

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ
ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З.ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «ОБҐРУНТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ
ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОТИ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ
ПОКРАЩЕННЯ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ»

Виконав: студент VI курсу групи Маш-61

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

Назар ГУРЕЛИЧ
(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент Сергій БЕРЕЗОВЕЦЬКИЙ
(Прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.
“ _____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

ГУРЕЛИЧУ Назару Миколайовичу

1. Тема роботи: «Обґрунтування інноваційних підходів до підвищення довговічності роботи технічних засобів на основі покращення лакофарбових покриттів»

Керівник роботи: Березовецький Сергій Андрійович, к.т.н., доцент
Затверджена наказом по університету №140/К-с від 28.02.2025

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 1.12.2025 року

3. Вихідні дані до робіт: довідкова література, каталоги, методики відновлення лакофарбових покриттів, технічні характеристики лакофарбових покриттів, інструкції з охорони праці.

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

4.1. Стан питання і завдання досліджень

4.2. Теоретичні основи вдосконалення технологічного процесу ремонтного фарбування сільськогосподарських машин

4.3. Програма та методика експериментальних досліджень

4.4. Результати експериментальних досліджень

4.5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки і пропозиції

5. Перелік графічного ілюстраційного матеріалу:

Графічна частина до кваліфікаційної роботи оформляється у вигляді презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 4	<i>Березовецький С.А., к.т.н., доцент кафедри машинобудування</i>			
5	<i>Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва</i>			

7. Дата видачі завдання «28» лютого 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	<i>Стан питання та задачі досліджень</i>	28.02.25-25.04.25	<i>Виконано</i>
2	<i>Теоретичні основи вдосконалення технологічного процесу ремонтного фарбування сільськогосподарських машин</i>	28.04.25-27.06.25	<i>Виконано</i>
3	<i>Програма та методика експериментальних досліджень</i>	30.06.25-29.08.25	<i>Виконано</i>
4	<i>Результати експериментальних досліджень</i>	01.09.25-26.09.25	<i>Виконано</i>
5	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	29.09.25-31.10.25	<i>Виконано</i>
6	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	03.11.24-14.11.25	<i>Виконано</i>
7	<i>Оформлення графічної частини</i>	17.11.25-28.11.25	<i>Виконано</i>

Студент _____ Назар ГУРЕЛИЧ
(підпис)

Керівник роботи _____ Сергій БЕРЕЗОВЕЦЬКИЙ
(підпис)

УДК 621.793:620.197

Обґрунтування інноваційних підходів до підвищення довговічності роботи технічних засобів на основі покращення лакофарбових покриттів. Гурелич Назар Миколайович. Кафедра машинобудування. Дубляни, Львівський НУВМБТ. 2025.

70 с. текст. част., 23 рис., 5 табл., 22 літературних джерел.

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню довговічності машинобудівних виробів шляхом удосконалення технології нанесення лакофарбових покриттів. Експлуатація сучасної машинобудівної техніки потребує ефективного захисту поверхонь від корозії, механічного зношування та дії агресивних чинників навколишнього середовища.

У роботі проведено аналіз сучасних лакофарбових матеріалів і технологічних процесів формування захисних покриттів, а також визначено основні фактори, що впливають на їхню довговічність та експлуатаційну надійність.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованих технологічних рішень, які забезпечують покращення адгезії, підвищення зносостійкості та стійкості покриттів до атмосферних, механічних та хімічних впливів. Встановлено, що оптимізовані методи нанесення сприяють подовженню строку служби лакофарбових систем.

Практична цінність роботи полягає у можливості впровадження удосконалених технологій нанесення покриттів на підприємствах машинобудівної галузі, що дозволяє збільшити ресурс роботи готових виробів, скоротити витрати на технічне обслуговування і ремонт та підвищити загальну ефективність виробничих процесів.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	10
1.1 Значення лакофарбових покриттів у забезпеченні довговічності машин та обладнання	10
1.2 Лакофарбові матеріали: характеристика, визначення та класифікація	11
1.3. Структура лакофарбового покриття.....	13
1.4. Історія виникнення ЛФМ для використання у сільському господарстві.....	15
1.5. Розвиток лакофарбових матеріалів у машинобудуванні	16
1.6. Аналіз сучасних технологій нанесення ЛФП.....	18
1.7. Дослідження лакофарбового покриття для забезпечення надійності машин та обладнання	20
Висновки до розділу 1	23
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ФАРБУВАННЯ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ	25
2.1 Трибологічний аналіз процесів тертя і зношування лакофарбових покриттів..	25
2.2 Обґрунтування параметрів ковзного тертя в системі взаємодії «лакофарбове покриття – рослинна маса».....	31
2.3 Методика визначення інтенсивності зношування лакофарбових покриттів робочих поверхонь жатки.....	33
2.4 Процес зношування ЛФП під час тертя поверхні жатки з рослинною масою. .	35
Висновки до розділу 2	39
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	40

3.1 Методика експериментальних досліджень та випробування лакофарбових покриттів	40
3.2 Підготовка реагентів та робочих розчинів для проведення фосфатування	41
3.3 Методика визначення вільної та загальної кислотності	41
3.4 Підготовка зразків перед проведенням фосфатування	42
Висновки до розділу 3	50
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	51
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	59
5.1. Охорона праці під час роботи з обладнанням для нанесення лакофарбових покриттів	59
5.2. Засоби індивідуального захисту під час виконання робіт із лакофарбовими матеріалами.	61
5.3. Основи фізіології, гігієни праці та виробничої санітарії.	62
5.4. Основні вимоги до виробничих будівель та споруд.....	64
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69

ВСТУП

Сучасні умови експлуатації машин та обладнання характеризуються підвищеним рівнем зовнішніх навантажень і впливів, що зумовлює необхідність забезпечення високоефективного захисту їхніх поверхонь від корозійних процесів, абразивного зношування та дії агресивних чинників довкілля. Лакофарбові покриття, як один із найбільш поширених способів поверхневого захисту у машинобудуванні, відіграють ключову роль у формуванні довговічності, експлуатаційної надійності та збереження технічних характеристик виробів упродовж усього строку їх служби. Удосконалення технологій нанесення таких покриттів є важливою складовою підвищення ресурсу роботи машин та оптимізації витрат на їх технічне обслуговування і ремонт.

Зростаючі вимоги до експлуатаційних властивостей машинобудівної продукції та конкуренція на ринку захисних матеріалів сприяють активному розвитку нових технологічних рішень, спрямованих на покращення фізико-механічних, адгезійних та антикорозійних характеристик лакофарбових покриттів. Для формування довговічних систем необхідно враховувати комплекс чинників, серед яких адгезійна взаємодія «основа–покриття», стійкість до атмосферних та хімічних впливів, механічна міцність, параметри полімеризації матеріалу та якість формування поверхневого шару.

Машини та обладнання в процесі експлуатації піддаються впливу абразивних частинок, вологи, температурних коливань і хімічно активних середовищ, що спричиняє поступове руйнування захисного шару покриття. Це призводить до прискорення корозійних процесів, зниження надійності конструкцій і зростання витрат на їх відновлення. Застосування інноваційних технологій нанесення лакофарбових систем дозволяє мінімізувати негативний вплив зазначених факторів і забезпечити формування високостійкого захисно-декоративного шару.

Актуальність даної роботи зумовлена необхідністю підвищення довговічності машинобудівних виробів, оптимізації технологічних процесів нанесення лакофарбових покриттів та зменшення експлуатаційних витрат у виробничих умовах. Впровадження удосконалених покриттів сприяє підвищенню ресурсу роботи машин, покращенню корозійної стійкості та зниженню інтенсивності зношування, що має вагоме значення для підвищення ефективності машинобудівного виробництва.

Метою дослідження є підвищення довговічності машин та обладнання шляхом удосконалення механічної технології нанесення лакофарбових покриттів, що забезпечує надійний захист поверхонь від корозії, механічного зношування та інших експлуатаційних впливів, характерних для умов роботи машинобудівних виробів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- здійснити аналіз сучасних лакофарбових матеріалів і технологій нанесення покриттів, які застосовуються у машинобудуванні;
- визначити основні фактори, що впливають на зносостійкість, адгезію та довговічність лакофарбових покриттів у реальних умовах експлуатації машин та обладнання;
- розробити та науково обґрунтувати удосконалені технологічні процеси нанесення лакофарбових покриттів;
- провести експериментальні дослідження властивостей удосконалених покриттів з оцінкою їх фізико-механічних та експлуатаційних характеристик;
- здійснити оцінювання ефективності запропонованих технологічних рішень щодо підвищення довговічності машинобудівних виробів, зниження витрат на ремонт і технічне обслуговування, а також економічної доцільності їх упровадження.

Об'єкт дослідження. Процес нанесення лакофарбових покриттів на поверхні машин та обладнання, що застосовується у виробництві та ремонтно-відновлювальних операціях машинобудівної галузі.

Предмет дослідження. Методи, технологічні підходи та параметри процесів нанесення лакофарбових покриттів, спрямовані на підвищення довговічності та захисних властивостей машинобудівних виробів в умовах їх експлуатації.

Методи дослідження. Методологічну основу роботи становлять загальнонаукові принципи аналізу та синтезу, методи аналітичної хімії, прикладної фізики, трибології та механіки матеріалів. Експериментальні дані опрацьовувалися із застосуванням спеціалізованих прикладних програмних засобів для статистичної обробки, моделювання та інтерпретації результатів.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Значення лакофарбових покриттів у забезпеченні довговічності машин та обладнання

Машини та обладнання машинобудівної галузі під час експлуатації зазнають дії значних механічних, хімічних та кліматичних навантажень. Тривалий вплив вологи, температурних коливань, ультрафіолетового випромінювання, абразивних частинок, мастильно-технічних рідин і агресивних середовищ спричиняє поступове руйнування металевих поверхонь та розвиток корозійних процесів. Це негативно позначається на експлуатаційній надійності, довговічності та технічному стані машинобудівних виробів.

У таких умовах лакофарбові покриття (ЛФП) становлять ефективний спосіб захисту поверхонь, оскільки забезпечують бар'єр проти впливу корозійних і механічних чинників, підвищують стійкість до зношування та сприяють збереженню зовнішнього вигляду виробів протягом тривалого періоду [1, 2]. Комплекс захисних та декоративних властивостей ЛФП дозволяє суттєво зменшити темпи деградації металевих поверхонь і подовжити термін служби машин та обладнання.

Важливою умовою ефективності ЛФП є не лише якість матеріалу, а й технологія його нанесення. Вибір лакофарбової композиції, параметри підготовки поверхні, режим нанесення, умови висихання або полімеризації, а також характеристики формування щільного покривного шару суттєво впливають на експлуатаційні властивості покриття [3]. Недотримання технологічних вимог може призвести до швидкого руйнування покриття, втрати адгезії або появи дефектів, що прискорюють розвиток корозії.

Удосконалення технологічних процесів нанесення ЛФП є важливим напрямом покращення довговічності машинобудівних виробів та підвищення їх

експлуатаційної ефективності в умовах дії змінних і агресивних зовнішніх факторів.

1.2 Лакофарбові матеріали: характеристика, визначення та класифікація

Лакофарбові матеріали (ЛФМ) являють собою хімічні сполуки або композиційні системи, призначені для формування на поверхні виробів захисних і декоративних плівок. Їхнє основне призначення полягає у створенні бар'єрного шару, який зменшує вплив корозійних, механічних і кліматичних чинників, забезпечує зносостійкість, стабільність зовнішнього вигляду та виконання спеціальних технічних функцій. Фундаментальною складовою ЛФМ є плівкоутворювальна речовина, що після висихання або полімеризації утворює тверду та однорідну плівку. Додатковими компонентами виступають пігменти, наповнювачі, розчинники, пластифікатори та різноманітні модифікатори, які коригують властивості покриття залежно від вимог експлуатації [4].

Комплекс характеристик ЛФМ включає механічну міцність, адгезію, еластичність, декоративні властивості, стійкість до вологи, температурних коливань, ультрафіолетового випромінювання та агресивних хімічних середовищ. Механічна міцність визначає здатність покриття протистояти стиранню, ударам або подряпинам. Адгезійні властивості характеризують рівень зчеплення плівки з металевою основою. Еластичність забезпечує можливість деформації покриття разом із основою без утворення тріщин. Декоративні властивості визначають блиск, колірну стабільність і текстуру поверхні. Висока термічна й хімічна стійкість дозволяє застосовувати ЛФМ у складних виробничих середовищах. Екологічна безпечність матеріалів є важливим аспектом, оскільки впливає на умови праці та рівень емісії шкідливих речовин.

