнування. Метод ефективний переважно для легованих сталей. Високотемпературне ТМО передбачає тривалість циклу: нагрів до 1100...1200 °С, деформацію, а потім гартування.

д) Електромеханічне зміцнення

Цей спосіб вимагає високовартісного обладнання та витратних інструментів. Після зміцнення зазвичай необхідна додаткова термічна та механічна обробка. До недоліків також належать нестійкість інструменту при стаціонарній обробці та варіативність механічних характеристик поверхневого шару. Твердість покриття зменшується зі зростанням його товщини. За 1–3 проходи досягається товщина зміцненого шару від 0,02 до 0,30 мм.

2.4 Наплавлення з використанням легуючих елементів [7]:

а) Наплавлення газовим полум'ям

Цей метод вимагає попереднього нагрівання деталі, що зумовлює значні теплові втрати і може викликати небажані структурні зміни в металі. Існує ризик деформації невеликих за розміром заготовок. У результаті термічної дії в матеріалі виникають залишкові розтягувальні напруження, які можуть досягати 500 МПа. Також спостерігається зниження втомної міцності до 25%. Товщина наплавленого шару зазвичай становить близько 0,5 мм, з обов'язковим припуском на подальшу механічну обробку до 0,4 мм.

б) Наплавлення електричною дугою

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліками цього способу є нестабільна якість сформованого шару, необхідність додаткового термічного і механічного доопрацювання поверхні, імовірність появи тріщин гарячого або холодного характеру. Робота потребує висококваліфікованого персоналу. Метод може призводити до деформації тонкостінних елементів та утворення значних залишкових напружень. Товщина покриття і припуск на обробку аналогічні до попереднього методу — 0,5 мм і 0,4 мм відповідно.

в) Плазмове наплавлення

Цей метод характеризується високою вартістю обладнання та може призводити до зниження адгезійної міцності між шаром і основним матеріалом. Крім того, можливі структурні зміни в основному металі та зменшення втомної міцності до 12%. Типова товщина шару — до 0,5 мм, з припуском на обробку приблизно 0,4 мм.

г) Лазерне наплавлення

Використання лазерного випромінювання потребує дорогого устаткування. Нерівномірність опромінення поверхні може викликати неоднорідність властивостей, тому потрібне застосування спеціальних скануючих систем. Метод дозволяє досягати твердості у межах 5200–7600 МПа на глибину до 1,2 мм.

3 група. Зміцнення шляхом впливу на енергетичний стан поверхні.

Обробка в електричному полі.

Цей підхід застосовується для підвищення зносостійкості ріжучого інструменту, зокрема свердел, різців, мітчиків, плашок, а також штампового оснащення — ножів, пуансонів і матриць. У процесі роботи таких інструментів через перепад температур у зоні контакту утворюється термоелектрорушійна сила (термо-ЕРС), що викликає мікроерозійне руйнування. Це зменшує ресурс роботи інструменту. Хоча зміцнення за допомогою електричних полів є ефективним, його застосування для

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сільськогосподарської техніки (наприклад, збиральних машин) є економічно не вигідним через високу вартість реалізації.

4 група. Зміцнення шляхом зміни мікрогеометрії поверхні

4.1 Обробка методом різання:

а) Точіння

Метод застосовується для деталей, які піддаються різальній обробці, зокрема перед нанесенням зміцнюючих покриттів — з метою збільшення їх зносостійкості до 40%. Після точіння в поверхневому шарі формуються залишкові напруження, що можуть досягати 80 кг/мм² на глибині до 100 мкм.

б) Шліфування

Переважно використовується для досягнення високої точності та зниження шорсткості на циліндричних поверхнях. У результаті обробки можуть виникати розтягувальні залишкові напруження (до 80 кг/мм²) на глибині 20–50 мкм. Температура в зоні шліфування здатна підніматися до 1400 °С, що іноді спричиняє небажані структурні зміни в матеріалі.

в) Надшвидкісне різання

Метод ефективний для обробки циліндричних поверхонь і є продуктивнішою альтернативою шліфуванню. Водночас потребує високопотужного обладнання, що призводить до значних витрат енергії.

4.2 Методи пластичного деформування:

а) Обкатування

Доцільне при масовому чи серійному виготовленні деталей.

б) Розкочування

Ефективне для обробки внутрішніх поверхонь, зокрема увігнутих, відповідно до вимог стандарту ГОСТ 18296–72.

в) Вигладжування

Використовується при обробці тіл обертання для покращення параметрів поверхні.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

г) Відцентрово-ударне зміцнення

Також раціональне для масового або серійного виробництва.

Недоліки методів пластичного деформування

При зміцненні тонкостінних деталей (товщиною менше 5 мм) може виникати деформація поверхні через вплив залишкових стискаючих напружень. У деяких випадках спостерігається утворення металевих напливів на краях деталі товщиною 0,03–0,30 мм.

Температура в процесі може досягати: до 300–400 °С при обкатуванні, до 600–700 °С при вигладжуванні, до 800–1000 °С при дії ударного навантаження.

Такі температурні режими можуть зменшувати ефект зміцнення, знижувати рівень стискаючих напружень або навіть призводити до їх переходу в розтягувальні.

Через анізотропію властивостей металу важливо враховувати орієнтацію волокон матеріалу, які мають проходити вздовж контуру деталі, а не перетинатися.

При зміцненні сталей з вмістом вуглецю від 0,5 до 1,0% можливі труднощі, оскільки такі матеріали мають високу міцність і твердість при низькій пластичності. Це збільшує опір деформації.

Наявність легувальних елементів, таких як кремній (понад 0,35%) і марганець (понад 0,85%), також знижує пластичність металу. Якщо вміст сірки перевищує 0,05%, спостерігається червоноламкість, а при високому вмісті фосфору - холодноламкість.

Тому при виборі сталі для зміцнення методом тиску важливо враховувати її хімічний склад і механічні властивості.

Холодне зміцнення потребує потужного обладнання через значні навантаження, необхідні для пластичної деформації. У гарячих режимах властивості металів змінюються в залежності від температури: наприклад,

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при нагріванні вуглецевих сталей до 300 °С зростає їх міцність, але одночасно знижується пластичність, що ускладнює процес зміцнення.

Комбіновані методи зміцнення.

До окремої категорії належать комбіновані технології, які поєднують різні фізичні або хімічні процеси для покращення зносостійкості поверхонь.

Прикладом такого підходу є нанесення гальвано-газофазних хромових покриттів за допомогою саморегульованих електролітів.

До переваг цього способу належать висока продуктивність, значна твердість і зносостійкість покриттів.

Однак існують і суттєві обмеження: агресивне середовище електроліту, складність обладнання, потреба в алмазному згладжуванні поверхні, попереднє електролітичне хромування, а також термічний вплив на деталь при температурах 400–420 °С. На деяких режимах не вдається досягти необхідної якості покриття.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ХРОМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ВИРОБІВ

2.1 Електролітичне хромування як ефективний спосіб зміцнення поверхні деталей.

Серед різноманітних методів підвищення твердості поверхневого шару найбільш перспективними з технологічної точки зору є електричне борування (з твердістю до НВ 2200), плазмове напилення (до НВ 5000), термодифузійне хромування (мікротвердість у межах 1600–2000 кг/см²) та азотування (до 1200 НВ). Проте, незважаючи на вражаючі показники твердості, кожен із зазначених способів має суттєві обмеження, що ускладнюють їх використання на практиці.

Зокрема, борування супроводжується утворенням боридів, які мають підвищену крихкість. Цю проблему намагаються вирішити шляхом додавання до суміші елементів, таких як алюміній чи мідь, але залишається питання наявності значних стискаючих напружень - до 100 кгс/мм².

Щодо плазмової металізації, то цей метод потребує складного та дорогого обладнання. Додатковими недоліками є сильне ультрафіолетове випромінювання, шкідливі аерозолі та підвищений рівень шуму, що створює додаткові санітарні та технічні труднощі в умовах виробництва.

Термодифузійне хромування, хоча й забезпечує гарні показники твердості, вимагає високотемпературних режимів, що спричиняє перегрів технологічної оснастки й утворення значної кількості шкідливих газів та пилу в робочому середовищі [10].

Азотування характеризується тривалим циклом обробки та утворенням внутрішніх напружень, що можуть досягати 100 кгс/см². Крім того, відмінність у коефіцієнтах теплового розширення між основою і поверхневим шаром створює додаткові проблеми експлуатаційної надійності.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Складність обладнання та висока тривалість процесу обмежують його застосування.

Методи наплавлення, попри ефективність у зміцненні, доцільні переважно для робочих елементів ґрунтообробних машин. Якщо мова йде про деталі, що працюють у парі - наприклад, сегмент і протиризальна пластина - після наплавлення обов'язковою є додаткова механічна обробка для забезпечення необхідної точності та геометрії. Через це технологія наплавлення втрачає свою доцільність при зміцненні компонентів збиральної техніки, оскільки не відповідає вимогам з точки зору виробничої ефективності.

Таким чином, враховуючи як властивості отриманих покриттів, так і обмеження інших методів, електролітичне хромування виступає оптимальним варіантом для забезпечення необхідної твердості, зносостійкості та технологічної придатності поверхневих шарів елементів типу ріжучих машин.

Одним із прикладів практичного впровадження зміцнювальних технологій для ріжучих елементів є електролітичне хромування поверхні гладких сегментів подрібнювального механізму косарок. Нанесення хромового покриття товщиною приблизно 30 мкм дозволило збільшити їх експлуатаційний ресурс у 1,5–2 рази. Захисний шар повинен володіти високою твердістю (понад 1000 кг/мм²), забезпечувати стійкість до викришування та протистояти корозійному впливу [10].

Як уже було зазначено раніше, хромове покриття, отримане електролітичним методом, відзначається однією з найвищих твердістей серед інших технологій. Враховуючи ефективність цієї технології та позитивні результати практичного застосування, доцільним є використання електролітичного хромування для підвищення зносостійкості робочих елементів збиральної сільськогосподарської техніки. При цьому важливо

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

враховувати конкретні умови експлуатації, які визначають оптимальні параметри процесу, включно з товщиною покриття.

Для досягнення максимальної ефективності з урахуванням економічної доцільності, екологічної безпеки та технологічної продуктивності, необхідно коректно обрати режим електролітичного осадження. До таких параметрів належать: щільність струму, електрохімічний вихід, температура і склад електролітної ванни, конфігурація та площа електродів, їх полярність, якість попередньої підготовки поверхні. Крім того, важливо передбачити належну вентиляцію виробничого приміщення, системи очищення та утилізації відходів, а також контроль за викидами шкідливих речовин.

Комплексне дотримання зазначених вимог дає змогу мінімізувати негативні наслідки, пов'язані з використанням електролітичного хромування, і забезпечити стабільні експлуатаційні характеристики зміцнених деталей.

Хром характеризується низькою здатністю до розсіювання [11]. У процесі термічної обробки, під час якої усувається водень із хромового шару, в покритті можуть зростати внутрішні розтягувальні напруження до такого рівня, що вони перевищують межу міцності, що, своєю чергою, призводить до утворення тріщин. Оскільки хром осаджується шарами, нові нашарування перекривають мікротріщини попередніх, формуючи зовні суцільне покриття [12].

Електролітичні хромові покриття мають властивість змінювати свої фізико-механічні характеристики в широкому діапазоні залежно від умов процесу осадження. Ця варіативність дає змогу отримувати покриття з різними параметрами, що дає гнучкість при виборі режимів хромування.

Твердість хрому також змінюється в значних межах - від 400 до понад 1000 кгс/мм² (що відповідає приблизно $3,9 \times 10^5$ до $7,8 \times 10^5$ Н/м²) - і суттєво залежить від складу електроліту. Найбільш тверді осади хрому в 2–3 рази перевершують за твердістю метали, такі як нікель, залізо, кобальт, а також сталі після азотування або цементації.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Слід зазначити, що не лише параметри процесу електролітичного осадження (температура, струм тощо), а й додавання наночастинок можуть істотно змінювати фізико-механічні властивості гальванічних покриттів. Так, наприклад, при введенні до нікелевої матриці порошоків оксиду алюмінію й політітанату калію та подальшій термообробці, мікротвердість одержаного шару може зрости майже вдвічі порівняно з традиційним покриттям [12].

Додавання нанодисперсного порошку оксиду алюмінію до хромових покриттів дозволяє значно підвищити їх мікротвердість — до 14 ГПа, тоді як у покриттів без подібних добавок цей показник становить близько 10 ГПа [13].

Однією з характерних особливостей технології нанесення таких композиційних покриттів є можливість підвищення інтенсивності процесу осадження. Це досягається завдяки використанню проточних електролітних систем, ультразвукових коливань, імпульсного струму, а також методом реверсування постійного струму [13]. Такі технічні рішення сприяють зменшенню енергоспоживання та зниженню собівартості нанесення покриття за рахунок покращення струмових виходів хрому.

Що стосується зносостійкості хромованих покриттів, отриманих у стандартному електроліті, вона демонструє температурну залежність: спочатку зростає, досягаючи максимуму в інтервалі 55–65 °С, після чого поступово знижується і досягає мінімуму при температурі близько 75 °С. Варто зауважити, що між твердістю покриття та його зносостійкістю немає однозначної прямої залежності. Наприклад, під час зростання зносостійкості з 800 до 900 кгс/мм² спостерігається підвищення твердості, однак за подальшого збільшення зносостійкість знижується.

Хромові покриття вирізняються низьким коефіцієнтом тертя, що особливо помітно в умовах сухого контакту. Ця властивість є важливою при виборі методу поверхневого зміцнення, оскільки нанесення хрому на одну з

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контактуючих деталей дозволяє зменшити тертя між ними, а отже, знижує кількість тепла, яке утворюється під час експлуатації. Важливою перевагою є також стабільність коефіцієнта тертя протягом усього періоду роботи тертьової пари, що позитивно впливає на надійність та прогнозованість експлуатаційних характеристик.

Фізичні, кристалічні та теплотехнічні властивості хромованого шару можуть суттєво відрізнятись від властивостей основного матеріалу деталі. Завдяки цьому нанесення покриття дозволяє значно покращити експлуатаційну стійкість деталей, зокрема їхню здатність протистояти як мікро-, так і макроруйнуванню. Крім того, покриття сприяє зниженню контактних навантажень і зменшує інтенсивність тепловиділення, що в результаті знижує термомеханічне навантаження на робочі поверхні.

Таким чином, хромове покриття виконує функцію захисного проміжного шару між взаємодіючими деталями. Воно одночасно зменшує механічні і теплові впливи, а також підвищує опірність елементів до зносу та руйнування [12].

2.2 Вплив параметрів електролітичного хромування на якість і характеристики покриття.

Хром це метал сріблясто-білого кольору з характерним синюватим відтінком. Його атомна маса становить 52,01, а валентність 2, 3 або 6. Особливістю хрому є те, що жоден інший елемент періодичної таблиці не пасивується так швидко у водних електролітах і не може бути виділений електролізом у тій же формі. Це один із найбільш легко пасивуючихся металів.

Основні фізичні характеристики хрому: температура плавлення: 1850–1900 °С, температура кипіння: 2469 °С, коефіцієнт лінійного розширення:

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$6,2 \times 10^{-4}$ град⁻¹, модуль пружності: 250–260 ГПа, питомий електроопір: $0,15 \times 10^{-3}$ мкОм·см, теплопровідність: 0,46 Дж/(г·°С).

Особливості хромових електролітичних покриттів:

Хром, осаджений електролітичним методом, має дрібнокристалічну структуру. Розмір кристалітів зазвичай знаходиться в межах 10^{-6} – 10^{-7} см. При товщині покриття понад 30 мкм можуть з'являтися характерні мікросферичні утворення, так звані нарости або сфероїди, що формуються внаслідок пошарового осадження.

Вміст газів у хромовому шарі залежить від параметрів процесу: він зростає із підвищенням щільності струму, але знижується за умови підвищення температури електроліту. Температура є ключовим чинником, що впливає на ступінь наводнювання основного металу. Так, при незмінній тривалості хромування підвищення температури з 55 до 75 °С може збільшити проникнення водню в основу в 6–10 разів. У той же час, при зростанні температури електроліту, кількість водню, що осідає в самому шарі хрому, навпаки зменшується. Наприклад, при щільності струму 60 А/дм² підвищення температури електроліту з 30 до 80 °С зменшує вміст водню з 0,09% до 0,03% маси [13, 14].

Під час електролітичного осадження хрому в покритті формуються розтягувальні напруження, що виникають унаслідок структурного переходу — від гексагональної до об'ємноцентрованої кубічної кристалічної решітки. Основними факторами, які впливають на рівень цих напружень, є температура електроліту та товщина нанесеного шару.

Наприклад, якщо за умов щільності струму 41 А/дм² і температури 54 °С товщина хромового покриття зростає з 10 до 40 мкм, величина розтягувальних напружень зменшується з 75 до 35 кг/мм². При подальшому збільшенні товщини до 90 мкм напруження можуть знижуватись до рівня нижче 20 кг/мм² [15].

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хромові покриття також відзначаються високими показниками твердості. Однак зі збільшенням температури процесу електролізу цей показник має тенденцію до зниження. Найвищу твердість, як правило, досягають за струмової густини близько 60 А/дм².

Зносостійкість хромових покриттів найбільше залежить від їхньої твердості - зі збільшенням останньої, як правило, зростає й стійкість до зношування. Це пояснюється підвищенням міцності кристалічних зерен хрому. Однак, коли твердість досягає певного критичного рівня, міцність самих зерен перевищує міцність їх зв'язку між собою. У результаті відбувається не стирання, а викришування окремих зерен, що, навпаки, призводить до зниження зносостійкості при надмірному підвищенні твердості [15].

На зносостійкість також впливає термічна обробка після процесу хромування. Найкращі результати спостерігаються при нагріванні до температури 150–200 °С. При подальшому підвищенні температури ефективність покриття значно знижується. Однак, якщо хром осаджувався при температурі електроліту понад 70 °С, подальша термообробка практично не впливає на його зносостійкість.

За опором до корозійного руйнування хром не поступається таким благородним металам, як срібло, золото, платина, або ж нержавіючій сталі. При цьому він значно перевершує їх за твердістю і зносостійкістю [14, 15].

Пористість хромового шару залежить від температури електроліту та складу електролітної ванни. Кількість мікротріщин на площу 1 мм² у стандартному розчині може варіюватися від 0 до 1800. Найменша тріщинуватість досягається при співвідношенні хромового ангідриду до сірчаної кислоти (CrO₃: H₂SO₄) рівному 150, струмовій густині 70 А/дм² та температурі 65 °С. Максимальна кількість тріщин виникає за співвідношення 80, струмі 30 А/дм² і температурі електроліту 40 °С.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі хромування втомна міцність сталевих деталей може знижуватись до 30%. Рівень цього зменшення залежить від декількох факторів: властивостей сталі, товщини нанесеного шару хрому, температурного режиму електролізу та типу навантаження під час випробувань. Збільшення товщини хромового шару зазвичай призводить до подальшого зниження втомної міцності матеріалу [16].

Після хромування термічну обробку доцільно застосовувати переважно у випадках, коли покриття використовуються для підвищення зносостійкості, і лише для тих деталей, які не піддаються циклічним навантаженням у процесі експлуатації. Доцільність термообробки визначається індивідуально залежно від умов роботи деталі. Водночас важливо враховувати, що термічна обробка може призводити до зниження твердості хромового шару [17, 18].

Що стосується механічної обробки після хромування, то для більшості ріжучих елементів збиральної техніки вона не є необхідною. Проте в загальній практиці використовуються такі операції, як шліфування, хонінгування та притирання. Варто зазначити, що шліфування може негативно впливати на характеристики покриття - знижуючи його твердість приблизно на 25% і скорочуючи рівень пористості до 60 % .

Отже, електролітичне хромування має ряд важливих переваг порівняно з іншими методами зміцнення поверхонь, що працюють у контакті з тертям. Зокрема, воно забезпечує високу твердість нанесеного шару без негативного впливу на пластичність основного матеріалу. Покриття, отримані таким способом, вирізняються підвищеною зносостійкістю та здатністю протистояти корозії. До того ж, за рахунок варіювання технологічних параметрів процесу осадження можна змінювати фізико-механічні характеристики хрому. Ще однією важливою перевагою є низький коефіцієнт тертя, що дозволяє уникати надмірного нагрівання робочих поверхонь у процесі їх експлуатації.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Теоретична оцінка швидкості зношування хромованих лез ріжучих елементів.

Робочі елементи збиральної сільськогосподарської техніки — такі як ножі, сегменти, протиріжучі пластини — функціонують у надзвичайно складних умовах експлуатації. Під час роботи вони інтенсивно взаємодіють з абразивними частинками ґрунту, рослинними залишками, твердими включеннями (камені, гілки, пісок) і при цьому не мають змазування. Такі навантаження спричиняють прискорене зношування деталей і швидке досягнення граничного технічного стану.

Одним із ефективних способів зменшення зношування в таких умовах є формування на поверхні ріжучих елементів покриття з хрому, нанесеного електролітичним методом. Відомо, що такі покриття характеризуються високою твердістю, добрим зчепленням з основним матеріалом, хімічною інертністю до агресивного середовища та низьким коефіцієнтом тертя. Це комплексно забезпечує підвищення зносостійкості робочих поверхонь [7, 8].

На основі досліджень, проведених у сфері електролітичного хромування, можна зробити висновок, що цей метод зміцнення забезпечує не лише механічну стійкість до стирання, а й термічну та хімічну стабільність покриття під час експлуатації. Це дозволяє зберігати функціональність ріжучих елементів тривалий час навіть у важких польових умовах.

Миттєву швидкість зношування ріжучого леза можна розрахувати за наступною формулою [19]:

$$\frac{d\delta}{dt} = 2 \frac{\alpha P_{riz}}{k_i} \cdot \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{1 - \sin \frac{\beta}{2}}, \quad (2.1)$$

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де k_i - відносний коефіцієнт, що характеризує зносостійкість матеріалу леза; δ - ступінь гостроти леза елемента ріжучого, мкм; t - тривалість роботи леза; α - коефіцієнт, що характеризує зношувальну здатність середовища; P_{riz} - навантаження параметрів різання, Н.

Коефіцієнт відносної зносостійкості хромованого покриття порівняно зі сталлю марки 45 перебуває в межах від 1,72 до 2,26 [19]. З огляду на те, що ріжучі кромки елементів збиральної сільськогосподарської техніки піддаються зміцненню термічною обробкою на стадії виробництва, у подальших розрахунках доцільно орієнтуватися на нижню межу цього коефіцієнта - 1,72.

Зусилля, що враховує фізико-механічні характеристики процесу різання (P_{riz}), зазвичай становить від 40% до 80% від повного зусилля, яке необхідне для того, щоб ріжучий елемент здійснив поділ матеріалу своїм лезом (P_{kr}). Це зусилля визначає основне навантаження, яке впливає на лезо під час експлуатації, і є важливою складовою в розрахунках зношування та міцності робочих органів машин: $P_{riz} = (0,4...0,8)P_{kr}$.

Водночас загальне зусилля, яке потрібно прикласти до ріжучого елемента для ініціювання розділення матеріалу його лезом, може бути визначене за наступною формулою, Н [20]:

$$P_{kr} = P_{riz} + P_v, \quad (2.2)$$

$$P_{riz} = \delta \sigma_p, \quad (2.3)$$

$$P_v = \frac{E}{2} \cdot \frac{h_{ct}^2}{h} \left(\operatorname{tg} \beta + f \sin^2 \beta + \mu (f + \cos^2 \beta) \right), \quad (2.4)$$

де E - модуль пружності матеріалу, що обробляється (МПа); P_v - навантаження, що враховує режими різання, Н, h_{st} - товщина стисненого лезом шару, до початку різання, мм; σ_p - руйнівне контактне напруження на

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кромці леза, МПа, h - товщина шару, що ріжеться, мм; β - кут заточки леза, градус; f - коефіцієнт тертя матеріалу стосовно леза; μ - коефіцієнт Пуассона.