Класифікація лакофарбових матеріалів здійснюється за кількома ознаками. За функціональним призначенням ЛФМ поділяють на захисні, декоративні та функціональні. Захисні композиції призначені для антикорозійних, вологостійких, термостійких чи інших захисних цілей. Декоративні матеріали мають на меті формування стабільного оптичного ефекту, блиску або кольорової рівномірності. Функціональні ЛФМ застосовуються для виконання спеціальних задач, зокрема світловідбивання чи ізоляції [5].

За типом плівкоутворювальної основи ЛФМ поділяють на масляні й алкідні, полімерні (акрилові, епоксидні, поліуретанові та інші) та водорозчинні матеріали на основі акрилатів або латексу. За виглядом покривного шару розрізняють лаки, емалі та фарби. За механізмом висихання ЛФМ можуть тверднути фізичним шляхом шляхом випаровування розчинника або хімічним шляхом - у результаті полімеризації чи інших реакцій. Важливим критерієм є умовність застосування: окремі матеріали призначені для зовнішніх робіт, де потрібна висока атмосферостійкість, тоді як інші використовуються у внутрішніх середовищах і мають знижений вміст летких органічних сполук.

ЛФМ є універсальним інструментом для забезпечення довговічності та функціональності металевих виробів машинобудування. Правильний вибір матеріалу та дотримання технології нанесення дозволяють істотно підвищити експлуатаційний ресурс техніки. У машинобудівній практиці найбільш поширеним є застосування багатошарових систем покриттів, що складаються з ґрунтовки, проміжного шару та фінішного покриття. ґрунтовка забезпечує адгезію й первинний антикорозійний захист; проміжний шар покращує рівномірність і зміцнює захисні властивості; фінішний шар формує декоративний ефект і додатково підвищує стійкість поверхні до механічних та кліматичних впливів [2, 4].

1.3. Структура лакофарбового покриття

Процес фарбування є одним із основних методів захисту машин та обладнання, оскільки експлуатація машинобудівних виробів супроводжується дією численних чинників, що спричиняють корозію та поступове руйнування металевих поверхонь. Лакофарбове покриття виконує одразу кілька функцій: захищає метал від корозійних і механічних впливів, створює бар'єр для агресивних речовин, а також забезпечує виробу належний декоративний вигляд. Захисні властивості формуються завдяки утворенню на поверхні металу суцільної ізолювальної плівки, здатної перешкоджати проникненню вологи, атмосферних газів і хімічно активних компонентів. Ефективність такого захисту визначається адгезією покриття, його суцільністю, товщиною плівки та стійкістю матеріалу до кліматичних і механічних впливів.

Фарбування машин та їх ремонтне підфарбовування займає значну частину технологічного процесу обслуговування та відновлення виробів, оскільки лакофарбові системи є багатокомпонентними за своєю структурою. Їх застосування включає низку технологічних операцій, що виконуються у певній послідовності: підготовку поверхні, нанесення ґрунтовки, шпаклівку, формування проміжного шару та нанесення оздоблювального покриття. Кожен із цих етапів має власні технологічні вимоги, оскільки від правильності їх виконання залежить довговічність та якість кінцевого покриття [1–5].

Сучасні стандарти машинобудівної галузі передбачають використання широкого спектра лакофарбових матеріалів, серед яких прозорі й матові лаки, різні види фарбових композицій, порошкові матеріали, емалі, ґрунтовки та шпаклівки. Структура лакофарбового покриття формується у вигляді багат шарової системи, де кожен шар виконує окрему функцію. Підготовка поверхні забезпечує очищення металу від забруднень, іржі, окалини та старих покриттів, що створює умови для якісного зчеплення наступних шарів. Ґрунтовка

підвищує адгезію та забезпечує первинний антикорозійний захист. Шпаклювальний шар вирівнює нерівності та дефекти поверхні. Проміжний шар стабілізує структуру системи та підвищує її захисні властивості. Завершальним елементом є оздоблювальний шар, який формує декоративні характеристики та додатково захищає поверхню від впливу механічних, кліматичних та хімічних факторів.

Таким чином, структура ЛФП у машинобудуванні є багатошаровою системою, де кожен елемент сприяє довговічності, стійкості та функціональності кінцевого покриття. Послідовність технологічних операцій та якість застосованих матеріалів визначають рівень захисної ефективності покриття та його здатність забезпечувати тривалу експлуатацію машинобудівних виробів (рис. 1.1).



Рис. 1.1 - Структура лакофарбового покриття

Більшість виробників лакофарбових матеріалів, що спеціалізуються на ремонтному фарбуванні машин та обладнання, формують комплексні серії продукції, які містять повний спектр матеріалів для відновлення лакофарбового покриття. До таких серій входять ґрунтовки, шпаклівки, базові емалі, фінішні лаки, розчинники, затверджувачі та інші допоміжні компоненти, необхідні для формування багатошарової покривної системи. Використання матеріалів, що належать до однієї технологічної серії, дає змогу забезпечити сумісність компонентів, стабільність процесів полімеризації та прогнозовану якість кінцевого покриття. Саме з цієї причини виробники рекомендують застосовувати єдину

систему матеріалів під час ремонтного фарбування, оскільки поєднання елементів різних серій може призвести до зниження адгезії, порушення структури покриття або появи дефектів.

Усі такі системи потребують попередніх досліджень, апробації та порівняльних випробувань, що дозволяє оцінити їхню ефективність, придатність до конкретних умов експлуатації та відповідність технологічним вимогам ремонтних процесів.

1.4. Історія виникнення ЛФМ для використання у сільському господарстві

Сучасний етап розвитку характеризується впровадженням водорозчинних, екологічно безпечних ЛФМ, порошкових фарб і наноматеріалів. Особлива увага приділяється вдосконаленню технологій нанесення, таких як електроосадження, напилення та ультрафіолетове затвердіння, що підвищують якість покриттів та скорочують витрати ресурсів.

ЛФМ можна класифікувати: за призначенням: захисні, декоративні, спеціального призначення; за складом: органічні, водорозчинні, порошкові; методом нанесення: пензлем, валиком, розпиленням, електроосадженням; за хімічними властивостями: термопластичні, термореактивні [2].

Подальший розвиток ЛФМ спрямований на використання екологічно безпечних компонентів, застосування нанотехнологій для створення покриттів із високою стійкістю до зовнішніх впливів; розробку інтелектуальних покриттів, здатних до самовідновлення після пошкоджень; автоматизацію та роботизацію процесів нанесення для підвищення ефективності та якості покриттів. ЛФМ є важливим елементом у забезпеченні довговічності та естетичного вигляду сільськогосподарської техніки, що робить їх дослідження і вдосконалення надзвичайно актуальними. ЛФМ, що використовуються у сільському

господарстві в контексті агроінженерії пройшли значний еволюційний шлях, поступово удосконалюючись та адаптуючись до вимог сьогодення. ЛФМ, застосовувані в сільськогосподарській техніці, розвивалися паралельно з потребами агроінженерії, що вимагала підвищення стійкості покриттів до агресивного середовища, механічних навантажень та погодних умов. Основні етапи еволюції включають [4, 5]:

Початковий етап: використання натуральних матеріалів, таких як оліфи та природні пігменти. Ці покриття забезпечували базовий захист, але мали низьку довговічність.

Перехід до синтетичних покриттів: впровадження алкідних та акрилових фарб, які підвищили стійкість до ультрафіолетового випромінювання та вологості, що є критичними для агротехніки.

Розробка антикорозійних систем: з'явилися багатокомпонентні системи з ґрунтовками та емалями, які забезпечували тривалий захист від корозії та хімічного впливу, зокрема, добрив і пестицидів.

Використання порошкових покриттів: порошкові матеріали без розчинників стали популярними завдяки екологічності, економічності та високій стійкості до механічних пошкоджень.

Кожен етап розвитку відповідав вимогам часу, сприяючи підвищенню ефективності та довговічності сільськогосподарської техніки. Агроінженерія продовжує вдосконалювати лакофарбові матеріали з метою відповідності сучасним екологічним стандартам і забезпечення надійного захисту в умовах інтенсивної експлуатації.

1.5. Розвиток лакофарбових матеріалів у машинобудуванні

Розвитку лакофарбових матеріалів у машинобудуванні має тривалий та багатоступінчастий характер, оскільки потреба у захисті металевих поверхонь

виникла одночасно з появою перших механізмів та промислових конструкцій. Первинні покриття ґрунтувалися на використанні натуральних олій, природних смол та пігментів. Такі матеріали забезпечували мінімальний рівень захисту, мали низьку стійкість до вологи та механічного зношування, однак стали відправною точкою у формуванні технологій поверхневого захисту.

Подальший розвиток машинобудування в XIX–XX століттях, зокрема індустріалізація та масове виробництво техніки, спричинив перехід до синтетичних лакофарбових композицій. Впровадження алкідних, акрилових та фенольних смол значно підвищило стійкість покриттів до ультрафіолетового випромінювання, температурних коливань і вологи. Виникла можливість створення покриттів із прогнозованими властивостями, що відповідали потребам технічно ускладнених машин і механізмів. На цьому етапі сформувалися перші антикорозійні системи, що включали ґрунтовки, проміжні шари та емалі. Такі системи забезпечували якісний бар'єр проти корозії та хімічно активних речовин, що стало важливим для металоконструкцій, які експлуатувалися в агресивних виробничих середовищах [4, 5].

У другій половині XX століття особливого поширення набули полімерні матеріали, які дозволили підвищити механічну міцність покриттів і забезпечили можливість роботи у складних умовах. Одночасно з розвитком полімерної хімії активно вдосконалювалися методи нанесення: розпилення, електростатичне напилення, занурення, електроосадження. Це забезпечило рівномірність плівкоутворення, зменшило витрати матеріалів і підвищило якість поверхні виробів.

Важливим кроком стало впровадження порошкових покриттів, у яких відсутні органічні розчинники. Такі матеріали підвищили екологічну безпечність процесів фарбування та дозволили отримувати покриття з високою стійкістю до ударів, стирання та впливу хімічних речовин. У машинобудівній галузі порошкові

композиції стали поширеними через їхню економічність, довговічність та низький рівень відходів виробництва.

Сучасний етап розвитку ЛФМ характеризується активним впровадженням водорозчинних та малотоксичних матеріалів, що відповідають жорстким екологічним нормам. Поряд із традиційними смолами з'явилися наномодифіковані покриття, у яких наночастинки покращують адгезію, збільшують міцність та забезпечують високий рівень стійкості до атмосферних, механічних і хімічних впливів. Значного поширення набули технології ультрафіолетового затвердіння, електроосадження та високоефективного розпилення, що скорочують тривалість виробничого циклу та знижують енергетичні витрати.

У машинобудуванні також розвивається концепція «інтелектуальних покриттів», здатних змінювати свої властивості залежно від умов експлуатації або частково відновлюватися після пошкоджень. Водночас автоматизація та роботизація процесів нанесення дозволяють забезпечити високу повторюваність і стабільність структури покриття, що суттєво підвищує якість продукції та її експлуатаційну надійність.

Таким чином, еволюція лакофарбових матеріалів від натуральних сумішей до високотехнологічних полімерних та наноструктурованих систем відображає загальний прогрес машинобудування. Вдосконалення ЛФМ і технологій їх нанесення є важливою умовою підвищення довговічності, корозійної стійкості та технічної надійності сучасних машин і обладнання.

1.6. Аналіз сучасних технологій нанесення ЛФП

Сучасні технології нанесення лакофарбових покриттів охоплюють низку високоефективних методів, що забезпечують формування рівномірних, зносостійких та довговічних плівок. Серед найбільш поширених технологічних підходів у машинобудуванні варто відзначити електроосадження, пневматичне

напилення та порошкове покриття. Електроосадження дає змогу отримати рівномірний шар ґрунтовки з підвищеною адгезією та стабільною товщиною, що є важливою передумовою якісного подальшого фарбування. Пневматичне напилення широко застосовується для нанесення базових шарів фарби та оздоблювальних лаків, забезпечуючи контрольоване розпилення матеріалу та задовільну якість поверхні. Порошкове покриття є технологічно та економічно вигідним методом, який не потребує використання розчинників, що робить його екологічно безпечним; отримані покриття характеризуються високою стійкістю до механічних та хімічних впливів, а також тривалим експлуатаційним ресурсом.