Тоді, зусилля різання буде визначатися за залежністю [20]:

$$P_{kr} = \delta\sigma_p + \frac{E}{2} \cdot \frac{h_{ct}^2}{h} \left(\operatorname{tg}\beta + f \sin^2 \beta + \mu(f + \cos^2 \beta) \right). \quad (2.5)$$

З врахуванням вихідних даних для розрахунку зусилля різання, а саме для шару пшениці озимої [10]: $\mu = 0,0922$; $E = 68,6$ (МПа); $\beta = 25$ град; $\delta = 0,1$ мм, $P_{kr} = 57,42$ МПа $\sigma_p = 11,77$ МПа.

Відповідно до відомих джерел [18, 19], коефіцієнт тертя пари "хром-хром" становить приблизно 0,14, тоді як для "сталь-сталь" цей показник досягає 0,23, що на 64% більше. Якщо врахувати, що середній коефіцієнт тертя шару пшениці по сталевій поверхні становить близько 0,38, то для шару кукурудзи, що взаємодіє з хромованим покриттям, аналогічний коефіцієнт можна прийняти рівним 0,23.

Оскільки деякі значення параметрів залишаються невідомими, доцільно представити співвідношення у вигляді рівняння, виведеного з формули (2.5). У випадку зрізання стебел озимої пшениці звичайними ріжучими елементами зі сталі рівняння набуває такого вигляду:

$$\frac{h_{ct}^2}{h} = \frac{P_{kr} - \delta\sigma_p}{\frac{E}{2} \left(\operatorname{tg}\beta + f \sin^2 \beta + \mu(f + \cos^2 \beta) \right)}, \quad (2.6)$$

або:

$$\frac{h_{ct}^2}{h} = \frac{57,42 - 0,1 \cdot 11,77}{\frac{68,67}{2} \left(\operatorname{tg}25 + 0,38 \sin^2 25 + 0,0925(0,38 + \cos^2 25) \right)} = 2,538$$

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Величина зусилля різання (при коефіцієнті тертя 0,23 для деталей з наявним хромовим покриттям) розраховуємо за рівнянням 2.5:

$$P_{кр} = 0,1 \cdot 11,77 + \frac{68,67}{2} \cdot 2,538 (\operatorname{tg} 25 + 0,23 \sin^2 25 + 0,0925 (0,23 + \cos^2 25)) = 53,88$$

Результати розрахунків свідчать, що зі зростанням коефіцієнта тертя між матеріалом і ріжучою кромкою необхідне зусилля для початку поділу матеріалу збільшується. Зокрема, зростання цього коефіцієнта призводить до підвищення прикладеного зусилля на 3,54 Н.

З урахуванням фізико-механічних властивостей процесу різання, сила, необхідна для роботи ріжучого елемента, становитиме різні значення для звичайного (стандартного) і хромованого інструменту відповідно:

$$P_{riz}^{st} = 0,6 \cdot 57,42 = 34,452, \text{ Н}; \quad P_{riz}^{hr} = 0,6 \cdot 53,88 = 32,325, \text{ Н}.$$

Швидкість зношування (миттєва) для стандартного леза і ріжучого елемента вкритого хромом складе:

$$\frac{\delta_{st}}{\alpha} = 2 \cdot \frac{0,13 \cdot 34,452}{1 \cdot 0,1} \cdot \frac{\sin \frac{25}{2}}{1 - \sin \frac{25}{2}} = 24,74; \quad \frac{\delta_{hr}}{\alpha} = 2 \cdot \frac{0,13 \cdot 32,325}{1,72 \cdot 0,1} \cdot \frac{\sin \frac{25}{2}}{1 - \sin \frac{25}{2}} = 13,49.$$

Таким чином, завдяки зниженню коефіцієнта тертя поверхні та враховуючи коефіцієнт відносної зносостійкості, миттєва швидкість зношування хромованих елементів у порівнянні зі стандартними зменшується приблизно у 1,83 раза.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Теоретична оцінка впливу режимів електролітичного хромування на властивості покриттів.

Зносостійкість хромових покриттів, отриманих шляхом електролітичного осадження, істотно залежить від параметрів технологічного процесу — передусім від катодної щільності струму та температури електроліту. Саме ці два чинники значною мірою впливають на мікротвердість, адгезію до основного матеріалу та стійкість до корозії. Перелічені властивості є ключовими з погляду експлуатаційної надійності покриттів, тому варто проаналізувати їхню залежність від умов осадження.

За інформацією з літературних джерел [14, 15], оптимальні зносостійкі характеристики забезпечують хромові покриття, сформовані в діапазоні температур 35–75 °С при щільності струму 35–75 А/дм². У межах цих параметрів проводиться подальший аналіз властивостей отриманих осадів.

Відомо, що зростання мікротвердості сприяє покращенню зносостійкості лише до певної межі. Після перевищення цього рівня підвищена твердість призводить до збільшення крихкості покриття та накопичення внутрішніх напружень. Це пояснюється тим, що при електролітичному осадженні міцність зчеплення між кристалітами виявляється нижчою за їхню твердість, і під час тертя зерна можуть вириватися з покриття, знижуючи його зносостійкість. Тому визначення мікротвердості є критично важливим етапом при оцінці якості осаджених шарів.

Згідно з даними досліджень [14], підвищення щільності струму з 35 до 75 А/дм² при температурі 50 °С сприяє зростанню мікротвердості хромового шару. Проте при подальшому збільшенні струму спостерігається зворотна тенденція - твердість починає зменшуватися. Аналогічно, при щільності струму 80 А/дм² підвищення температури електроліту з 40 до 55 °С

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводить до збільшення мікротвердості, але подальше зростання температури вже негативно позначається на цьому показнику.

Мікротвердість хромового покриття може бути визначена за відповідною формулою (вираз у ГПа):

$$H_{\mu} = 10,9 + 0,03 \cdot D_k - 0,05 \cdot t, \quad (2.7)$$

де t - температура електроліту, градус по Цельсію; D_k - щільність струму катодна, А/дм².

Наприклад, відповідно до рівняння (2.8), мікротвердість хромового покриття, сформованого за умови щільності струму 35 А/дм² та температури електроліту 35 °С, становить 10,2 ГПа. Узагальнені результати розрахунків для різних комбінацій температури й щільності струму наведені в таблиці 1 додатка А. Зі зведених даних видно, що в межах рекомендованих режимів для отримання зносостійких осадів мікротвердість варіюється в діапазоні від 8,2 до 11,4 ГПа. Спостерігається така тенденція: при одночасному зростанні температури електроліту з 35 до 75 °С і щільності струму з 35 до 75 А/дм² твердість покриття зменшується - з 10,2 до 9,4 ГПа.

Вплив умов осадження на корозійну стійкість покриттів

Корозійна стійкість хромових шарів тісно пов'язана з їх пористістю: що більша кількість пор, то нижча стійкість до агресивного середовища. Згідно з експериментальними спостереженнями, за температури 55 °С і щільності струму понад 40 А/дм² спостерігається зростання пористості осаду. Водночас при фіксованій щільності струму 80 А/дм² підвищення температури електроліту сприяє зменшенню кількості пор у покритті [15].

Оцінити ступінь корозійної стійкості хромованої поверхні можна за числом активних центрів корозії, що припадають на одиницю площі (шт./см²):

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_k = P - 0,0683t^2 + 3,3766t + 0,7917, \quad (2.8)$$

Де t - час випробувань, діб, а P - пористість покриття, пор/см²;

Кількість пор у покритті може бути розрахована за рівнянням:

$$P = 19,93 + 0,03D_k - 0,26t. \quad (2.9)$$

До прикладу, при осадженні хромового покриття в умовах щільності струму 35 А/дм², температури електроліту 35 °С і експозиції протягом 24 годин, кількість активних центрів корозії за відповідною формулою становить 15,98 шт/см². Підсумовані результати обчислень для різних поєднань температури електроліту й щільності струму наведені в таблиці додатка Б. Дані демонструють, що в межах технологічно доцільних режимів кількість корозійних вогнищ змінюється від 5,58 до 19,39 шт/см². Зі зростанням як температури електроліту, так і катодної щільності струму з 35 °С і 35 А/дм² до 75 °С і 75 А/дм² кількість корозійних осередків зменшується з 15,98 до 11,51 шт/см². При цьому найменше значення - 10,72 шт/см² - досягається за температури 58 °С та струмі 59 А/дм².

Вплив параметрів осадження на адгезію покриття до основи показують дані досліджень [15], підвищення катодної щільності струму в процесі електролітичного осадження хрому супроводжується погіршенням зчеплення покриття з матеріалом основи. Натомість підвищення температури електроліту покращує міцність зв'язку хромового шару з підкладкою.

Рівень зчеплення хромового покриття з основним матеріалом можна визначити за формулою (у відсотках):

$$C_c = 75,91 - 0,26D_k + 0,29t. \quad (2.10)$$

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приміром, при електролітичному хромуванні за температури електроліту 35 °С та катодній щільності струму 35 А/дм² рівень адгезії покриття з матеріалом основи становить 79,69 % (розраховано за формулою 2.11). Зведені результати для різних комбінацій температури й струму наведені в таблиці додатка В. Із таблиці видно, що якість зчеплення хромового шару з основою коливається в межах 66,56...88,56 % у діапазоні параметрів, які забезпечують зносостійкі покриття. Зокрема, при одночасному підвищенні температури електроліту й щільності струму від 35 °С та 35 А/дм² до 75 °С та 75 А/дм², відповідно, спостерігається зростання адгезії з 76,96 % до 78,16 %.

Результати теоретичних розрахунків узгоджуються з численними науковими публікаціями, де підтверджено високу міцність зчеплення хромового покриття з металевою основою [18, 21]. При механічних навантаженнях, таких як вигин чи розтяг, хромовий шар демонструє поведінку, характерну для однорідного матеріалу разом із підкладкою. За даними [14], у межах температур 40–70 °С та щільності струму 30–100 А/дм², зчеплення покриття з основою перевищує 5·10⁶ Н/м². Дослідження [15] свідчать, що розривна міцність самого хромового шару становить 163–625 МПа, тоді як середнє значення зчеплення з основою дорівнює 300 МПа. Це вказує на те, що у певних умовах зв'язок покриття з основним металом може бути міцнішим, ніж сам осад хрому.

Варто зазначити, що попередня анодна активація поверхні в електроліті суттєво підвищує якість зчеплення покриття. Як довели досліди І. Я. Богороди, під час руйнування зразків шар хрому не відшаровується суцільно, а осипається у вигляді мікрочастинок, при цьому на поперечному шліфі залишаються залишки хрому, щільно з'єднані з основою.

З огляду на наведені дані, можна зробити висновок, що при точному дотриманні технологічного процесу нанесення електролітичного хрому, додаткові випробування на адгезію не є критично необхідними. Проте для

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

уточнення теоретичних розрахунків доцільним є проведення експериментального вивчення таких характеристик, як мікроструктура, мікротвердість, рівень внутрішніх напружень, корозійна стійкість і зносостійкість покриттів при різних режимах осадження.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма дослідження процесу електролітичного хромування.

Після вивчення сучасних методів підвищення зносостійкості елементів збиральних машин і виявлення їх обмежень, було прийнято рішення перевірити доцільність застосування електролітичного хромування для зміцнення сегментів і ножів. У межах дослідження також передбачено здійснення комплексної оцінки властивостей отриманих хромованих покриттів.

Для реалізації поставленої мети була розроблена наступна програма дослідницьких робіт [21, 22]:

Проведення металографічного аналізу і визначення мікротвердості хромованих зразків залежно від параметрів електролізу.

Дослідження залишкових напружень і визначення стійкості покриттів до корозійного впливу при різних умовах осадження.

Експериментальна оцінка зносостійкості зразків із нанесеним хромовим шаром, які є аналогами робочих органів.

Методика експериментів.

З урахуванням тривалості експлуатаційного ресурсу, швидкості переміщення і ефективної довжини тертя ножів та сегментів за один робочий цикл (подвійний хід або оберт), встановлено, що в польових умовах загальний шлях їх тертя до настання граничного зносу може досягати приблизно 570 км для сегментів і 2600 км для ножів.

Оскільки в лабораторному середовищі створити умови з таким тривалим циклом тертя є складним завданням, було прийнято рішення пришвидшити процес зношування шляхом підвищення концентрації абразивних частинок у середовищі та збільшення питомого тиску абразиву на

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхню досліджуваного зразка. Для цього планується використання триботехнічної установки типу 77МТ1.

У межах експериментальних досліджень аналізу піддаються як повноцінні хромовані ножі та сегменти, так і вирізані з них зразки з попередньо нанесеним захисним шаром. Нанесення покриття здійснюється методом електролітичного хромування в гальванічній ванні. В якості катода виступає оброблюваний робочий елемент, тоді як аноди виготовлені зі свинцю згідно з ГОСТ 1292-81 марки ССуА і містять від 2 до 7% сурми. Аноди та катода закріплюються на ізольованих підвісах.

Електроживлення процесу забезпечується джерелами струму типу «Power Electronics Supply 15V30A» та «НУ3020Е». Хромування виконується при змінних параметрах електроліту і підготовки поверхні, які обираються відповідно до вимог чинної нормативно-технічної документації.

Після осадження покриттів здійснюється вивчення їх мікроструктури, проводиться вимірювання мікротвердості, а також виконуються дослідження внутрішніх напружень і стійкості до корозійного впливу залежно від режимів хромування.

3.2 Методика проведення металографічного аналізу хромового покриття.

Металографічні дослідження виконувались із застосуванням оптичного мікротвердоміра ПМТ-3 (відповідно до ГОСТ 9450-76) та металографічного мікроскопа МІМ-8М Р50606-93 (ІСО 8598-93). Основною метою дослідження було проведення порівняльного аналізу мікроструктури та твердості хромових покриттів, які формувались за різних умов осадження, таких як температурний режим електроліту, катодна щільність струму і товщина осаду.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для вивчення рівномірності нанесення, товщини шару, пористості, текстурних характеристик і мікротвердості, виготовлялися мікрошліфи з ножів косарки типу КРН-2,1. Площини шліфів орієнтували як перпендикулярно, так і паралельно до напрямку хромування.

Процес виготовлення мікрошліфів здійснювався згідно з відповідними рекомендаціями [21]. Щоб уникнути деформації країв під час обробки, зразки заливалися епоксидною смолою. Під час заливки зразок розташовувався строго вертикально до основи форми.

Шліфування здійснювалося послідовно, з поступовим підвищенням зернистості абразиву від марки 100 до 600. Кожен етап тривав приблизно 30 секунд, при цьому після зміни зернистості напрямок шліфування повертали на 90°. Фінішне полірування виконувалось на сукняному крузі з нанесенням пасти для полірування, тривалістю 2 хвилини.

Завершальним етапом підготовки мікрошліфів було травлення поверхні. Обробка здійснювалася протягом 3–5 секунд у травному розчині, що складався з 5 % азотної кислоти (густина 1,41 г/см³) та 95 % етилового спирту.

На основі мікрофотографій перерізів, орієнтованих перпендикулярно до хромованого шару, оцінювались рівномірність нанесення, товщина покриття та наявність пор.

Особливості визначення мікротвердості електролітичних покриттів.

У процесі оцінювання твердості електролітично осаджених шарів використовуються значно менші навантаження на індентор, ніж при звичайних випробуваннях. Це пов'язано з тим, що нанесені покриття зазвичай мають незначну товщину, і при надмірному зусиллі результати можуть бути спотворені через вплив основного матеріалу підкладки. Водночас, чим більше прикладене навантаження, тим більш достовірним є результат. Тому на практиці вимірювання зазвичай розпочинають із більшого зусилля, поступово зменшуючи його, поки показники твердості для двох

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

послідовних навантажень не стануть майже ідентичними. Це свідчитиме про те, що основа не впливає на результат вимірювання.

У дослідженні мікротвердості хромових шарів застосовувався метод Вікерса, який ґрунтується на створенні відбитка за допомогою алмазного індентора у формі піраміди з кутом 136° між протилежними гранями. В якості навантаження було використано зусилля $0,196$ МПа, згідно з рекомендаціями джерела [21] і враховуючи вказані вище особливості. Показники мікротвердості обчислювалися шляхом усереднення довжин діагоналей відбитків, отриманих на поверхні покриттів.

Через відмінності у методах вимірювання твердості металів і покриттів, експериментальна перевірка твердості стандартних деталей не проводилася. Це пов'язано з тим, що результати, отримані різними способами, не завжди можна порівнювати між собою. Тому всі дослідження мікротвердості проводилися в уніфікованих умовах - із постійним навантаженням, однаковою тривалістю дії, типом індентора тощо.

Визначення твердості проводилося на мікрошліфах, виготовлених паралельно до шару покриття. Це пояснюється тим, що при поперечних шліфах твердість може змінюватися в залежності від відстані до основного металу, адже розміри зерен варіюються залежно від товщини осаду. Для аналізу використовувалися зразки з покриттями, сформованими за різних параметрів електролітичного осадження.

Значення мікротвердості визначалося як відношення прикладеного навантаження до умовної площі бокової поверхні відбитка, утвореного на зразку [21], у МПа:

$$H_{\mu} = \frac{1,854P}{d^2}, \quad (3.1)$$

Позначення: d - довжина діагоналі відбитка після зняття навантаження, мм; P - прикладене зусилля до індентора, МПа (у нашому випадку $0,196$ МПа).

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Показники мікротвердості, розраховані за формулою (3.1), були співставлені з еталонними значеннями, наведеними в джерелі [21]. Для забезпечення достовірності результатів випробувань мікротвердість визначали за п'ятьма окремими вм'ятинами на кожному зразку покриття, після чого обчислювали середнє значення. Оскільки розбіжності між окремими результатами виявились незначними, збільшення кількості відбитків виявилось недоцільним [22].

Щоб зменшити ймовірність похибок, довжини діагоналей кожної лунки вимірювали тричі, обчислюючи середнє значення. Очевидні відхилення при цьому усувалися. Мінімально допустима товщина покриття визначалася з використанням номограм, як зазначено в джерелі.

Процедура вимірювання діагоналей відбитків проводилася відповідно до існуючих методичних рекомендацій. Спочатку здійснювалося зчитування значень по діленнях барабанчика окуляр-мікрометра. Для цього центр перехрестя оптичної сітки переміщували по діагоналі від одного її краю до протилежного з фіксацією крайніх відліків. Переміщення проводилось строго по напрямку діагоналі.

Довжину діагоналі відбитка обчислювали як різницю між зафіксованими значеннями на крайніх точках відліку, що визначалося за відповідною формулою з джерела [21]:

$$Z_G = Z_1 - Z_2, \quad (3.2)$$

Де Z_G довжина горизонтальної діагоналі, визначена за шкалою окуляр-мікрометра (в умовних поділках); Z_1 значення відліку на правому кінці діагоналі; Z_2 значення відліку на лівому кінці діагоналі.

Згідно з методикою, викладеною в [21], мікротвердість обчислюється за середнім значенням двох діагоналей — горизонтальної та вертикальної. Для цього після вимірювання горизонтальної діагоналі необхідно повернути

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

окуляр-мікрометр на 90° та повторити вимірювання для вертикальної діагоналі.

Середньоарифметичне значення довжин обох діагоналей визначається за формулою:

$$Z = \frac{Z_G + Z_B}{2}, \quad (3.3)$$

де Z_B довжина вертикальної діагоналі, визначена за шкалою окуляр-мікрометра (в умовних поділках).

Переведення довжини діагоналі з умовних поділок окуляр-мікрометра в міліметри виконується за наступним співвідношенням $d = Zg$, мм, де g вартість однієї поділки барабана окуляр-мікрометра.

У дослідженні використовувався об'єктив типу ОЕ-6 з апертурою $A=0,65$. Для цього об'єктива вартість поділки барабана становила 0,31 мкм. Щоб визначити збільшення зображення відбитка на фотознімку, потрібно поділити довжину відбитка на фото на фактичну довжину діагоналі відбитка.

3.3 Методика визначення внутрішніх напружень у хромовому покритті.

Аналіз рівня і характеру залишкових напружень, що виникають після процесу електролітичного хромування, здійснювався за методом вимірювання деформації гнучкого катода. Метод базується на спостереженні змін вигину зразка до та після проведення електролітичного осадження. Як зображено на рисунку 3.1, перед хромуванням зразок укладається на дві опори, після чого його початкове положення точно фіксується за допомогою індикатора годинникового типу ИЧ-10 згідно з вимогами ГОСТ 577–68.

Після нанесення хромового покриття з одного боку зразка, внаслідок виникнення внутрішніх напружень, він починає вигинатися в певному напрямку. У якості основи використовувалася латунна пластина з плоско-

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

паралельною формою, розміром 60×5×2 мм. Ступінь прогину зразка визначалася за відповідною формулою (у міліметрах).

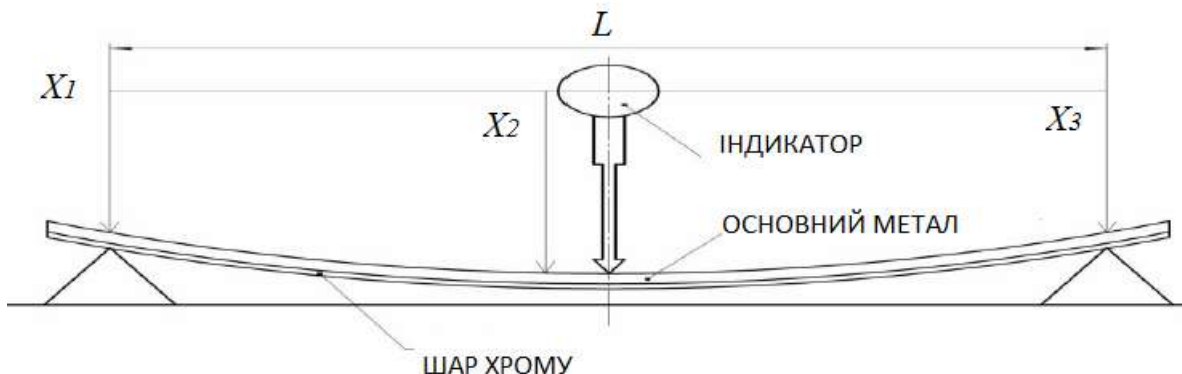


Рисунок 3.1 – Визначення величини прогину зразка.

$$f = \frac{x_1 + x_3}{2} - x_2. \quad (3.4)$$

Метою дослідження було визначити залежність характеру і величини внутрішніх напружень від параметрів електролітичного осадження — таких як густина струму, температура електроліту та товщина нанесеного шару. Для кожного режиму покриття хромування проводили тричі, після чого отримані результати усереднювалися для підвищення достовірності.

Розрахунок залишкових напружень у хромовому шарі проводився на основі величини прогину за формулою [22], в одиницях МПа:

$$\sigma = \frac{4E(h + h_1)^3 f}{3l^2 h h_1}, \quad (3.5)$$

Де E — модуль пружності хрому, МПа (приймається рівним 2500 МПа), h — товщина основи (латунної пластини), мм (у дослідженні — 2 мм), t — товщина хромового покриття, мм, f — величина вигину зразка, мм, l — відстань між опорами, мм (у дослідженні — 47 мм).

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

3.4 Методика оцінювання корозійної стійкості хромових покриттів.

Випробування на корозійну стійкість як хромованих, так і немодифікованих зразків проводились згідно з методичними рекомендаціями [22].