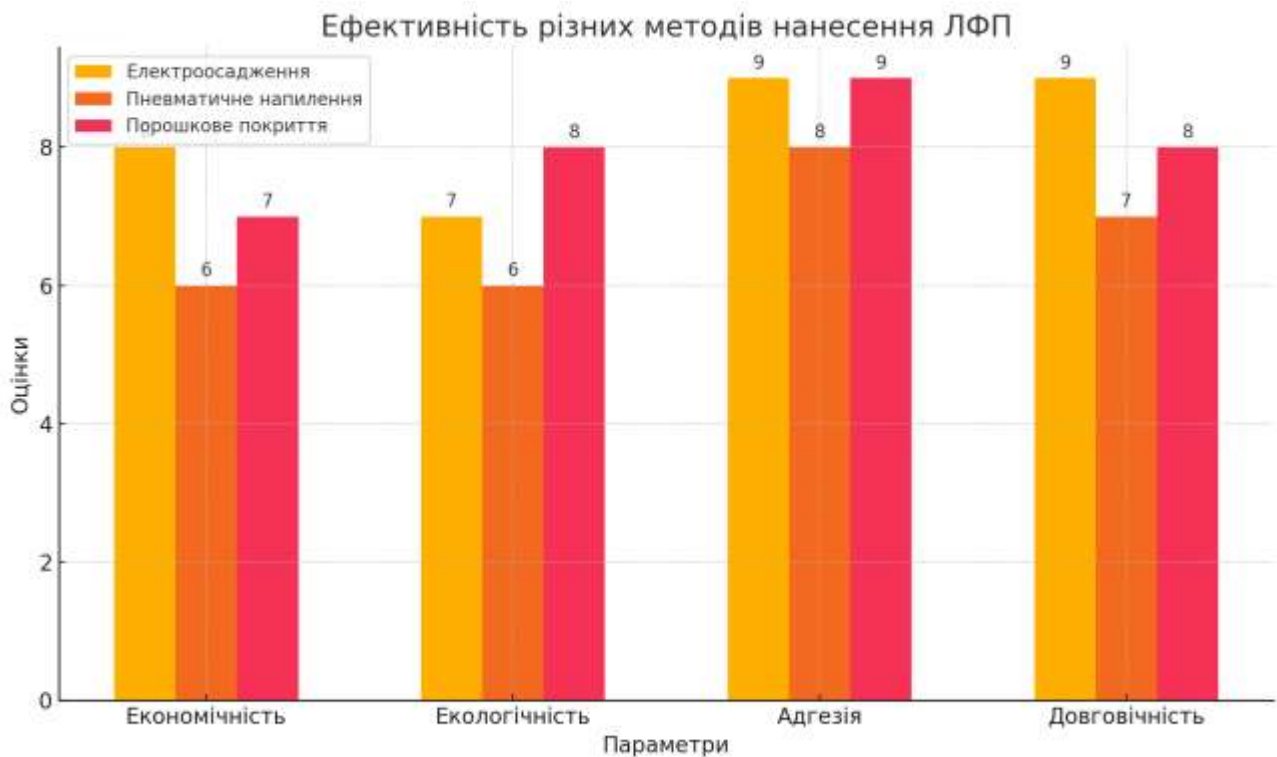


Рис. 1.2 - Порівняльна ефективність методів нанесення лакофарбових покриттів за основними експлуатаційними параметрами.

Графік (рис. 1.2) відображає порівняльну ефективність трьох основних технологій нанесення лакофарбових покриттів. Показник адгезії є найвищим у разі використання електроосадження, що пояснюється рівномірним формуванням

ґрунтовочного шару по всій поверхні виробу. Порошкове покриття також забезпечує високу адгезію, оскільки під час термічної полімеризації відбувається інтенсивна фізико-хімічна взаємодія частинок порошку з основою. Для пневматичного напилення характерна залежність адгезії від якості попередньої підготовки поверхні, режимів розпилення та технічних параметрів обладнання, що може спричиняти варіативність результатів [17].

Аналіз показника довговічності вказує, що найстійкіші покриття формуються методом електроосадження, завдяки рівномірності шару та високій щільності плівки. Порошкове покриття забезпечує стабільну експлуатаційну витривалість, оскільки після полімеризації утворюється механічно міцний і хімічно стійкий шар, здатний витримувати вплив ударних та атмосферних навантажень. При пневматичному напиленні довговічність значною мірою визначається товщиною сформованого шару, рівномірністю нанесення oraz точністю дотримання технологічних режимів.

У цілому порошкове покриття демонструє високу ефективність за більшістю оціночних параметрів. Проте для деталей складної конфігурації, де важливо забезпечити повне покриття усіх поверхонь та внутрішніх зон, перевагу здебільшого надають електроосадженню, яке забезпечує рівномірність нанесення навіть у важкодоступних місцях.

1.7. Дослідження лакофарбового покриття для забезпечення надійності машин та обладнання

Дослідження лакофарбових матеріалів і покриттів є важливою складовою підвищення надійності та довговічності машинобудівних виробів. Теоретичні основи цього напрямку сформувалися на перетині технічних, хімічних і природничих дисциплін, що зумовлює міждисциплінарний характер проблеми та потребує системного підходу до аналізу властивостей лакофарбових покриттів.

Основні експлуатаційні властивості покриття визначаються як на етапі виготовлення лакофарбових матеріалів (склад, рецептура, тип плівкоутворювача), так і під час технологічного процесу нанесення, який включає підготовку металевої поверхні, формування ґрунтовочного, проміжного та фінішного шарів. Сукупність цих чинників представлена у вигляді системної моделі (рис. 1.3), яка демонструє вплив природи матеріалу та технологічних параметрів на якість сформованого покриття.



Рис. 1.3 - Властивості ЛФП

Як видно з рисунка, визначальними факторами є хімічний склад лакофарбового матеріалу, його тип і марка, а також особливості технологічного процесу нанесення: метод фарбування, умови сушіння та режим термообробки. Саме ці параметри забезпечують експлуатаційну стабільність покриття, його стійкість до корозії, механічного зношування та впливу кліматичних умов.

На властивості лакофарбових покриттів впливають як внутрішні, так і зовнішні фактори. У процесі експлуатації відбувається поступова зміна первинних характеристик покриття, що зумовлено абразивною дією частинок середовища, підвищеною вологістю, температурними коливаннями, механічними

навантаженнями, а також умовами догляду та зберігання. Абразивні частинки, такі як пил чи пісок, спричиняють подряпини й локальні пошкодження, що погіршує захисні властивості поверхні.

Старіння лакофарбового покриття в атмосферних умовах супроводжується фізико-хімічними процесами структурних змін полімерної плівки. До них належать вивітрювання, зниження блиску, утворення мікротріщин, поява структурної неоднорідності та часткове відшарування. Ці перетворення безпосередньо впливають на довговічність покриття та скорочують термін служби техніки.

У процесі дослідження лакофарбових матеріалів важливо враховувати, що характеристики покриттів можуть як сприяти вирішенню поставлених задач, так і створювати додаткові труднощі. Значення має момент формування властивостей ЛФМ та їх еволюція під час експлуатації, оскільки саме в цих змінах проявляються реальні експлуатаційні особливості покриттів.

Джерелом інформації для дослідження виступають технологічні дані про виготовлення та нанесення покриттів, зокрема рецептурні характеристики ЛФМ, їх склад, умови приготування, обсяг використаних матеріалів та дотримання технологічних режимів фарбування. Це дозволяє виконати більш точну ідентифікацію системи покриття та провести комплексний аналіз її властивостей.

Сформовані властивості багатошарових ЛФП закладаються ще на стадії виготовлення матеріалу. Наприклад, тришарова система «грунтовка – проміжний шар – фінішне покриття» є типовою для машинобудівних виробів, оскільки забезпечує сукупність антикорозійних та декоративних властивостей. До закономірних змін покриття відносять також вивітрювання, втрату блиску, фотохімічну деградацію полімеру та інші процеси, пов'язані з впливом природних факторів.

Окрему роль у технологічному аналізі відіграють випадкові ознаки, які можуть виникати під впливом непередбачуваних факторів як на етапі виробництва, так і під час експлуатації техніки. До таких належать відхилення в рецептурі матеріалу, порушення режимів нанесення або сушіння, наявність дефектів (плям, зморшок, шагрені, локального перефарбування), а також випадкові поверхневі пошкодження - корозійні осередки, подряпини, вм'ятини. Вони дозволяють проводити ідентифікацію покриття та визначати історію його експлуатації.

Здатність покриття зберігати інформативні властивості протягом тривалого часу визначається поняттям ідентифікаційного періоду. ЛФП та окремі частинки ЛФМ, що затверділи, характеризуються достатньою довговічністю та стійкістю до впливу природних факторів, що забезпечує можливість їх ідентифікації навіть після повторного фарбування. На перефарбованих поверхнях зазвичай зберігаються залишки первинного покриття, які дозволяють встановити його структуру, склад та технологію нанесення.

Таким чином, дослідження лакофарбових покриттів є важливим елементом забезпечення довговічності машин та обладнання. Комплексний підхід, що враховує рецептурні, технологічні та експлуатаційні фактори, дає змогу формувати покриття з високими захисними властивостями та прогнозованим строком служби.

Висновки до розділу 1

У ході аналізу теоретичних засад формування та експлуатації лакофарбових покриттів встановлено, що довговічність техніки значною мірою залежить від механічної стійкості покриття, його здатності витримувати внутрішні напруження та вплив зовнішніх чинників. Дослідження підтвердили, що товщина покриття є

визначальним параметром, оскільки безпосередньо впливає на зносостійкість та опір руйнуванню під час інтенсивної роботи техніки.

Виявлено, що лакофарбові покриття зберігають частину своїх первинних властивостей навіть за умов тривалого впливу агресивних факторів середовища або навмисних змін поверхні. Це забезпечує достатньо тривалий ідентифікаційний період, що має важливе значення для подальшого технічного обслуговування, ремонту та контролю якості технічних виробів.

Аналіз сучасних технологій нанесення ЛФП показав, що підвищення довговічності та експлуатаційної надійності можливе за умови оптимізації процесів фарбування, удосконалення підготовки поверхні та впровадження екологічно безпечних і високостійких лакофарбових матеріалів. Особливу ефективність демонструють технології порошкового нанесення та електроосадження, які забезпечують високу адгезію, стійкість до зношування та зменшені експлуатаційні витрати.

Таким чином, підвищення стійкості покриттів може бути досягнуто шляхом зменшення внутрішніх напружень у плівці, оптимізації товщини та структури багатошарових систем, а також модернізації технологічних процесів нанесення лакофарбових матеріалів. Отримані результати формують основу для визначення ефективних заходів щодо збільшення строку служби ЛФП і, відповідно, підвищення надійності та довговічності машин у реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ФАРБУВАННЯ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ

2.1 Трибологічний аналіз процесів тертя і зношування лакофарбових покриттів

Аналіз умов експлуатації робочих органів сільськогосподарських машин показує, що знос ЛФП значною мірою зумовлений дією сил тертя. У зв'язку з цим важливо дослідити теорію тертя та зношування для визначення закономірностей зносу ЛФП. Для цього розглядаються робочі поверхні жаток зернозбиральних комбайнів з метою ідентифікації факторів, що впливають на інтенсивність зносу покриття.

Характеризуючи процеси тертя та зношування, можна визначити, що на їх перебіг впливають такі чинники: вхідні параметри, які можна задавати, а саме температура, навантаження, швидкість переміщення контактуючих поверхонь внутрішні фактори, що виникають безпосередньо під час взаємодії поверхонь, які складно контролювати в процесі тертя (виділення тепла, зміна шорсткості та структури поверхонь); вихідні параметри, які можна зафіксувати в результаті взаємодії (сила тертя, інтенсивність зношування); тип тертя (зовнішні та внутрішні) та вид зношування під час безпосереднього тертя.

Зовнішнє тертя виникає при опорі переміщення між двома тілами у зонах контакту їхніх поверхонь, дотичних одна до одної.

Внутрішнє тертя пов'язане з опором переміщенню частинок у межах одного тіла.

В умовах експлуатації жаток зернозбиральних комбайнів зовнішнє тертя виникає в зоні контакту пари "ЛФП – рослинна маса". Зовнішнє тертя можна

класифікувати за такими ознаками: наявністю відносного руху; характером відносного руху; застосуванням мастильного матеріалу (рис. 2.1).