Корозійна стійкість покриттів та металів визначається низкою чинників, зокрема: властивостями і станом поверхневого шару та основного матеріалу, якістю адгезії між ними, рівномірністю покриття, його пористістю, структурою, наявністю неметалевих включень, а також залишковими внутрішніми напруженнями в шарі покриття.

Для вивчення корозійних процесів застосовують як якісні, так і кількісні методики. Якісні дозволяють лише зорієнтуватися щодо характеру та швидкості руйнування, тому використовуються як допоміжні. У свою чергу, кількісні підходи забезпечують точне визначення інтенсивності корозійного зносу. Найбільш поширеними з них є масовий, об'ємний і гальваностатичний методи. Серед них найбільш універсальними й достовірними вважаються масовий та об'ємний.

Суть масового методу полягає у фіксації зміни маси зразка до та після випробувань. Якщо продукти корозії можна повністю видалити з поверхні, швидкість руйнування визначається за втратою маси. Для цього продукти корозії видаляють механічним або хімічним способом. У випадках, коли видалення оксидного шару ускладнене, фіксується приріст маси. Показник масового зносу зазвичай виражається в $\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$ або $\text{мг/см}^2 \cdot \text{добу}$.

Корозійну стійкість хромованих покриттів визначають у лабораторних, експлуатаційних і польових умовах. У лабораторних умовах параметри експерименту точно задаються та контролюються, а тривалість випробувань скорочується завдяки штучному посиленню дії агресивних факторів: підвищення температури та вологості, збільшення концентрації реагентів або створення примусового перемішування середовища.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Натурні випробування проводяться в реальних природних умовах (грунт, атмосфера, морське середовище), однак вони мають суттєвий недолік — велику тривалість. Згідно з [22], мінімальна тривалість таких випробувань має становити не менше двох років.

З огляду на те, що лабораторні прискорені методики не завжди здатні повністю імітувати умови експлуатації, зазвичай обмежуються дією окремих чинників: вологості, температури, повітряного потоку чи хімічно активних речовин. Одним із найпростіших варіантів є метод занурення, рекомендований для первинної оцінки стійкості до корозійного впливу.

Суть випробувального методу полягає у вертикальному зануренні зразків у спеціальний розчин, який стимулює розвиток корозійного процесу. В якості корозійного середовища використовувався розчин хлориду натрію (NaCl) у дистильованій воді з концентрацією солі 30 ± 3 г/дм³. Зразки піддавались періодичному впливу - 10 хвилин перебування в розчині чергувалося з 50 хвилинами впливу повітряного середовища. Такий цикл повторювався 20 разів. Об'єм розчину при цьому складав 40 см³ на кожен квадратний сантиметр площі зразка. У разі забруднення розчину продуктами корозії його замінювали свіжим. Рівень рідини у ванні підтримувався на постійній висоті.

У випробуваннях брали участь зразки як з хромованою поверхнею, так і без захисного покриття. Згідно з вимогами [22], площа досліджуваної поверхні повинна була бути не меншою за 100 см². Площа одного ножа становила 150 см², а сегмента - 80 см². Було протестовано по три зразки кожного типу з покриттям і без нього, усього - 18 елементів (ножів та сегментів).

Для оцінки площі, ураженої корозією, на поверхню кожного зразка накладався прозорий шаблон із квадратною сіткою розміром 10×10 мм. Фіксувалася кількість квадратів, щонайменше на 50 % вкритих іржею, і обчислювалося їх відношення до загального числа квадратів на поверхні.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Результати обліку для всіх досліджених зразків узагальнювалися шляхом усереднення.

На рисунку 3.2 зображено зразки з нанесеними трафаретами, які використовувались для візуального аналізу ступеня корозійного ураження.

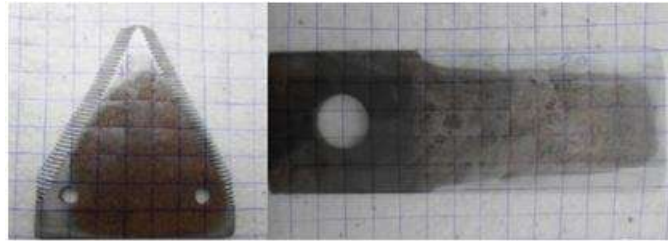


Рисунок 3.2 – Корозійне ураження зразків.

Ступінь корозії обчислюється за наступною формулою, %:

$$X = \frac{n_B}{N_B}, \quad (3.8)$$

де n_B - кількість квадратиків, що уражені іржею більше ніж 50 %; N_B - загальна кількість квадратиків на поверхні.

3.5 Методика дослідження зносостійкості.

Дослідження проводили на машині тертя горизонтального типу 77-МТ1. Для цього з ножів косарки ротаційного типу КРН-2.1 та сегментів ріжучого механізму зернозбирального комбайна ДОН-1500Б виготовляли зразки розміром 5×8×25 мм та 3×8×25 мм відповідно.

Зразки фіксували в патроні, який залишався нерухомим, і притискали до абразивного бруска з сталюю силою. Величина прикладеного зусилля становила 3 Н і була обрана з урахуванням геометричних характеристик ріжучих частин (товщина, кут загострення, гострота) та умов навантаження під час роботи (вид зрізаного матеріалу, швидкість руху елементів).

Кількість циклів зворотно-поступального руху фіксувалася за допомогою лічильника, розміщеного на панелі керування машини. Після

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначеного числа циклів проводили контрольні вимірювання маси та висоти кожного зразка.

На основі отриманих даних було складено таблиці та побудовано графіки, що дозволяють проаналізувати зміну інтенсивності зношування на різних етапах випробувань. Це дає змогу визначити фази припрацювання, стабільної експлуатації та критичного (катастрофічного) зносу елементів.

Порівняльне випробування зносостійкості хромованих та незміцнених зразків здійснювали на машині тертя. Експериментальна процедура відповідала алгоритму, наведеному в підрозділі 3.2, з тією різницею, що хромове покриття наносилося при зафіксованих оптимальних параметрах електролізу.

Для забезпечення об'єктивного порівняння довговічності стандартних і покритих хромом деталей проводився розрахунок коефіцієнта їх відносної зносостійкості.

Показник відносної зносостійкості обчислювався на основі зміни висоти зразків за наступним співвідношенням:

$$K = \frac{\Delta l_{et}}{\Delta l_{kr}}, \quad (3.9)$$

де Δl_{et} — (еталон) зміна розмірного параметра еталонного зразка без покриття; Δl_{kr} — відповідна зміна для зразка з хромовим покриттям.

Зношування металу може виникати внаслідок мікрорізання, повторюваних пластичних деформацій поверхні тертя або в результаті одночасного впливу корозійних і механічних чинників, особливо коли твердість металу нижча за твердість абразивних частинок. Електролітичний хром, завдяки своїй високій твердості, забезпечує підвищений опір до зношування, зокрема в умовах інтенсивного абразивного впливу.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКРИТТІВ

4.1 Результати аналізу металографічного.

У ході вивчення мікроструктури хромових покриттів були отримані металографічні зображення, які представлені на рис. 4.1 (поперечний мікрошліф) та рис. 4.2 (поздовжній мікрошліф). Для цього використовували зразки, виготовлені з ножів косарки КРН-2,1. Що стосується сегментів комбайна ДОН-1500Б, то металографічні дослідження не проводилися через труднощі в отриманні якісних відбитків внаслідок наявності насічок на їх поверхні.

Аналіз поперечних знімків показав, що при дотриманні оптимальних параметрів хромування спостерігається утворення рівномірного покриття з меншою кількістю пор (рис. 4.1). Це свідчить про підвищену однорідність шару, а отже — про однакову зносостійкість по всій площі поверхні (рис. 4.1, б). У свою чергу, осадки, наведені на рис. 4.1, а та 4.1, в, мають менш рівномірну структуру, що призводить до нерівномірного зносу через наявність зон зі зменшеною товщиною покриття.

Пористість є критичним фактором, що впливає на корозійну стійкість. Чим більше пор у покритті, тим вищий ризик корозійного руйнування. Крім того, пори виконують роль концентраторів напружень, що сприяє підвищенню крихкості шару та ініціюванню мікротріщин [14].

Перевага з точки зору зносостійкості підтверджується структурою поперечних мікрошліфів, яка вказує на більш однорідний розподіл покриття. Це, ймовірно, пов'язано з умовами осадження - зокрема температурою та товщиною шару. Збільшення товщини, як правило, сприяє розтріскуванню покриття, тоді як підвищення температури зменшує кількість газових включень, що, своєю чергою, знижує пористість. У розглянутому випадку

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

позитивний ефект температури на зменшення пір переважає над негативним впливом збільшення товщини шару.

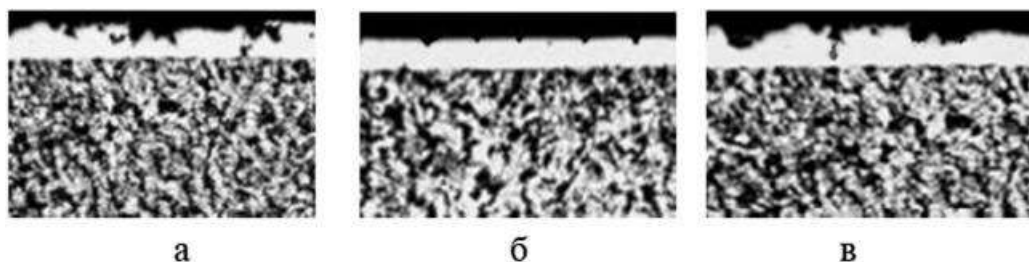


Рисунок 4.1 – Розподіл осаду хрому при осадженні (х 200):

а - 59 А/дм² та 62 °С, 28 мкм; б - 61 А/дм², 63 °С, 32 мкм; в - 63 А/дм², 64 °С, 36 мкм.

Найкращими з погляду зносостійкості є покриття, які характеризуються високою щільністю, твердістю та дрібнозернистою структурою. Металографічний аналіз поздовжніх мікрошліфів засвідчує, що при оптимальних режимах осадження формуються саме такі щільні та дрібнозернисті осади.

Це пояснюється тим, що обрані параметри електролізу сприяють переважанню швидкості зародження кристалів над швидкістю їх росту. Дрібна структура і щільність шару досягаються шляхом підвищення струмової густини, що зумовлює зростання перенапруги катода та збільшує кількість активних центрів кристалізації [18]. Водночас підвищення температури електроліту знижує катодну перенапругу, що призводить до зменшення твердості покриття та сприяє утворенню шаруватої структури, яка негативно впливає на експлуатаційні властивості. Таким чином, найбільш сприятливий результат досягається при раціональному поєднанні струмової густини та температури, що дозволяє формувати покриття з бажаними властивостями.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Результати металографічного аналізу свідчать, що належна комбінація електролітичних параметрів і товщини шару дозволяє отримати однорідне, дрібнозернисте та стійке до зношування покриття без значних пор чи тріщин.

Щодо вимірювання мікротвердості й визначення кратності збільшення зображень: на рис. 4.2, а, б і в продемонстровано поверхні з хромовим електролітичним покриттям, отриманим за різних умов осадження. Під час аналізу мікротвердості на зразках залишалися відбитки, за якими проводились вимірювання діагоналей. Розміри горизонтальної та вертикальної діагоналей, що задаються у поділках барабанчика окуляр-мікрометра, обчислювались згідно з формулою (3.2).

$$Z_G = 596 - 578 = 19, \quad Z_B = 611 - 591 = 20.$$

За формулою (3.3) знаходимо середньоарифметичну довжину діагоналей відбитка:

$$Z = \frac{18 + 20}{2} = 19.$$

За формулою (3.4) знаходимо натуральну величину діагоналей, $d = 0,00589$ мм.

За формулою (3.5) знаходимо кратність збільшення відбитка на фотографії:

$$k = \frac{2,37}{0,00589} = 403.$$

За формулою (3.1) знаходимо мікротвердість:

$$H_\mu = \frac{1,854 \cdot 0,196}{0,00589^2} = 10475.$$

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимірювання довжин діагоналей відбитків, розрахунок значень мікротвердості поверхонь та визначення кратності збільшення зображень для інших типів покриттів виконувались за тією ж методикою. Узагальнені результати дослідження мікротвердості покриттів, отриманих за різних режимів осадження, наведено в таблиці 4.1.

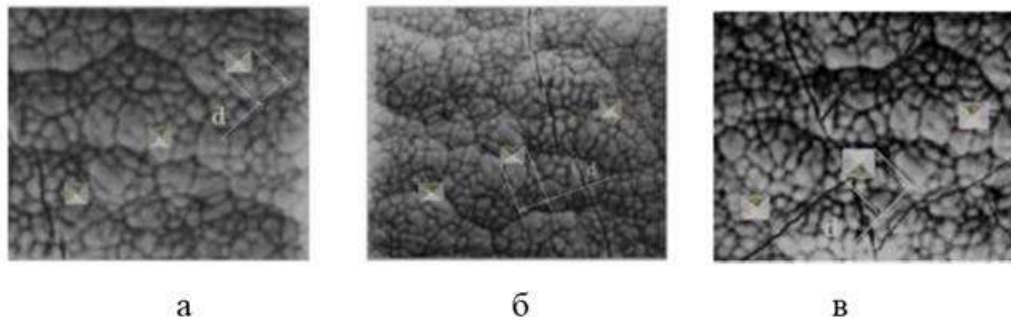


Рисунок 4.2 – Діагоналі відбитків та структура осадів за умови різного осадження:

а - $d = 6,2$ мкм, ($d' = 2,49$ мм (x402); 59 А/дм², 62 °С, 28 мкм,

б - $d = 6,51$, $d' = 2,64$ мм (x406); 61 А/дм², 63 °С, 32 мкм,

в - $d = 6,82$, $d' = 2,80$ мм (x410); 63 А/дм², 64 °С, 36 мкм.

Таблиця 4.1 - Результати вимірювання мікротвердості

№	Варіант покриття			z	Діагональ відбитку, мм		k	Мікро- твердість МПа
	t, °С	A, А/дм ²	h, мкм		Виміряна, d	На фото, d'		
1	61	57	24	19	0,00589	2,37	403	10475
2	62	59	28	20	0,00620	2,49	402	9453
3	63	61	32	21	0,00651	2,64	406	8574
4	64	63	36	22	0,00682	2,80	410	7813
5	65	65	40	23	0,00713	2,89	405	7148

Як свідчать дані з джерела [15], діапазони отримання покриттів із високою твердістю та покриттів із підвищеною зносостійкістю не повністю збігаються. Це підтверджується результатами вимірювань мікротвердості,

адже найбільш тверді хромові покриття не завжди демонструють найкращі показники зносостійкості.

На рисунку 4.3 наведено графічне представлення залежності мікротвердості покриттів (Мт) та зносу ножів, визначеного за результатами випробувань на машині тертя, у міліграмах (Ин), від варіантів нанесення покриттів. Варіанти покриттів позначені цифрами від 1 до 5 та відповідають умовам, наведеним у таблиці 4.1.

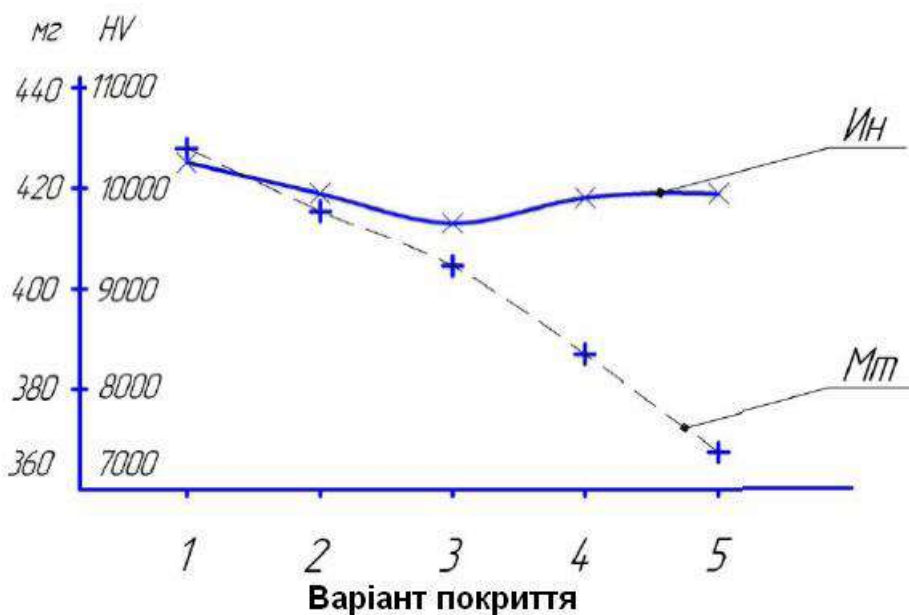


Рисунок 4.3 – Залежність зносу та мікротвердості покриття від варіанту осадження

4.2 Результати досліджень залишкових напружень у хромовому покритті.

Величину прогину пластини визначали шляхом трьох послідовних вимірювань, після чого обчислювали середнє значення. Отримані дані щодо деформації пластини на опорах та обраховані за формулами (3.4) і (3.5) значення залишкових напружень наведено в таблиці 4.2.

Найбільший вплив на рівень залишкових напружень у хромовому шарі має температура електроліту під час осадження. Водночас зміна товщини покриття та катодної щільності струму позначається на цих показниках у значно меншій мірі.

Аналіз результатів лабораторних випробувань показує, що як у випадку ножів, так і сегментів, відхилення технологічних параметрів від оптимальних значень (позначені в таблиці 4.2 курсивом і жирним шрифтом) призводить до зменшення внутрішніх напружень, проте темпи цього зниження значно сповільнюються.

Таблиця 4.2 – Величини напружень і стріли прогину.

№	Варіант покриття (ніж / сегмент)			Величина прогину, мм		Внутрішні напруження на розтяг, МПа	
	<i>t</i> , °C	<i>A</i> , А/дм ²	<i>h</i> , мкм	ніж	сегмент	ніж	сегмент
1	61/60,5	57/56,5	24/23	1,91	1,95	490	520
2	62/61	59/58	28/26	1,99	2,11	440	500
3	63/61,5	61/59,5	32/29	2,11	2,11	410	450
4	64/62	63/61	36/32	2,30	2,16	400	420
5	65/62,5	65/62,5	40/35	2,48	2,24	390	400

Результати експериментів дають підстави стверджувати, що залишкові напруження не мають істотного впливу на зносостійкість хромованих пластин. Це підтверджується тим, що найменші втрати маси зразків ножів та сегментів зафіксовано при температурах осадження 63 і 61,5 °C, товщинах покриття 32 і 29 мм та щільності струму 61 і 59,5 А/дм² відповідно, хоча саме ці умови не відповідають мінімальним значенням залишкових напружень.

Зі зростанням товщини хромового шару, температури електроліту та щільності струму, що подається, спостерігається поступове зниження рівня внутрішніх напружень.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

На графіку, наведеному на рис. 4.4, зображено залежність залишкових напружень у хромованому шарі ножів і сегментів (Нн, Нс), а також величини їх зношування (Ин, Ис), вираженого у міліграмах, від типу покриття. Кожен із п'яти варіантів хромування відображає окрему комбінацію параметрів, що наведені в таблиці 4.2.

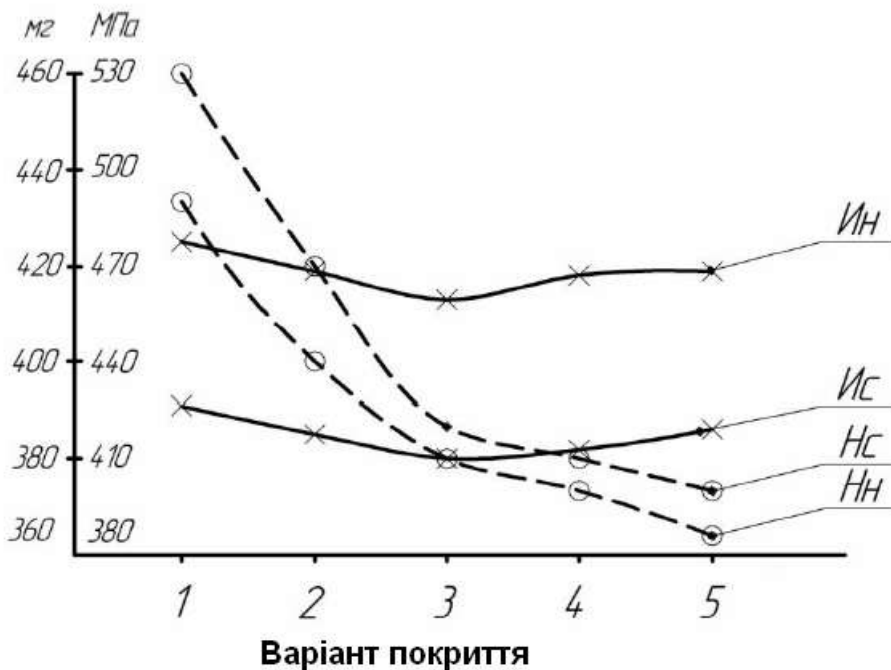


Рисунок 4.4 – Залежність зносу та внутрішніх напружень покриттів від варіанту осадження

4.3 Результати випробувань хромового покриття на корозійну стійкість.

Випробування на стійкість до корозії проводилися відповідно до алгоритму, наведеного в розділі 3. Як зазначалося раніше, дослідженню піддавалися ножі та сегменти з електролітичним хромовим покриттям, а також зразки без додаткового захисного шару. Оцінка корозійної стійкості здійснювалася для п'яти типів покриттів. Для кожного типу покриття було виготовлено та протестовано по три зразки. Середні значення площі та відсотка пошкодження поверхні наведено в таблиці 4.3.

Зображення лицьових поверхонь сегментів і ножів з різними варіантами покриттів та без зміцнюючого шару після випробувань на корозійну стійкість подані на рис. 4.5 і 4.6.

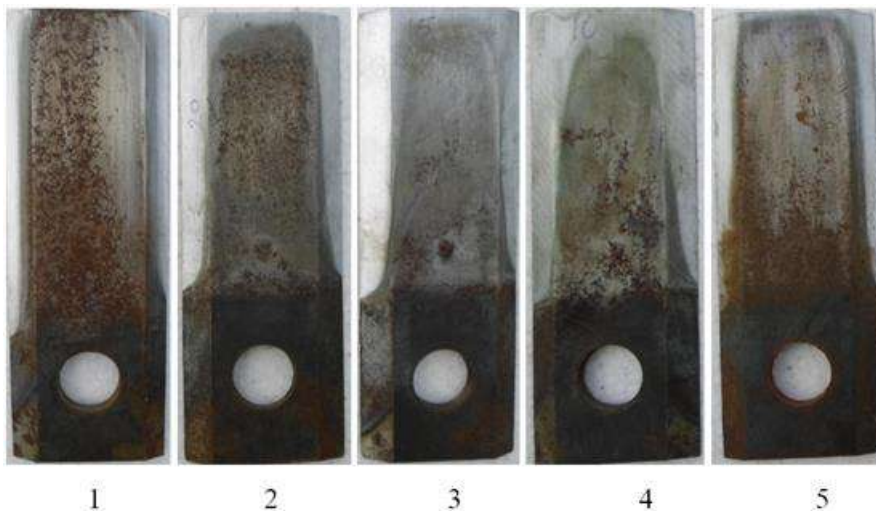


Рисунок 4.5 – Корозійна стійкість ножів.