Рис. 2.1 – Класифікація видів зовнішнього тертя

Згідно з рис. 2.1, у контактній парі «лакофарбове покриття – рослинна маса» процес тертя характеризується такими умовами: за наявності відносного переміщення має місце тертя руху; за характером цього переміщення - тертя ковзання; за умовами взаємодії поверхонь - сухе тертя, оскільки мастильні матеріали відсутні в зоні контакту.

Основною величиною, яка використовується для кількісної оцінки тертя, є сила тертя F , що визначається взаємодією мікронерівностей поверхонь у площині фактичного контакту S . У загальному випадку сила тертя залежить від комплексу параметрів, що характеризують умови зовнішнього тертя, зокрема:

$$F = f(P, V; T; t; \mu), \quad (2.1)$$

де P - тиск, Па; V - швидкість ковзання, м/с; T - температура, °C; t - час контакту, с; μ - коефіцієнт тертя.

На практиці часто використовується питома номінальна сила тертя f , що визначається відношенням

$$f = F / S_H, \quad (2.2)$$

де F - сила тертя, Н;

S_H - площа номінального контакту, см^2 .

Поширеною характеристикою є також коефіцієнт тертя μ , який за визначенням дорівнює:

$$\mu = F/N, \quad (2.3)$$

де N - нормальна навантаження, Н.

Разом із питомою силою тертя f , (2.2) використовують також тиск або питомого нормального навантаження P .

$$P = N/S_H \quad (2.4)$$

Перераховані вище характеристики тертя враховуються в теорії зносу і можуть бути використані при розрахунку інтенсивності зношування. Таким чином, проглядається безпосередній зв'язок між теорією тертя і зносу

В процесі тертя відбувається зношування, що виявляється в поступовій зміні розмірів або форми тіла. Він також може бути охарактеризований наступними величинами (критеріями).

Масова інтенсивність зношування:

$$I_q = \frac{G_m}{L} \quad (2.5)$$

де G_m - маса зношеного матеріалу, г;

L - шлях тертя, см;

Лінійна інтенсивність зношування:

$$I_h = h/L \quad (2.6)$$

де h - товщина шару, знятого з площі фактичного контакту при її одноразовому відтворенні, см;

Енергетична інтенсивність зношувань:

$$I_w = V/A \quad (2.7)$$

де V - об'єм зношеного матеріалу, см^3 ;

A - робота тертя, Дж.

Крім того, інтенсивність зношування оцінюють за допомогою питомих характеристик, що дозволяють кількісно описати втрату матеріалу під дією тертя. Одним із таких показників є питомий масовий знос, який відображає масу матеріалу, втраченої з одиниці площі контактної поверхні під час навантаження. Цей параметр є чутливим до змін фізико-механічних властивостей покриття, умов тертя та режимів експлуатації, що робить його інформативним показником для аналізу довговічності лакофарбових систем.

Питомий масовий знос:

$$i_q = G_m / Sl \quad (2.8)$$

де S - площа фактичного контакту, см^2 ;

l - шлях тертя, що дорівнює діаметру плями торкання, см ;

Питомий лінійний знос:

$$i_h = V_l / Sd \quad (2.9)$$

де V_l - об'єм відокремленої речовини при переміщенні на довжину, рівну діаметру плями контакту, см^3 ;

d - діаметр одиничної плями контакту, см .

Інтенсивність зношування визначають як відношення величини втрати матеріалу до шляху, пройденого в процесі тертя, або до обсягу виконаної роботи. Взаємозв'язок між показниками зносу, фізико-механічними властивостями матеріалу та зовнішніми умовами визначається характером механізму зношування. Для коректного розрахунку інтенсивності необхідно враховувати тип контактної взаємодії, що виникає під час тертя, а також форму та вид зношування.

Крагельський І.В. [6], один із засновників теорії зовнішнього тертя та зношування, запропонував класифікацію типів контактної взаємодії, що виникають у процесі тертя. До них належать: пружний контакт, пластичний контакт, мікрорізання, адгезійна взаємодія та когезійний відрив. Вид контакту визначається фізико-механічними властивостями матеріалів, що беруть участь у взаємодії.

Пружний контакт реалізується тоді, коли мікровиступи контртіла викликають деформацію поверхневого шару, але напруження не перевищують межі текучості матеріалу. У цьому випадку залишкові деформації не виникають, а зношування відбувається переважно внаслідок фрикційної втоми під час багатократного навантаження.

Пластичний контакт характеризується появою залишкових деформацій, що виникають при досягненні контактних напружень, рівних межі текучості. У таких умовах матеріал частково «обтікає» виступи контртіла. Руйнування покриттів у цьому режимі здебільшого пов'язане з малочисельною циклічною фрикційною втомою, коли тривалість до зародження руйнування є порівняно малою.

Мікрорізання спостерігається за умов, коли контактні напруження та локальні деформації досягають таких значень, за яких матеріал уже не здатний пластично деформуватися навколо виступів контртіла. У цьому разі руйнування поверхневого шару відбувається практично з перших циклів взаємодії та супроводжується відокремленням частинок матеріалу й утворенням продуктів зношування.

Адгезійна взаємодія сама по собі не викликає миттєвого руйнування, однак сприяє зростанню локальних напружень у зоні контакту. За таких умов на поверхні формуються тонкі плівки, що прилипають одна до одної, а руйнування відбувається в межах цих плівкових нашарувань, прискорюючи процеси фрикційної втоми.

Когезійний відрив виникає тоді, коли міцність фрикційного зв'язку на поверхні контакту перевищує міцність основного матеріалу. У результаті руйнування поширюється вглиб матеріалу, що призводить до значних виривань і формування глибоких дефектів. Подібно до мікрорізання, такий тип зношування проявляється ще на початкових етапах експлуатації та суттєво впливає на працездатність вузлів тертя.

Залежно від умов роботи сільськогосподарських машин можуть реалізовуватися різні механізми зношування. Проте найбільш поширеним для робочих органів є абразивний знос, який виникає в результаті контакту із ґрунтом, рослинною масою та іншими твердими включеннями. За таких умов у зоні контакту формуються високі рівні контактних напружень, що зумовлює інтенсивне руйнування поверхневих шарів покриття (рис. 2.2).

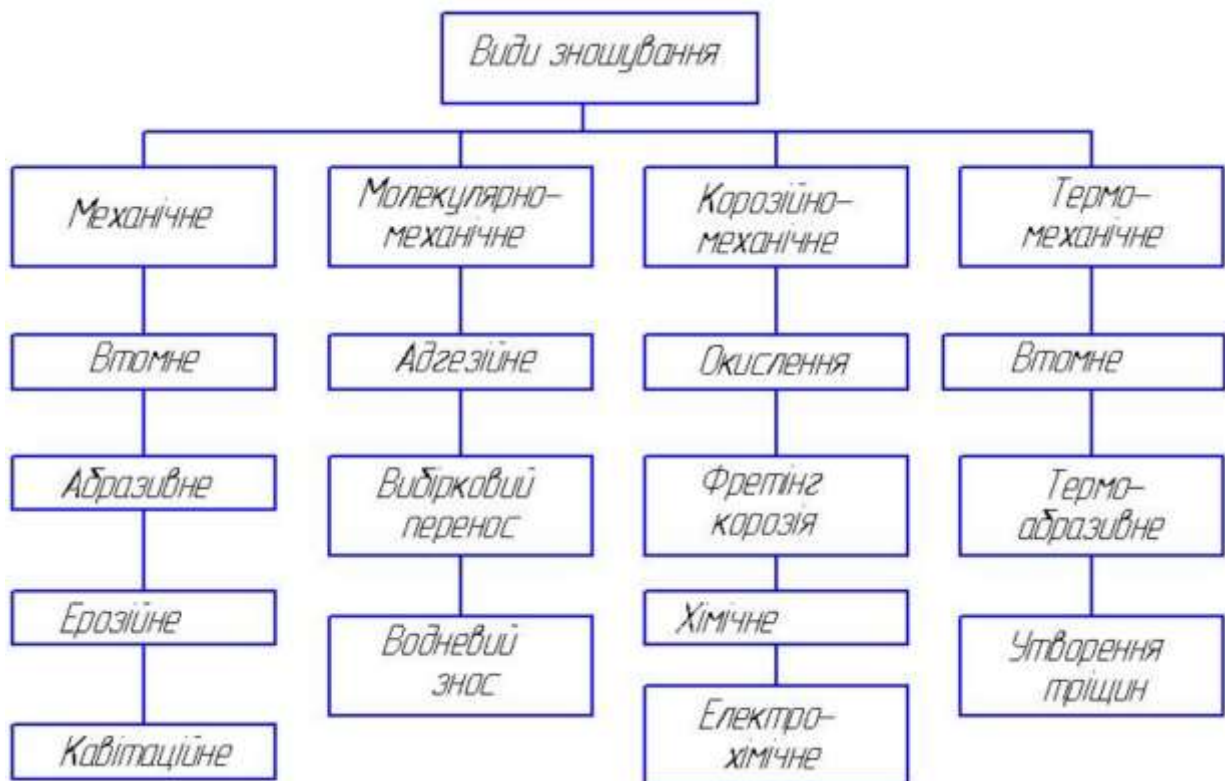


Рис. 2.2 - Види зношування фрикційних пар.

Абразивне зношування домінує навіть за незначної кількості абразивних включень, оскільки рівень контактних напружень у зоні взаємодії в цьому випадку суттєво перевищує аналогічні показники для інших механізмів руйнування [8].

Для встановлення характеру зношування лакофарбового покриття на поверхнях днища та шнека жаток зернозбиральних комбайнів необхідно проаналізувати специфіку переміщення та транспортування рослинної маси всередині робочої зони агрегату.

2.2 Обґрунтування параметрів ковзного тертя в системі взаємодії «лакофарбове покриття – рослинна маса»

Нерівномірне зношування лакофарбового покриття робочих поверхонь жатки призводить до того, що рослинна маса переміщується по зонах, які характеризуються різними значеннями коефіцієнта тертя ковзання. Якщо розглядати траєкторію руху рослинної маси по шести умовних ділянках жатки, що відрізняються рівнем тиску та величиною коефіцієнтів тертя, можна зробити припущення, що параметри тертя для пар ділянок 1–6, 2–5 та 3–4 будуть близькими за значеннями (рис. 2.3).

Рис. 2.3 Жатка комбайна

P_1, P_2, P_3 - тиск, який чинить рослинна маса, відповідно, на ділянках 1 і 6; 2 і 5; 3 і 4. μ_1, μ_2, μ_3 коефіцієнти тертя (для однойменних ділянок).

На рис. 2.3 подано схему функціонування окремих зон поверхні днища та шнека жатки комбайна, що дає змогу оцінити нерівномірність процесів взаємодії покриття з рослинною масою. Відповідно, питома номінальна сила тертя f у цих ділянках матиме різні значення, зумовлені неоднаковими умовами навантаження та різним рівнем зношування.

Для першої ділянки:

$$f_1 = \mu_1 P_1, \quad (2.10)$$

де μ_1 - коефіцієнт тертя на першій ділянці;

P_1 - тиск на першій ділянці, Па.

Для наступних ділянок:

$$f_i = \mu_i P_i, \quad (2.11)$$

де μ_i - коефіцієнт тертя на i -ій ділянці;

P_i - тиск на i -й ділянці, Па.

Переміщення рослинної маси по різних ділянках поверхні днища та шнека жатки комбайна, які характеризуються неоднаковими значеннями коефіцієнта тертя та тиску, спричиняє виникнення додаткових опорів. Це ускладнює подачу маси до похилої камери та змушує оператора коригувати режими роботи машини - змінювати виліт і частоту обертання мотовила, швидкість руху комбайна та інші параметри, що, у свою чергу, підвищує загальні експлуатаційні витрати.

Аналіз нерівномірного зношування лакофарбового покриття на робочих поверхнях жатки зернозбирального комбайна дав змогу визначити основні фактори, які формують інтенсивність цього процесу. Отримані результати створюють підґрунтя для подальшої розробки аналітичної моделі, призначеної для кількісної оцінки зношування ЛФП за реальних умов експлуатації.

2.3 Методика визначення інтенсивності зношування лакофарбових покриттів робочих поверхонь жатки

Інтенсивність зношування лакофарбового покриття робочих поверхонь жатки зернозбирального комбайна визначається на основі розробленої методики оцінювання параметрів зносу.

$$I_V = \frac{\Delta h}{V_{\text{роб.}}} , \quad (2.12)$$

де Δh - товщина зношеного ЛФП, мкм;

$V_{\text{роб}}$ - кількість рослинної маси, яка спричинила зношення ЛФП, т.

З огляду на те, що інтенсивність зношування лакофарбового покриття на робочих поверхнях жатки є неоднорідною та змінюється залежно від ділянки (характерним є поступове зростання зносу від країв до центральної частини), розрахунок інтенсивності зношування для випадку поділу поверхні на шість зон може бути поданий у такому вигляді:

для I ділянки:

$$I_{V1} = \frac{h_n - h_{k1}}{V_{\text{роб1}}} , \quad (2.13)$$

де h_n - початкова товщина лакофарбового покриття, мкм;

h_{k1} - товщина ЛФП на першій ділянці по закінченню збиральних робіт, мкм

Для інших ділянок:

$$I_{Vi} = \frac{h_n - h_{ki}}{V_{\text{робі}}} \quad (2.14)$$

де h_{ki} - товщина ЛФП на i – й ділянці після проведення збиральних робіт, мкм;

$V_{\text{робі}}$ - обсяг виконаних робіт на i – й ділянці, т.

Отже, для розглянутого випадку середня інтенсивність зношування лакофарбового покриття робочих поверхонь жатки зернозбирального комбайна може бути визначена як усереднене значення інтенсивностей зношування окремих ділянок, що розраховується за такою залежністю:

$$I_{V_{cse}} = \frac{\frac{h_n - h_{\kappa 1}}{V_{\text{раб}1}} + \frac{h_n - h_{\kappa 2}}{V_{\text{раб}2}} + \frac{h_n - h_{\kappa 3}}{V_{\text{раб}3}} + \frac{h_n - h_{\kappa 4}}{V_{\text{раб}4}} + \frac{h_n - h_{\kappa 5}}{V_{\text{раб}5}} + \frac{h_n - h_{\kappa 6}}{V_{\text{раб}6}}}{6} \quad (2.15)$$

У результаті проведених перетворень отримуємо узагальнену залежність:

$$I_{V_{cse}} = \frac{22h_n - 12h_{\kappa 1,6} - 6h_{\kappa 2,5} - 4h_{\kappa 3,4}}{M} \quad (2.16)$$

Отже, формула для визначення інтенсивності зношування ЛФП робочих поверхонь жатки зернозбирального комбайна має такий вигляд:

$$I_{V_{cse}} = \frac{\frac{\Delta h_1}{V_{\text{раб}1}} + \frac{\Delta h_2}{V_{\text{раб}2}} + \dots + \frac{\Delta h_i}{V_{\text{раб}i}}}{n}, \quad (2.17)$$

де Δh_i - знос покриття на i – й ділянці поверхні, мкм;

$V_{\text{раб}i}$ - к – ть рослинної маси, що пройшла через i – ту ділянку поверхні жатки, т;

n - кількість виділених ділянок поверхні

Отриманий вираз дає можливість визначати інтенсивність зношування лакофарбового покриття як у середньому по всій робочій поверхні жатки, так і для кожної окремої ділянки. Це забезпечує більш точну оцінку нерівномірності зношування та дозволяє враховувати локальні особливості взаємодії пари “ЛФП – рослинна маса”, що є важливим для подальшої оптимізації конструкції та технології відновлення покриття.

2.4 Процес зношування ЛФП під час тертя поверхні жатки з рослинною масою.

У процесі роботи жатки зернозбирального комбайна лакофарбове покриття її робочих поверхонь зазнає інтенсивної дії різноманітних абразивних та деформаційних факторів. Основним деструктивним чинником є тертя, що виникає у парі «ЛФП – рослинна маса» під час переміщення стебел, листя та інших елементів урожаю по поверхні днища та шнека. Таке тертя має переважно сухий характер, супроводжується змінними контактними навантаженнями та відзначається значною нерівномірністю вздовж робочої зони.

Зношування ЛФП у цих умовах обумовлюється дією як макрочастинок (соломи, колосків, стебел), так і мікроабразиву, що міститься в рослинній масі (частинки пилу, ґрунту, піску). Внаслідок цього відбувається поступове руйнування поверхневого шару покриття через подряпування, мікрорізання, фрикційну втому та адгезійну взаємодію окремих ділянок поверхні.

Особливістю процесу є нерівномірність зносу: максимальна інтенсивність руйнування спостерігається у крайових та центральних зонах днища жатки, де швидкість переміщення рослинної маси та тиск контакту є найвищими. Нерівномірний розподіл коефіцієнта тертя спричиняє локальне перевантаження покриття, що прискорює деградацію ЛФП та збільшує витрати на технічне обслуговування.

Додатковим фактором, який прискорює знос, є наявність вологи та органічних кислот, що містяться у рослинній масі. Їх дія посилює абразивне руйнування, сприяє мікротріщиноутворенню та прискорює процеси корозії основного металу у випадку порушення цілісності покриття.

Під час переміщення рослинної маси по робочій поверхні жатки зернозбирального комбайна формується пара тертя «рослинна маса – ЛФП». Унаслідок такої взаємодії відбувається поступове руйнування та зношування

лакофарбового покриття. Як зазначалося в розділі 1, ЛФП належать до твердих полімерних матеріалів, сформованих у результаті нанесення та затвердіння лакофарбових матеріалів.

Для теоретичного опису процесів руйнування та втрати властивостей ЛФП на робочих поверхнях жаток доцільно застосовувати положення теорії тертя та зношування полімерів, що враховує їхню специфічну структуру, надмолекулярну організацію та реакцію на циклічні навантаження. Узагальнена схема механізмів зношування полімерних покриттів під дією рослинної маси наведена на рис. 2.4.

Рис. 2.4 - Взаємодії та процеси зношування полімерних матеріалів.

Одними з основоположників теорії зношування полімерів вважаються Крагельський І.В., Загайко С.А. та інші дослідники, які наголошували, що зношування полімерних матеріалів є значно складнішим процесом, ніж саме явище зовнішнього тертя. Воно являє собою сукупність фізико-хімічних перетворень, які відбуваються у поверхневому шарі та граничних зонах полімеру під дією механічних навантажень, температурних факторів і середовища експлуатації.

Крагельський І.В. [6] запропонував класифікацію основних видів зношування полімерів, серед яких (рис. 2.4): втомне, абразивне, кавітаційне та ерозійне. Згідно з дослідженнями Тененбаума М.М. [8], у процесі переміщення

рослинної маси по робочій поверхні жатки зернозбирального комбайна домінує саме абразивне зношування лакофарбових покриттів, що зумовлено характером взаємодії із частинками рослинної маси та домішками мінерального походження.

Найбільш типовими видами контакту під час абразивного зношування є пружний та пластичний контакт. У пружному контакті напруження не перевищують межі текучості полімерного шару, і взаємодія з абразивною частинкою відбувається з еластичними деформаціями поверхні. У випадку пластичного контакту локальні напруження перевищують межу текучості, що спричиняє залишкові деформації і прискорене руйнування поверхневого шару покриття.

Для оцінювання інтенсивності абразивного зношування у випадку пружного контакту використовується відповідний аналітичний вираз, який встановлює зв'язок між навантаженням, геометрією контакту, фізико-механічними властивостями матеріалу ЛФП та характеристиками абразивних частинок.

$$I = \frac{c_1 q (1 - \eta^2)}{E} \quad (2.18)$$

де c_1 - константа шорсткості (характеризує поверхню);

q - контурний питомий тиск, Н/м²;

η - коефіцієнт Пуассона;

E - модуль пружності, Н/м².

У такому випадку контурний питомий тиск можна визначити за виразом:

$$q = \frac{1,4 HB^2 (1 - \eta^2)^4}{\Delta^2 E^4}, \quad (2.19)$$

де HB - твердість за Брінеллем, МПа;

Δ - характеристика шорсткості, що відображає ступінь загостреності мікровиступів та особливості розподілу нерівностей по висоті мікропрофілю поверхні.

Для пластичного типу контакту інтенсивність абразивного зношування визначають за залежністю:

$$I = \frac{c_2 q}{HB}, \quad (2.20)$$

де c_2 - константа шорсткості (характеризує поверхню).

Фактори, що визначають інтенсивність зношування лакофарбових покриттів робочих поверхонь жаток зернозбиральних комбайнів, поділяються на зовнішні та внутрішні. Зовнішні чинники включають дві групи: ті, що залежать від властивостей рослинної маси, та ті, що визначаються умовами її переміщення. Перші характеризуються типом та морфологічними особливостями культури, що збирається, тоді як другі зумовлені робочими режимами комбайна, зокрема швидкістю руху, положенням мотовила та інтенсивністю подачі маси [8].

Рис. 2.5 - Вплив властивостей ЛФМ і технології фарбування на параметри ЛФП

До внутрішніх чинників відносять параметри лакофарбового покриття робочих поверхонь жатки, сформовані властивостями застосованих ЛФМ та

особливостями технології фарбування. Оскільки у межах удосконалення технологічного процесу ремонтного фарбування можна цілеспрямовано впливати саме на внутрішні параметри ЛФП, до подальшого аналізу приймаються чинники, які пов'язані з фізико-механічними характеристиками сформованого покриття. Їх оптимізація дозволяє підвищити зносостійкість ЛФП жаток зернозбиральних комбайнів.

До основних параметрів, що визначають опір покриття зношуванню, належать адгезійна міцність, твердість, шорсткість та товщина лакофарбового шару (рис. 2.5).

Висновки до розділу 2

Підсумовуючи результати, отримані в розділі 2, та спираючись на залежності (2.16–2.20), можна констатувати, що інтенсивність абразивного зношування полімерних матеріалів визначається насамперед твердістю покриття та станом його поверхні, зокрема параметрами шорсткості. Саме ці характеристики формують опір поверхні дії абразивних частинок рослинної маси у процесі експлуатації.

Розглянута теорія зовнішнього тертя і зношування дозволяє виокремити твердість та шорсткість як основні параметри ЛФП, що визначають характер і швидкість його руйнування під час взаємодії з рослинною масою. Таким чином, ці властивості слід розглядати як ключові критерії при виборі лакофарбових матеріалів і розробленні технології фарбування робочих поверхонь жаток зернозбиральних комбайнів.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Методика експериментальних досліджень та випробування лакофарбових покриттів

Об'єктом дослідження є сталеві 24 пластини, виготовленими з матеріалу марки 08КП. На ці зразки було нанесено два види лакофарбових покриттів: епоксиполіефірне порошкове покриття чорного кольору (ЛФП №1) та рідкий алкідний лакофарбовий матеріал жовтого кольору (ЛФП №2). Половина вибірки, тобто 12 пластин, перед нанесенням покриття проходили процес фосфатування з використанням розчину КФ-14, що забезпечує утворення фосфатного адгезійного шару для покращення зчеплення металу з покриттям.

Методика випробувань включала низку взаємопов'язаних процедур. Спершу готували фосфатувальний розчин і проводили обробку металевих поверхонь, у результаті якої формувався шар кристалічних фосфатів заліза і цинку, що підвищує адгезію, зменшує тертя, виконує електроізоляційну та корозійно-захисну функції. Далі контролювали характеристики робочих розчинів, визначаючи загальну та вільну кислотність. Після цього здійснювали попередню підготовку сталевих пластин і безпосереднє нанесення фосфатного покриття.

На наступному етапі визначали питому масу утвореного фосфатного шару та кількість стравленого металу, після чого проводили прискорену оцінку захисних властивостей фосфатної плівки та здійснювали завершальну обробку поверхні. Після підготовчих процесів на пластини наносили лакофарбові покриття обох типів і виконували випробування на адгезійну міцність.

Подальші вимірювання охоплювали визначення блиску та параметрів шорсткості поверхні, підготовку металографічних зразків, дослідження морфології та рельєфу поверхні. Також проводили вимірювання товщини лакофарбового покриття, оцінювання його стійкості до зношування, визначення термічної стабільності та завершальні випробування на корозійну стійкість.

3.2 Підготовка реагентів та робочих розчинів для проведення фосфатування

Розчини та концентрати готували з використанням хімічних реагентів класу чистоти «Ч» і дистильованої води. Сухі інгредієнти - магній сірчаноокислий, нікель азотноокислий, кальцинована сода, мідь сірчаноокисла та окис цинку - вводили поступово у водні суміші, що містили визначену кількість азотної та ортофосфорної кислот, забезпечуючи безперервне перемішування.