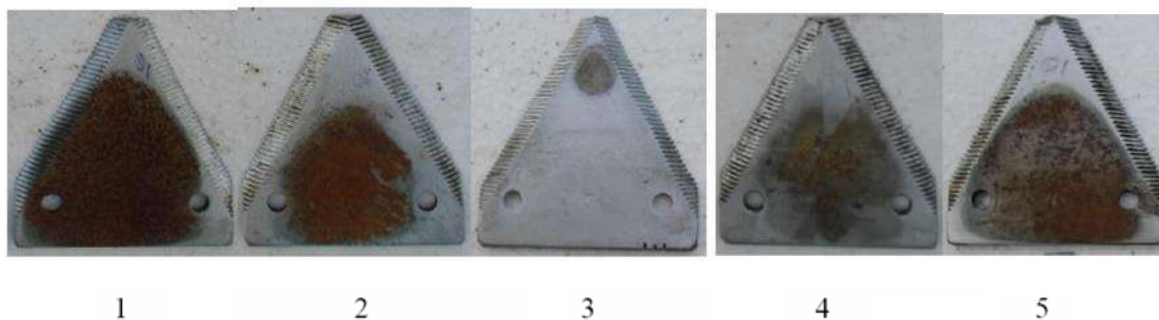


Рисунок 4.6 – Корозійна стійкість сегментів.

Таблиця 4.3 – Зведені результати корозійної стійкості виробів.

№	Варіант покриття (ніж / сегмент)			Число квадратів вкритих іржею, шт		Ступінь враження корозією, %	
	t , °C	A , А/дм ²	h , мкм	ніж	сегмент	ніж	сегмент
1	61/60,5	57/56,5	24/23	54	25	36,0	31,3
2	62/61	59/58	28/26	37	18	24,7	22,5
3	63/61,5	61/59,5	32/29	12	6	8,0	7,5
4	64/62	63/61	36/32	24	11	16,0	13,8
5	65/62,5	65/62,5	40/35	39	22	26,0	27,5
6	Без зміцнення			98	48	65,3	60,0

Позначення до таблиці: t – температура електроліту, A – густина струму, h – товщина нанесеного покриття.

На рисунку 4.7 наведено графік, що відображає залежність ступеня корозійного ураження сегментів і ножів (% с, % н), а також величини їх зносу, вираженої в міліграмах (I_n , I_c), від типу використаного покриття. Варіанти покриттів пронумеровано від 1 до 5.

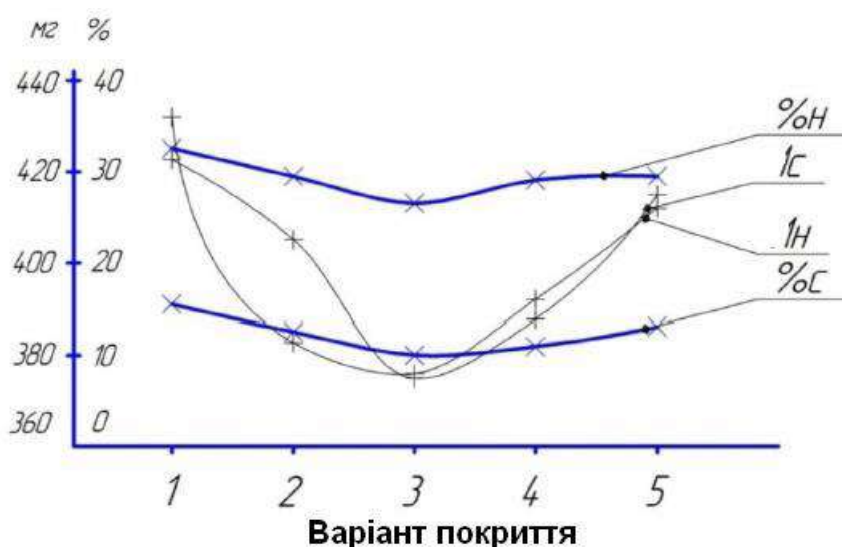


Рисунок 4.7 – Ступінь ураження корозією та знос сегментів і ножів в залежності від варіанту осадження.

Аналіз результатів проведених експериментів показує, що покриття, сформовані за оптимальних режимів нанесення (рядок 3 таблиці 4.3), демонструють найвищу корозійну стійкість. Для зразків ножів та сегментів без покриття площа корозійного ураження становила відповідно 65,3 % та 60,0 %, що приблизно у вісім разів перевищує пошкодження деталей з покриттям, отриманим за оптимальних параметрів.

Такий ефект пояснюється тим, що покриття, осаджені при правильно підібраних умовах електролізу, відрізняються більшою однорідністю та

меншою кількістю пір. Цей висновок підтверджується й результатами металографічного аналізу.

4.4 Результати випробувань на зносостійкість.

Лабораторні дослідження зносостійкості, виконані за методикою, описаною у відповідному пункті, відображені в таблицях 4.4 та 4.5.

У дужках у таблицях наведені середні значення зменшення маси та висоти зразків за весь період випробувань у відсотковому вираженні.

Таблиця 4.4 – Середні зміни висоти та маси зразків ножів.

Кількість ходів абразиву	Зразки без покриттів		Зразки з покриттям	
	Вага, гр.	Висота, мм	Вага, гр.	Висота, мм
0	6,49	8,04	6,46	8,18
200	6,27	7,17	6,42	7,86
400	6,06	6,49	6,37	7,54
600	5,93	5,89	6,30	7,22
800	5,85	5,47	6,22	6,90
1000	5,77	5,23	6,13	6,59
Загальна зміна ваги, г	0,71 (10,9)	2,81 (34,9)	0,33 (5,1)	1,59 (19,4)

Результати проведених випробувань свідчать, що після 1000 подвійних проходів абразивного бруска середня втрата маси зразків без покриття становила 0,71 г, що відповідає 10,9 % від початкової маси. Для хромованих зразків цей показник був значно меншим: 0,33 г, або 5,1 % від початкової маси. Таким чином, різниця у зменшенні ваги між стандартними та зміцненими зразками склала 0,38 г, що відповідає 46,5 %.

Щодо зміни висоти, то після аналогічних випробувань зразки без покриття втратили в середньому 2,81 мм (34,9 % від початкового розміру), тоді як для хромованих зразків цей показник становив 1,59 мм (19,4 % від

початкової висоти). Різниця між цими значеннями досягла 1,22 мм, або 56,6 %.

Результати випробувань сегментів на зносостійкість.

Як видно з даних таблиці 4.5, після 1000 подвійних проходів абразивного бруска маса сегментів без покриття зменшилася в середньому на 0,57 г, тоді як для хромованих зразків — на 0,28 г. Різниця у втраті маси між цими групами становить 0,29 г, що відповідає 49,1 %.

Таблиця 4.5 – Середні зміни висоти та маси зразків сегментів

Кількість ходів абразиву	Зразки без покриттів		Зразки з покриттям	
	Вага, гр.	Висота, мм	Вага, гр.	Висота, мм
0	3,97	8,25	4,01	8,08
200	3,79	7,02	3,95	7,71
400	3,63	6,10	3,89	7,35
600	3,53	5,22	3,84	6,99
800	3,46	4,47	3,78	6,63
1000	3,40	5,20	3,73	6,27
Загальна зміна ваги, г	0,57 (14,4)	3,04 (36,8)	0,28 (7,0)	1,81 (22,4)

Випробування також показали, що після 1000 подвійних проходів абразивного бруска по поверхні зразків без покриття їхня висота зменшилася в середньому на 3,04 мм, що становить 36,8 % від початкового розміру. Для хромованих зразків у тих самих умовах середнє зменшення висоти склало 1,81 мм, або 22,4 % від початкової величини. Таким чином, різниця у зміні лінійних розмірів (висоти) між стандартними та зміцненими зразками дорівнює 1,23 мм, що відповідає 59,5 %.

На рисунках 4.8 та 4.9 наведено зображення ножів і сегментів після випробувань на зносостійкість, проведених на машині тертя.

За еталон прийнято зразки без покриття, для яких коефіцієнт зносостійкості дорівнює 1. Використовуючи формулу (3.9), було розраховано

коефіцієнти зносостійкості хромованих зразків на основі змін їх маси та висоти. Отримані значення наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Коефіцієнти зносостійкості хромованих зразків.

Коефіцієнт зносостійкості			
По вазі		По висоті	
ніж	сегмент	ніж	сегмент
2,15	2,04	1,78	1,68



Рисунок 4.8 – Зразки ножів.



Рисунок 4.9 – Зразки сегментів.

4.5 Порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних показників.

Проведено дослідження мікротвердості покриттів залежно від режимів електролітичного хромування.

У таблиці 4.7 наведено результати теоретичних розрахунків і лабораторних випробувань мікротвердості покриттів при різних умовах їх осадження.

Колонка «Розрахункова мікротвердість» заповнена на основі результатів, отриманих у розділі 2, де значення визначалися залежно від температури електроліту та густини струму (дані наведені в таблиці 1 додатка А).

Колонка «Виміряна мікротвердість» містить результати експериментальних досліджень, виконаних у лабораторії та описаних у п. 4.1.

Порівняння результатів показало, що зі збільшенням густини струму, температури електроліту та товщини хромового шару спостерігається зниження мікротвердості покриттів. Аналіз таблиці свідчить, що середня різниця між теоретичними та експериментальними значеннями становить 0,89 ГПа, або 10,2 %.

Ймовірною причиною такої розбіжності є те, що при теоретичних розрахунках не враховувалася товщина покриття, яка, так само як і густина струму та температура електроліту, впливає на показники мікротвердості хромового шару.

Таблиця 4.7 – Результати експериментальних і теоретичних значень мікротвердості покриттів.

№	Варіант покриття			Мікротвердість, ГПа		Різниця, ГПа
	$t, ^\circ\text{C}$	$A, \text{A}/\text{дм}^2$	$h, \text{мкм}$	Розрахункова	Експериментальна	
1	61	57	24	9,56	10,48	0,92
2	62	59	28	9,57	9,45	0,12
3	63	61	32	9,58	8,57	1,01
4	64	63	36	9,59	7,81	1,78
5	65	65	40	9,6	7,15	2,45
Середнє значення				9,58	8,69	0,89

У таблиці 4.8 наведено результати теоретичних розрахунків та експериментальних випробувань корозійної стійкості покриттів за різних умов їх осадження.

Колонка «Розрахункове число центрів корозії» сформована на основі даних, отриманих шляхом теоретичного визначення корозійної стійкості хромових покриттів залежно від температури електроліту та густини струму (див. таблицю 2 додатка А).

Колонка «Ступінь ураження корозією» містить результати лабораторних досліджень, описаних у п. 4.3.

Попри різницю в одиницях вимірювання між розрахунковими показниками (число центрів корозії) та експериментальними даними (ступінь ураження), аналіз отриманих результатів демонструє достатньо високу відповідність у визначенні корозійної стійкості покриттів при різних режимах їх нанесення.

Таблиця 4.8 – Результати корозійної стійкості виробів.

№	Варіант покриття			Розрахункове число центрів корозії, шт./см ²	Ступінь ураження корозією, %
	t , °C	A , А/дм ²	h , МКМ		
	61	57	24	9,88	36,0
	62	59	28	9,68	24,7
	63	61	32	9,98	8
	64	63	36	10,30	16,0
	65	65	40	10,71	26,0

Відповідність результатів розрахунків та експериментальних даних також ілюструють рисунки 4.10 і 4.11. З них видно, що за теоретичними даними максимальна корозійна стійкість покриттів досягається при густині струму 59 А/дм² та температурі електроліту 62 °C, тоді як за результатами

лабораторних досліджень - при густині струму 61 А/дм² і температурі 63 °С. Виявлена різниця може бути зумовлена тим, що під час розрахункової оцінки корозійної стійкості не враховувалася товщина хромового шару, яка також впливає на його здатність протидіяти корозії.