Для інтенсифікації реакції до складу додавали прискорювачі - у вигляді порошкових форм або розчинів заданої концентрації. Підтримання стабільного вмісту іонів NO_2^- здійснювали шляхом дозованого введення розчину натрію нітриту (1,3 г/л) зі швидкістю 3 мл/хв, що було необхідним через нестійкість нітрит-іонів у кислих середовищах.

Регулювання кислотності розчину проводили за допомогою 5%-ного розчину $NaOH$. Для встановлення рівноважних значень загальної та вільної кислотності 60 мл підготовленого розчину переносили у скляну посудину та нагрівали на водяній бані до визначеної температури. У процесі нагрівання поступово додавали 1%-ний розчин $NaOH$ до моменту появи опалесценції, підтримуючи інтенсивне перемішування. Далі розчин фільтрували при робочих температурах і охолоджували до 21–22 °С.

Методика визначення рівноважних величин вільної та загальної кислотності наведена у відповідному підрозділі експериментальної частини.

3.3 Методика визначення вільної та загальної кислотності

Для визначення кислотності 15 мл підготовленого, відфільтрованого та охолодженого розчину переносили у конічну колбу місткістю 300 мл. До зразка додавали 6...9 крапель фенолфталеїну, після чого проводили титрування 0,1%-

ним розчином гідроксиду натрію до появи стійкого рожевого відтінку, який зберігався протягом 25 секунд. Об'єм витраченого 0,1%-ного розчину $NaOH$ для титрування 15 мл фосфатувального розчину приймали як показник загальної кислотності.

Методика визначення вільної кислотності аналогічна до процедури для загальної кислотності, однак відрізняється використанням індикаторів. Замість фенолфталеїну застосовували метилоранж або бром-феноловий синій. Титрування здійснювали до переходу забарвлення: від червоного до світло-бежевого з помаранчевим відтінком або від жовтуватого до синього (точка переходу відповідає $pH \approx 3,6$).

3.4 Підготовка зразків перед проведенням фосфатування

Для виконання випробувань застосовували 12 сталевих пластин, виготовлених із матеріалу марки 08кп. Перед нанесенням фосфатного покриття зразки проходили попередню підготовку, яка включала знежирення поверхні спеціальним складом КМ-25. Після знежирення проводили активацію поверхні у розчині АФ-4 концентрацією 1 г/л при температурі 20–35 °С протягом двох хвилин, забезпечуючи постійне перемішування.

Фосфатування виконували у ваннах з нержавіючої сталі об'ємом 3 літри, оснащених термоелектричними нагрівачами. Підігрів здійснювали через водяну сорочку, а стабільність температури підтримували за допомогою реле та контактних термометрів упродовж всього процесу. Час фосфатування становив від 1 до 10 хвилин. Після завершення обробки зразки промивали спочатку проточною водою, потім дистильованою, а остаточне висушування проводили методом конвективної сушки при температурі 55–65 °С.

Масу стравленого металу $m_{стр}$ та масу сформованого фосфатного шару $m_{ф}$ визначали відповідно до встановлених розрахункових залежностей.

$$m_{\phi} = \frac{(m_2 - m_3)}{S} \quad (3.1)$$

$$m_{\phi} = \frac{(m_1 - m_3)}{S} \quad (3.2)$$

m_1 – маса дослідного зразка до процесу фосфатування, г;

m_2 – маса дослідного зразка після процесу фосфатування, г;

m_3 – маса дослідного зразка після усунення фосфатних плівок, г;

Зважування зразків здійснювали з використанням високоточного лабораторного обладнання - аналітичних ваг *AND GR-200*, що забезпечують необхідну точність вимірювань (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Аналітичні ваги *AND GR – 200*

Видалення фосфатного шару з експериментальних пластин здійснювали шляхом оброблення у розчині, що містив 50 г/л CrO_3 , при температурі 80 °C протягом 2–3 хвилин. Після хімічного очищення зразки ретельно промивали водою та висушували. Похибка методу визначення маси фосфатного шару, зумовлена стравленням металу під час обробки у розчині CrO_3 , не перевищувала 0,02 г/м².

Оцінювання властивостей сформованого фосфатного покриття проводили методом крапельної проби із застосуванням реактиву Акімова. Якість шару

визначали за проміжком часу, необхідним для переходу контрольної ділянки під краплею від сірого до червоно-коричневого забарвлення.

Перед нанесенням лакофарбового матеріалу поверхню сталевих пластин із фосфатним підшаром обробляли шляхом хроматної пасивації. Оброблення здійснювали у відповідному розчині при температурі 50 °С впродовж однієї хвилини.

Порошкове лакофарбове покриття №1 наносили методом електростатичного розпилення за допомогою пістолета-розпилювача марки СТАРТ-50 (рис. 3.2). Після нанесення зразки розміщували у сушильну шафу ШС-80-01 та піддавали термічному оплавленню при температурі 180 °С (рис. 3.3).



Рис. 3.2 - Електростатичний розпилювач — пістолет марки Старт — 50.



Рис. 3.3 - Сушильна шафа марки ШС — 80 — 01

Рідке лакофарбове покриття №2 наносили методом пневматичного розпилення із застосуванням фарбопульта *ANEST IWATA W-400* (рис. 3.4).



Рис. 3.4 - Фарбопульт *ANEST IWATA W* – 400

Перевірку адгезійних властивостей покриття здійснювали за допомогою тестера адгезії *Elcometer 107* (рис. 3.5), застосовуючи методику поперечного надрізу.



Рис. 3.5 - Тестер оцінювання адгезії *Elcometer 107*.

Метод поперечної насічки у поєднанні з тестером адгезії дозволив визначити рівень зчеплення лакофарбового покриття з основою для всіх експериментальних зразків. Оцінювання адгезії проводили відповідно до вимог міжнародного стандарту *ISO 2409*.

Насічки наносили вручну спеціальним ріжучим інструментом, виконуючи прорізи крізь плівку покриття до металевої основи у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Утворений сітчастий рисунок очищували м'якою щіткою, здійснюючи рухи вперед-назад п'ять разів по діагоналі сітки, щоб видалити слабо утримувані фрагменти покриття.

Після очищення на насічену поверхню наклеювали стандартну контрольну стрічку, яка відповідала вимогам *STM D3359* (рис. 3.6). Стрічку різко відривали під кутом близько 60° , після чого проводили візуальне оцінювання стану решітки та характеру відшарувань покриття.

Рис. 3.6 – Схема наклеювання та відривання контрольної стрічки: *a* – зона оцінювання; *b* – напрямок відриву; 1 – стрічка за *ASTM D3359*; 2 – лакофарбове покриття; 3 – сітка насічок; 4 – опорна поверхня.

Результати оцінювання, отримані відповідно до рис. 3.6, були зафіксовані та внесені до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Класи адгезійної оцінки покриттів, визначені методом поперечної насічки

Опис	Вигляд	ASTM D3359
Краї насічок залишаються рівними, без пошкоджень, і жоден із сегментів сітки не зазнав відшарування.		0
Спостерігається відокремлення невеликих фрагментів покриття в місцях перетину насічок. Сумарна площа відшарувань у зоні решітки не перевищує 5 %.		1
Відмічається відшарування покриття вздовж країв насічок або в місцях їх перетину. Загальна площа відокремлення покриття у зоні решітки суттєво перевищує 5 %, однак не перевищує 15 %.		2
Спостерігається часткове або локальне відшарування покриття великими фрагментами вздовж країв насічок та/або повне відокремлення покриття від окремих сегментів решітки. Загальна площа відшарувань у зоні поперечних насічок істотно перевищує 15 %, але не перевищує 35 %.		3
Виявлено значне відшарування покриття великими фрагментами вздовж країв насічок та/або повне відокремлення його від окремих ділянок поверхні. Загальна площа відшарувань у зоні решітки істотно перевищує 35 %, проте не перевищує 65 %.		4
Будь-який рівень відшарування покриття, що не підпадає під критерії класу 4, відноситься до даної категорії.		5

Відповідно до міжнародного стандарту *ISO 2813*, визначали блиск покриття, який застосовується до пігментованих ЛФМ і регламентує методику оцінки блиску покриття. Для проведення вимірювань використовували блискомір *Elcometer 480*, який забезпечує вимірювання відбивання світла під кутами падіння 20° , 60° та 85° (рис. 3.7).



Рис. 3.7 - Блискомір *Elcometer 480*

Визначення показника блиску покриття здійснювали відповідно до міжнародного стандарту *ISO 2813*, який регламентує методику оцінювання оптичних характеристик пігментованих лакофарбових матеріалів. Для проведення вимірювань застосовували блискомір *Elcometer 480*, що дає змогу фіксувати інтенсивність відбитого світлового потоку при кутах падіння 20° , 60° та 85° (рис. 3.7).

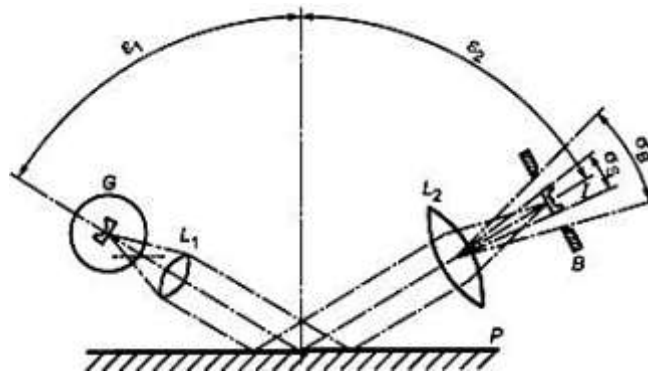


Рис. 3.8 – Принципова схема роботи блискоміра: G – джерело світла; L_1 , L_2 – оптичні лінзи; B – польова діафрагма приймального блока; ε_1 – кут падіння променя; ε_2 – кут відбиття ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$); σ_B – апертурний кут приймальної системи; σ_S – апертурний кут зображення джерела; I – зображення нитки розжарення.

Для оцінки блиску покриттів із низьким рівнем глянце (менше 30 одиниць) та високим рівнем глянце (понад 70 одиниць) застосовували кут падіння світла 60° . Вимірювання проводили блискоміром у трьох випадково вибраних точках досліджуваної поверхні. Якщо покриття мало виражену текстуру або спрямований рельєф (наприклад, характерний відбиток чи нерівномірний малюнок), визначення блиску виконували окремо у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Для кожної пластини обирали три незалежні ділянки вимірювання. Підсумкове значення блиску визначали як середнє арифметичне трьох результатів за умови, що різниця між максимальним та мінімальним показниками не перевищувала 5 одиниць.

Параметри шорсткості поверхонь визначали за допомогою профілометра *Mitutoyo Surftest SJ-310* (рис. 3.9). Алмазний наконечник вимірювального щупа здійснював сканування покриття відповідно до вимог стандарту *ISO 1997*, що забезпечувало точне відтворення мікрогеометрії досліджуваних зразків.



Рис. 3.9 - Портативний профілометр *Mitutoyo Surftest SJ – 310*

Шорсткість є важливою геометричною характеристикою поверхонь, що визначає не тільки декоративні властивості покриття, а й значною мірою впливає на його зносостійкість, здатність протидіяти корозійним процесам, антифрикційні показники та загальні експлуатаційні параметри.

На профілометрії виконували вимірювання шести параметрів шорсткості, передбачених чинними стандартами для оцінки мікрогеометрії поверхні.

Висновки до розділу 3

Отже, у третьому розділі докладно описано методику проведення експериментальних досліджень, необхідних для оцінки якості та довговічності лакофарбових покриттів, що застосовуються у машинобудуванні, зокрема під час ремонту та відновлення елементів сільськогосподарської техніки. Наведено повний цикл підготовки зразків: знежирення, фосфатування, хроматна пасивація та нанесення порошкових і рідких лакофарбових матеріалів.

Подано методики визначення основних експлуатаційних характеристик покриттів - адгезії, блиску, товщини, шорсткості, стійкості до зношування, корозії та термічних впливів - параметрів, що є визначальними для забезпечення надійності деталей у машинобудівних конструкціях.

Випробування виконували із застосуванням сучасного вимірювального обладнання: електростатичних пістолетів-розпилювачів, профілометрів, блискомірів, тестерів адгезії. Процедури проводилися згідно з міжнародними стандартами, що гарантує точність і відтворюваність результатів.

Описана експериментальна методика є важливою складовою досліджень у галузі машинобудування та служить основою для подальшої оцінки впливу технологій та матеріалів на довговічність і працездатність покриттів елементів сільськогосподарських машин.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведено оцінку адгезійних характеристик лакофарбових покриттів, нанесених на сталеві зразки як із фосфатним адгезійним підшаром, так і без нього. Визначення ступеня зчеплення покриття з основою виконували за допомогою тестера адгезії.

Таблиця 4.1 – Показники адгезії лакофарбових покриттів

№	Зразок		Адгезія покриття по 5 бальній шкалі
	Покриття	Наявність фосфатного адгезійного підшару	
1	ЛФП №1	відсутнє	0
2		присутнє	0
3	ЛФП №2	відсутнє	1
4		присутнє	0

Отримані експериментальні результати свідчать, що порошкові лакофарбові покриття, незалежно від наявності фосфатного підшару, забезпечують високий рівень зчеплення з металевою основою. За класифікацією *ASTM D3359* вони відповідають класу 0, що характеризується максимальною адгезійною стійкістю. Як видно з фотоматеріалу (рис. 4.1, а), після відриву контрольної стрічки контури насічок залишилися рівними, а елементи решітки не зазнали відшарувань.

ЛФП №1

ЛФП №2

Рис 4.1 - Стан досліджуваної поверхні в області перехресних надрізів після видалення клейкої стрічки

Адгезійні властивості рідкого лакофарбового матеріалу (ЛФП №2), нанесеного без фосфатного підшару, відповідають балу 1 за стандартом *ASTM D3359*, що свідчить про нижчу міцність зчеплення порівняно з порошковим покриттям №1. Як видно на фотографії (рис. 4.1, б), площа відшарування у зоні перехресних насічок перевищує 5%, але не більше 15%, що і визначає належність до цього класу. Проведені дослідження підтвердили, що застосування фосфатного адгезійного шару суттєво покращує зчеплення рідкого ЛФП №2 із металевою основою, підвищуючи його адгезійну характеристику до класу 0.

Показники блиску покриттів наведено у таблиці 4.2. Отримані результати свідчать, що порошкове покриття №1 формує високоглянцеву поверхню з рівнем блиску понад 70 одиниць. На відміну від нього, рідке лакофарбове покриття №2 характеризується низьким показником блиску (менше 70 одиниць), що дозволяє віднести його до групи матових або напівматових поверхонь.

Таблиця 4.2 – Показники блиску лакофарбових покриттів

ЛФП №1 (порошкова краска)			ЛФП № 2(рідка краска)		
кут	Значення, GU	Середнє значення, GU	Кут	Значення, GU	Середнє значення, GU
20°	70,4	71,33	20°	64	62,1
	71,3			61,8	
	73			60,5	
50°	87,4	88,133	50°	84,3	84,733
	89,4			85,2	
	88,6			84,7	
85°	96,5	95,17	85°	84,3	84,133
	93,8			87	
	95,2			81,1	

Встановлено, що проведений попередній процес фосфатування не чинить впливу на показники блиску лакофарбового покриття. Додатково досліджено

параметри шорсткості сформованих лакофарбових шарів. Отримані результати вимірювань наведені у таблиці 4.3 та візуалізовані на рисунках 4.2 і 4.3.

Таблиця 4.3 – Показники шорсткості лакофарбових покриттів

	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	Клас шорсткості
Без покриття	0,084	0,111	0,749	0,356	0,393	10
ЛФП №1	0,088	0,121	0,704	0,226	0,478	10
ЛФП №1 з фосфатним підшаром	0,080	0,103	0,467	0,287	0,180	10
ЛФП №2	0,192	0,237	0,871	0,370	0,501	9
ЛФП №2 з фосфатним підшаром	0,194	0,248	1,362	0,804	0,558	9

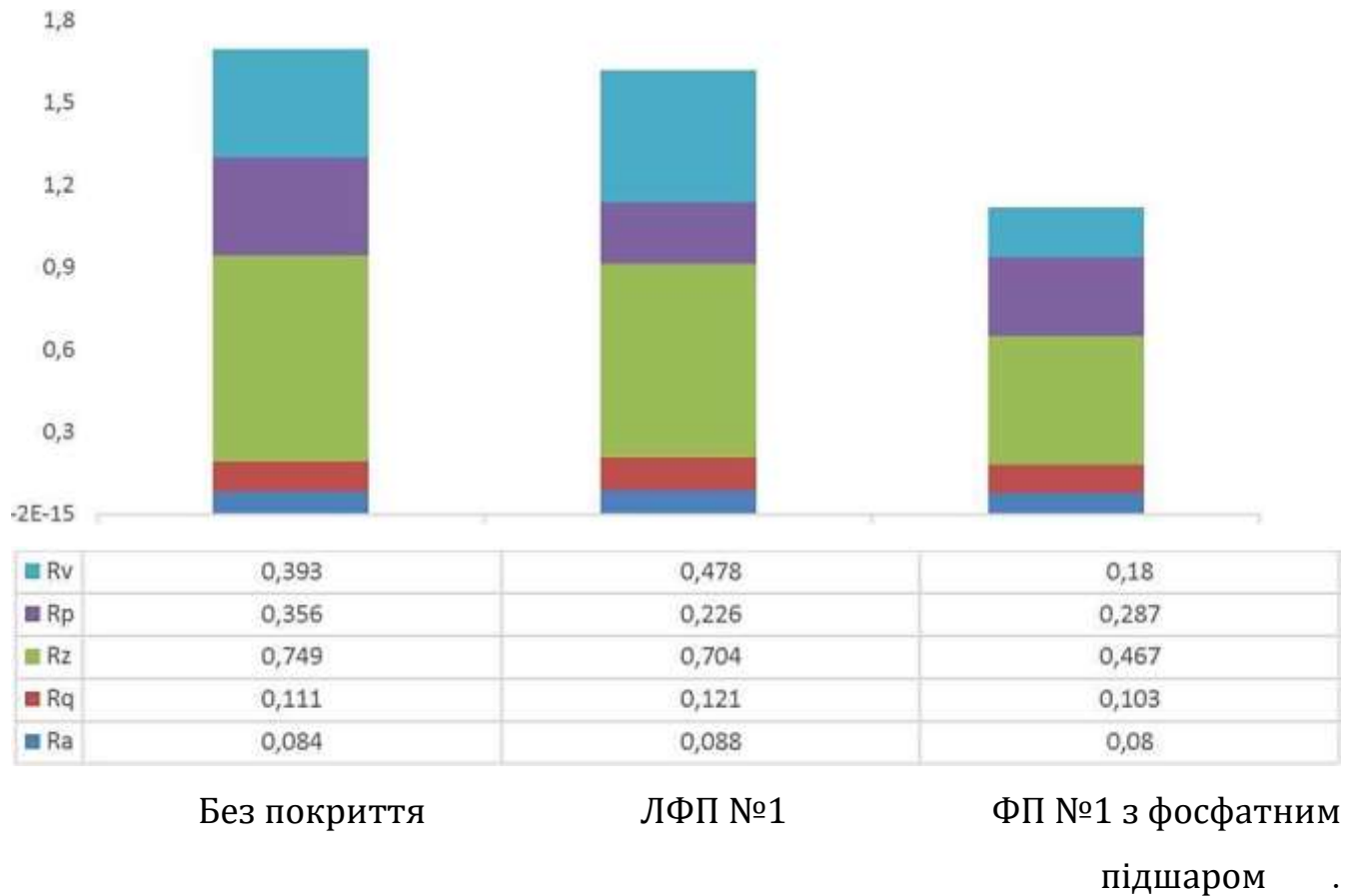


Рис. 4.2 - Показники шорсткості лакофарбового покриття ЛФП №1 чорного кольору, отриманого з епоксиполіефірного порошкового матеріалу.

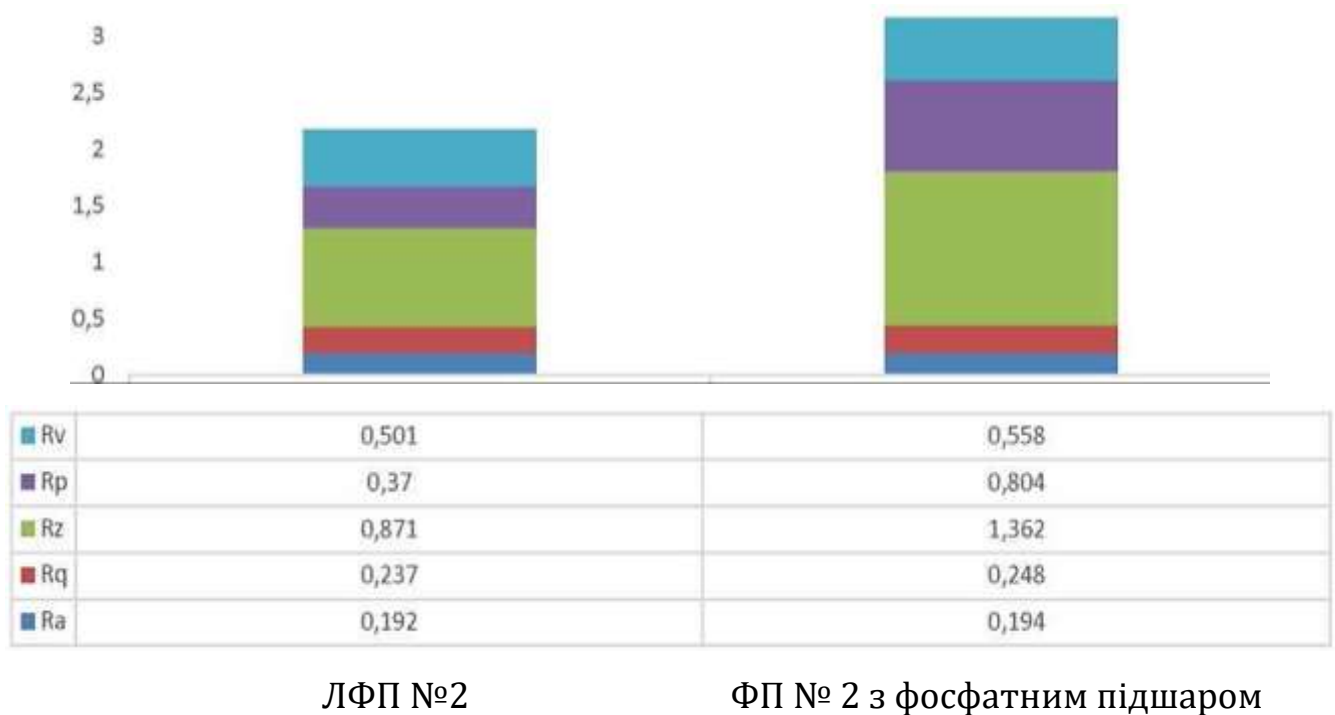


Рис. 4.3 - Параметри шорсткості лакофарбового покриття ЛФП №2 жовтого кольору, виготовленого на основі рідкого алкідного матеріалу.

Результати проведених вимірювань показали, що порошкові лакофарбові покриття мають нижчі значення шорсткості, що відповідають 10-му класу за стандартами. Натомість ЛФП, виготовлені на основі рідкого алкідного матеріалу, характеризуються шорсткістю на рівні 9-го класу. Встановлено, що попереднє фосфатування практично не впливає на показники шорсткості обох типів покриттів.

Товщину лакофарбового шару визначали за допомогою металографічного мікроскопа. У зв'язку зі складністю візуалізації структури жовтого покриття №2 під оптичним збільшенням, його поверхню попередньо тонували чорним маркером для покращення контрастності. Як видно на фотознімках (рис. 4.4), покриття ЛФП №2 містить значну кількість пор, що свідчить про менш однорідну структуру порівняно з порошковим матеріалом.

Рис. 4.4. Морфологічні особливості поверхні лакофарбових покриттів ЛФП №1 (епоксиполіефірне порошкове) та ЛФП №2 (рідке алкідне)

На рис. 4.4 наведено збільшені (у 300 разів) металографічні зображення шліфів лакофарбових покриттів досліджуваних пластин. Такий масштаб збільшення дав змогу визначити фактичну товщину покриттів: для ЛФП №1 вона становить 60...65 мкм, тоді як для ЛФП №2 - 45...50 мкм.

Отримані результати вимірювання товщини шару (δ) були додатково підтверджені за допомогою товщиноміра *Elcometer 456*, що забезпечило достовірність отриманих даних. Як і очікувалось, товщина порошкового покриття (ЛФП №1) значно перевищує товщину рідкого алкідного покриття (ЛФП №2).

Окрім того, було проведено оцінку зносостійкості ЛФП, результати якої подано в табл. 4.4 та проілюстровано на рис. 4.5.