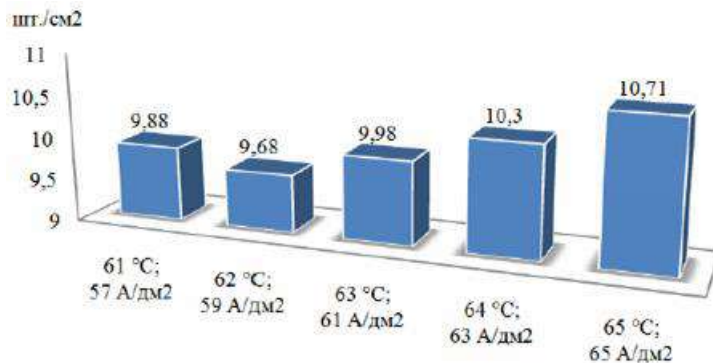


Рисунок 4.10 – Розрахункова корозійна стійкість покриттів.

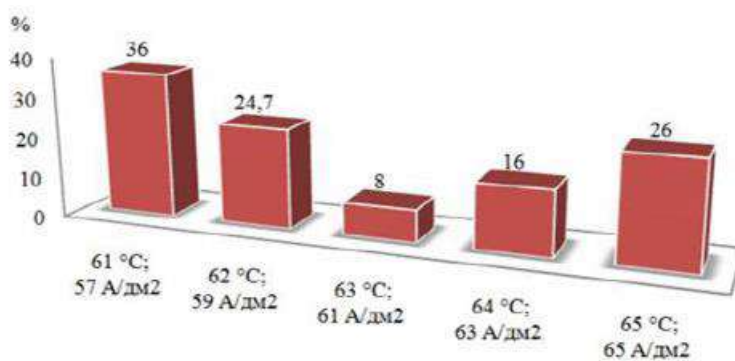


Рисунок 4.10 – Експериментальна корозійна стійкість покриттів.

Найбільший вплив на зносостійкість хромованих ножів і сегментів має товщина хромового шару. Для ножів щільність струму та температура електроліту впливають на процес зношування однаковою мірою, тоді як для сегментів щільність струму є більш значущим фактором. В обох випадках характер впливу однаковий: збільшення товщини покриття, густини струму та температури електроліту призводить до зменшення зносу, а отже, до підвищення зносостійкості зразків.

Підвищення температури електроліту понад 66 °С викликає його інтенсивне випаровування та, як наслідок, збільшення витрати. При

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

щільності струму більше 67 A/дм^2 на тонких кромках лез відбувається їх перегрів і «обгорання», оскільки локальна густина струму в цих зонах стає надмірно високою. Збільшення товщини хромового шару понад 44 мкм призводить до інтенсивного утворення тріщин і подальшого відшаровування покриття.

Зростання товщини шару сприяє збільшенню кількості тріщин, тоді як підвищення температури електроліту зменшує кількість газових бульбашок і, відповідно, пір у покритті. Позитивний ефект від зниження пористості при підвищенні температури є більш помітним, ніж негативний вплив збільшеної товщини шару.

Внутрішні напруження у хромових покриттях не мають істотного впливу на зносостійкість ножів і сегментів, оскільки за оптимальних умов нанесення покриття їх величина не є критичною.

Покриття, сформовані за оптимальних параметрів хромування, демонструють найкращу корозійну стійкість. Для деталей без покриття площа ураження корозією становить $65,3 \%$ для ножів та $60,0 \%$ для сегментів, що приблизно у вісім разів перевищує показники зразків з оптимальним покриттям. Це пояснюється більшою однорідністю та меншою пористістю шару, що підтверджується металографічними дослідженнями.

Після 1000 подвійних проходів абразивного бруска зразки з ножів без покриття втратили в середньому $0,71 \text{ г}$ маси ($10,9 \%$ від початкової), тоді як хромовані — $0,33 \text{ г}$ ($5,1 \%$). Різниця становить $0,38 \text{ г}$, або $46,5 \%$. Зменшення висоти в тих же умовах склало $2,81 \text{ мм}$ ($34,9 \%$) для зразків без покриття та $1,59 \text{ мм}$ ($19,4 \%$) для хромованих, що відповідає різниці у $1,22 \text{ мм}$ або $56,6 \%$.

Для сегментів втрата маси після аналогічних випробувань становила $0,57 \text{ г}$ для зразків без покриття та $0,28 \text{ г}$ для хромованих, тобто різниця склала $0,29 \text{ г}$ ($49,1 \%$). Зменшення висоти дорівнювало відповідно $3,04 \text{ мм}$ ($36,8 \%$) і $1,81 \text{ мм}$ ($22,4 \%$), що відповідає різниці у $1,23 \text{ мм}$, або $59,5 \%$.

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Проведені дослідження показали, що при одночасному підвищенні температури електроліту та густини струму від 35 °С і 35 А/дм² до 75 °С і 75 А/дм² спостерігаються такі зміни:

- мікротвердість хромових покриттів зменшується з 10,2 до 9,4 ГПа;
- кількість корозійних центрів знижується з 15,98 до 11,51 шт./см²;
- міцність зчеплення з основою зростає з 76,96 % до 78,16 %.

Розрахунки підтверджують, що швидкість зношування хромованих лез у 1,83 раза менша, ніж у лез без покриття.

2. Встановлені залежності зносостійкості сегментів жатки ДОН-1500Б та ножів косарки КРН-2,1 від параметрів нанесення хромування свідчать:

- вплив товщини шару хрому, густини струму та температури електроліту на стійкість до зносу має однакову тенденцію для обох типів деталей: з підвищенням цих показників зносостійкість зростає;

- найбільший вплив має товщина хромового шару, але її надмірне збільшення спричиняє активніше розтріскування покриття;

- підвищення температури електроліту зменшує кількість газових бульбашок, а отже й пористість шару, однак водночас призводить до інтенсивнішого випаровування електроліту та зниження твердості покриттів;

- зростання густини струму сприяє формуванню щільного дрібнозернистого покриття, проте занадто високі значення викликають підгоряння крайок лез.

3. Розрахунково-експериментальним методом визначено оптимальні режими електролітичного хромування робочих органів збиральних машин:

- для сегментів: температура електроліту 61,5 °С, густина струму 59,5 А/дм², товщина шару 29 мкм;

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- для ножів: температура електроліту 63 °С, густина струму 61 А/дм², товщина шару 32 мкм.

4. Експериментальні випробування засвідчили, що:

- покриття, сформовані за оптимальних параметрів, відзначаються рівномірною дрібнозернистою структурою та меншою кількістю дефектів (пор і тріщин), що підвищує їх корозійну та зносостійкість;

- внутрішні напруження та мікротвердість не є визначальними чинниками стійкості до зносу, оскільки навіть покриття з мінімальними напруженнями та максимальною твердістю не завжди мають найкращі експлуатаційні властивості;

- середній приріст зносостійкості деталей з оптимальним хромуванням становить 1,78 рази для сегментів і 1,95 рази для ножів порівняно з необробленими зразками.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткаченко О. В. Економічні показники електрохімічного хромування в стандартних електролітах та електролітах, що містять хром (III) [Текст] / О. В. Ткаченко, О. П. Кваша, Б. А. Морозов // Promising materials and processes in applied electrochemistry – 2020 : monograph / ed.: V. Z. Barsukov, Yu. V. Borysenko, V. G. Khomenko, O. V. Linyucheva ; editor-in-chief V. Z. Barsukov. - Kyiv : KNUTD, 2020. - С. 124-130.
2. Паладійчук Ю.Б. Відновлення ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин нанесенням зносостійких покриттів / Паладійчук Ю.Б., Мельник Ю.А. // Техніка та енергетика. 2021. Вип. 12 (4). С. 43-52.
3. Бабій А.В. Дослідження ресурсу роботи спинки ножа сегментно-пальцевого різального апарату/ Бабій А.В., Попович П.В., Матвійшин А.Й., Бабій М.В. // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 2015. Вип. 45-1, с. 120–126.
4. Banni, O., Popyk, P., & Savko, D. (2022). Failure analysis of the segment finger bar mower and force interaction of the blade segment with the plant stem. *Machinery & Energetics*, 13(3), 17-24.
5. Jamel Katsitadzi, Georgy Kutelia. (2025). Restoration of working bodies and parts of agricultural machinery by submerged arc welding using a modified installation using local raw materials. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*. Vol. 69 (2025), Issue 1, pg(s) 6-8
6. Бабій А.В. Підвищення ефективності різання при роботі сегментно-пальцевого різального апарату / Бабій А.В., Цепенюк М.І. // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2017, Вип. 47-1, с. 59–64.
7. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст]: навч. посіб. / А.Г.Фесенко та [ін.] – Д.: РВВ ДНУ, 2015. – 104 с.

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

8. Петрик Е. А. Особливості електролітичного хромування та їх відображення в технологічному процесі [Електронний ресурс] / Е. А. Петрик, Ю. В. Борисенко // Технології та дизайн. - 2020. - № 1 (34). - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2020_1_17.

9. Ковальчук Ю.О. Застосування лазерного зміцнення деталей автомобільного транспорту в АПК / Ю.О. Ковальчук, І.О. Лісовий // Сільськогосподарські машини. – 2021. - № 46, С. 49-57.

10. Слюсар М. А. Сучасні електроліти та методи хромування [Електронний ресурс] / М. А. Слюсар, О. А. Крюкова // Технології та дизайн. - 2019. - № 3 (32). - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2019_3_12.

11. Гондзьо О. В. Особливості гальванічного хромування в електролітах різного складу [Електронний ресурс] / О. В. Гондзьо, О. В. Кислова // Технології та дизайн. - 2018. - № 2 (27). - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2018_2_19.

12. Калюжин О. С. Порівняльна характеристика промислових електролітів хромування [Електронний ресурс] / О. С. Калюжин, О. В. Кислова // Технології та дизайн. - 2020. - № 4 (37). - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2020_4_15.

13. Слюсар М. А. Прогресивні електроліти хромування / М. А. Слюсар // Наукові розробки молоді на сучасному етапі : тези доповідей XVIII Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів (18-19 квітня 2019 р., Київ). - Київ : КНУТД, 2019. - Т. 2 : Мехатронні системи і комп'ютерні технології. Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища. - С. 498-499.

14. Крюкова О. Вплив технологічних параметрів процесу електролітичного хромування на якість утворених покриттів. / О. Крюкова, А. Вакулік // Modern engineering and innovative technologies, 2023. – С. 101-107.

					КВРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15. Роп'як Л. Я. Вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на експлуатаційні властивості покриттів / Л. Я. Роп'як, М. В. Шовкопляс, В. С. Вітвицький, Ю. Й. Стрілецький // Bulletin of Sumy National Agrarian University The series Mechanization and Automation of Production Processes, 2021. - 45(3). – С.48-56

16. Ткаченко О. В. Ефективні основний та допоміжний електроліти в технології чорного хромування [Електронний ресурс] / О. В. Ткаченко, В. О. Дерлюк // Технології та дизайн. - 2019. - № 4 (33). - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2019_4_14.

17. Навчально-методичний посібник з курсу «Матеріалознавство і обробка матеріалів» для студентів напряму 6.050202 Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології / Крамар Г.М., Бодрова Л.Г., – Тернопіль, ТНТУ, 2016.- 84 с.

18. Матеріалознавство. Навчальний посібник: навчально-методичний комплекс для студентів денної і заочної форм навчання / А.В. Галико, О.В. Кузик, В.М. Кропівний, А.В. Кропівна, Л.А. Молокост – Кіровоград: КОД, 2015. – 168 с.

19. Обертюх, Р. Р. Триботехніка машинобудівної галузі : навчальний посібник [Електронний ресурс] / Р. Р. Обертюх, А. В. Слабкий. – [Вид. 2-ге, перероб. та доп.]. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 123 с.

20. Бабій А.В., Дослідження кінематичних параметрів приводного механізму сегментно-пальцевого різального апарату. / А.В. Бабій, М.В. Бабій, А.Й. Матвіїшин // Вісник ХНТУСГ, 2013. – Вип. 134, с. 123–129.

21. Савуляк В. І. Методи та засоби дослідження складу, структури та властивостей матеріалів : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2021. 76 с.

22. Триботехніка і надійність машин : навчальний посібник / Ю. О. Харламов та ін. Сєверодонецьк : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2021. 184 с.

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КвРМТВА. 24344.01.12.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88