Таблиця 4.4 – Показники зносостійкості лакофарбового покриття

Коефіцієнт зносу	ЛФП №1	ЛФП №1+ фосфатування	ЛФП №2	ЛФП №2 + фосфатування
У	123,9	150	114,9	130

Дослідження засвідчили, що порошкове лакофарбове покриття має суттєво вищу зносостійкість порівняно з рідким, а виконане перед нанесенням фосфатування забезпечує додаткове підвищення стійкості до зношування приблизно на 15–20%.



Рис. 4.5 - Порівняння зносостійкості лакофарбових покриттів ЛФП №1 та ЛФП №2

Проведені корозійні випробування відповідно до міжнародного стандарту ASTM B117, який регламентує методику оцінювання корозійної стійкості металів, лакофарбових матеріалів, пластмас та інших покриттів у камері соляного туману, показали суттєву різницю між досліджуваними зразками.

Сталеві пластини з порошковим лакофарбовим покриттям зберегли нормативну захисну здатність як за наявності адгезійного фосфатного шару, так і без нього: ширина поширення корозії від надрізу після 240 годин експозиції не перевищила 2,0 мм, що відповідає вимогам стандарту (рис. 4.6).

На відміну від цього, рідке алкідне лакофарбове покриття без фосфатного підшару продемонструвало недостатній рівень корозійної стійкості - зона підплівкової корозії перевищила 2,0 мм, що свідчить про невідповідність вимогам

захисної здатності. Застосування фосфатування перед нанесенням рідкого покриття суттєво покращило результат: ширина поширення корозії зменшилася до 1,5 мм, що підтверджує ефективність фосфатного шару як адгезійно-захисного проміжного покриття.

Дослідження теплостійкості ЛФП показали, що обидва типи покриттів - порошкове та рідке - зберігають свої властивості під впливом підвищених температур. Після термічних випробувань на поверхнях не виявлено змін кольору, дефектів чи порушень морфологічної структури незалежно від того, чи був нанесений фосфатний підшар. Контрольні зразки та термічно навантажені не мали видимих відмінностей, що свідчить про достатній запас теплостійкості покриттів.

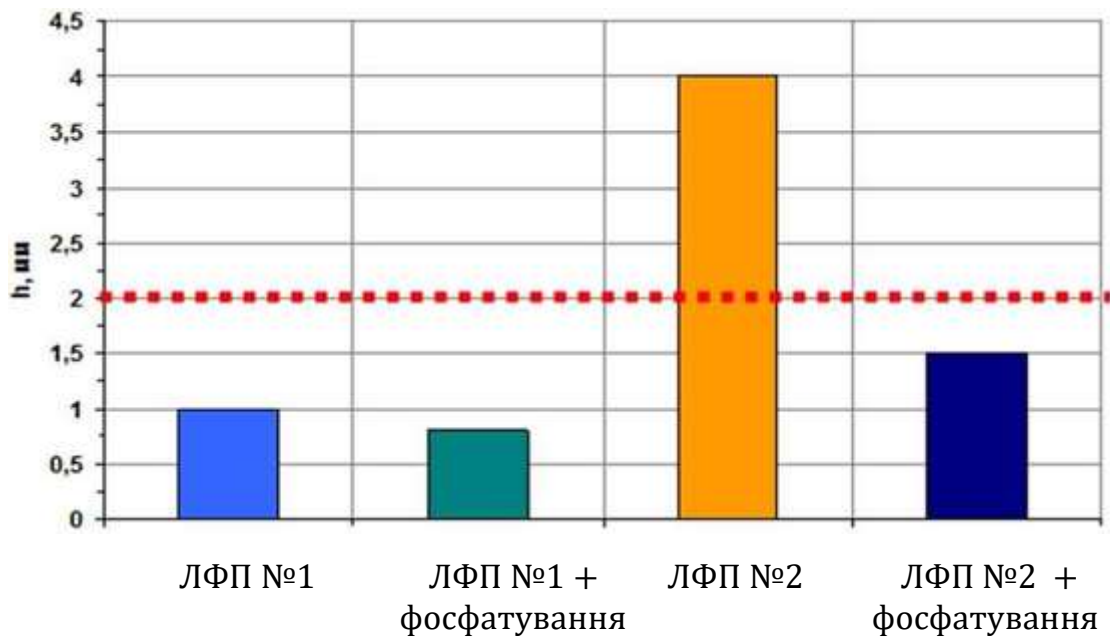


Рис. 4.6. Результати корозійних випробувань за *ASTM B117*; h – ширина підплівкового відшарування лакофарбового покриття від лінії надрізу

На підставі опрацьованих експериментальних даних встановлено, що порошкове лакофарбове покриття (ЛФП №1) повністю відповідає вимогам до захисних покриттів, визначених стандартом *ASTM B117*, як у варіанті з фосфатним

адгезійним підшаром, так і без нього. Натомість лакофарбове покриття на основі рідкого матеріалу (ЛФП №2) забезпечує нормативний рівень корозійної стійкості лише за умови застосування фосфатного підшару.

Комплексний порівняльний аналіз показав, що ЛФП №1 має суттєві переваги над ЛФП №2 за експлуатаційними характеристиками. Порошкове покриття характеризується вищим блиском, меншою пористістю, нижчими значеннями шорсткості, кращою адгезією до металевої основи та підвищеною зносостійкістю. Попереднє фосфатування сприяє помітному поліпшенню експлуатаційних властивостей обох типів покриттів, особливо у частині підвищення зносостійкості та формування стабільного бар'єрного шару, що пригнічує розвиток підплівкової корозії.

Отримані результати підтверджують доцільність використання фосфатного оброблення як базової операції технологічного процесу ремонтного фарбування у машинобудуванні та технічному сервісі сільськогосподарської техніки.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Охорона праці під час роботи з обладнанням для нанесення лакофарбових покриттів

Безпечна організація робіт із нанесення лакофарбових покриттів у машинобудуванні та технічному сервісі сільськогосподарської техніки передбачає дотримання комплексу вимог, спрямованих на запобігання впливу шкідливих факторів на працюючих. Під час виконання технологічних операцій основну небезпеку становлять леткі органічні сполуки, токсичні компоненти лакофарбових матеріалів, підвищена температура обладнання, можливість займання або вибуху парів розчинників, а також механічні ризики, пов'язані з використанням розпилювальних пістолетів, сушильних шаф та компресорних установок.

Підготовка приміщення для фарбувальних робіт повинна забезпечувати відповідний рівень вентиляції. Примусова припливно-витяжна система створює локальний відвід парів і запобігає їх накопиченню в робочій зоні. Повітряні потоки мають забезпечувати кратність обміну, достатню для утримання концентрації розчинників у межах допустимих рівнів. Приміщення повинно бути вибухозахищеним, із заземленими металевими елементами та освітленням у вибухобезпечному виконанні.

Устаткування для нанесення покриттів повинно перебувати у справному стані, а його технічне обслуговування здійснюється відповідно до регламенту. Під час роботи з фарбопультами важливо контролювати цілісність шлангів високого тиску, герметичність з'єднань та відсутність витоків. Розпилення ЛФМ здійснюється лише при справних фільтрах компресора, що унеможливорює попадання мастила або конденсату в матеріал.

При використанні сушильних шаф слід дотримуватися температурних режимів, встановлених технологічною картою. Важливо виключити перегрів, який може спричинити випаровування летких фракцій і підвищення тиску усередині камери. Доступ до нагрітих елементів здійснюється лише після їх охолодження до безпечної температури.

Працівник має бути забезпечений засобами індивідуального захисту. Під час фарбування використовуються фільтрувальні респіратори, захисні окуляри, прогумовані рукавички, комбінезони з антистатичним покриттям. Важливо уникати контакту лакофарбових матеріалів зі шкірою та слизовими оболонками, оскільки багато компонентів ЛФМ володіють сенсibiliзуючою і токсичною дією.

Особливу увагу приділяють пожежній безпеці. У зоні фарбування забороняється виконання будь-яких робіт, пов'язаних з утворенням іскри, і використання відкритого вогню. Балони зі стиснутим повітрям або газами повинні зберігатися окремо в вертикальному положенні. Приміщення забезпечується вогнегасниками відповідного типу, а персонал проходить інструктаж з їх використання.

Зберігання ЛФМ здійснюється у герметичній тарі, у провітрюваних металевих шафах, на відстані від джерел тепла. Відходи лакофарбових матеріалів, забруднені серветки, фільтри та абсорбенти збираються у металеві контейнери з кришками, щоб запобігти самозайманню.

Дотримання вимог охорони праці та пожежної безпеки під час нанесення лакофарбових покриттів у машинобудуванні є необхідною умовою для мінімізації виробничих ризиків, запобігання професійним захворюванням та забезпечення стабільності технологічного процесу. Безпечна організація таких робіт забезпечує не лише збереження здоров'я персоналу, але й підвищує якість покриттів, їх довговічність і надійність в умовах експлуатації сільськогосподарської техніки.

5.2. Засоби індивідуального захисту під час виконання робіт із лакофарбовими матеріалами.

Засоби індивідуального захисту застосовуються у випадках, коли створити безпечні умови праці лише за рахунок конструктивних рішень, організації виробництва або колективних засобів захисту неможливо. Необхідність їх використання регламентується Законом України «Про охорону праці» (ст. 10), згідно з яким працівники, що виконують роботи у шкідливих, небезпечних або специфічних умовах, забезпечуються спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту за рахунок роботодавця. Перелік професій, що підлягають забезпеченню ЗІЗ, визначається підприємством відповідно до галузевих норм і погоджується з органами державного нагляду. Порядок видачі та експлуатації ЗІЗ встановлюється «Положенням про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту» (наказ Держнаглядохоронпраці №170 від 29.10.1996 р.).

При роботі з лакофарбовими матеріалами у машинобудуванні та технічному сервісі важливим є захист органів дихання, шкіри, очей та рук. У зоні розпилення ЛФМ у повітрі з'являються леткі органічні сполуки, аерозолі, тверді частинки пігментів і розчинники, що становлять небезпеку для працівника. Для захисту органів дихання використовують фільтруючі та ізолюючі протигази. Фільтруючі моделі ефективні за умов, коли концентрація шкідливих речовин не перевищує граничні нормативи і вміст кисню у повітрі не менший ніж 18 %. У випадку недостатньої кількості кисню, високих концентрацій органічних парів або роботи у закритих ємностях застосовуються шлангові чи автономні ізолюючі протигази. Для менш небезпечних операцій використовують респіратори, які захищають від парів розчинників або аерозольних частинок залежно від типу фільтра.

Спецодяг для фарбувальних робіт повинен бути виготовлений з антистатичних матеріалів, які не накопичують заряд і знижують ризик займання.

До спецодягу належать комбінезони, халати, куртки та інші елементи, що захищають працівника від лакофарбових матеріалів, пилу та бризок розчинників. Спеціальне взуття забезпечує захист стоп від механічних та хімічних впливів і повинно відповідати ГОСТ 12.4.103-80 за групами захисних властивостей.

Захист голови під час робіт у фарбувальних камерах, сушильних відділеннях та при переміщенні виробів забезпечується захисними касками. Для захисту рук використовують рукавиці або рукавички з полімерних матеріалів, гуми, нітрилу чи латексу залежно від хімічної стійкості до ЛФМ та розчинників. Для боротьби з шкідливим впливом речовин на шкіру застосовують дерматологічні засоби у вигляді кремів або паст, що створюють додатковий бар'єр.

Для захисту очей використовують спеціальні захисні окуляри або маски, що запобігають попаданню на слизову частинок фарби, розчинників або пилу. Тип окулярів добирається залежно від характеру технологічного процесу — від легких відкритих моделей до герметичних окулярів із вентиляцією.

З урахуванням санітарних вимог виробничі будівлі, де виконуються роботи з ЛФМ, повинні бути відокремлені від житлової забудови санітарно-захисною зоною. Її розмір визначають залежно від потужності джерел забруднення, технологічного процесу, концентрації органічних парів та інших небезпечних факторів. Озеленення захисних смуг дозволяє знизити рівень пилового і хімічного забруднення, а також шумовий фон.

Засоби індивідуального захисту є необхідною умовою безпечного виконання робіт, пов'язаних із нанесенням лакофарбових покриттів. Вони знижують вплив небезпечних чинників та забезпечують відповідність процесу вимогам охорони праці і санітарно-гігієнічних норм.

5.3. Основи фізіології, гігієни праці та виробничої санітарії.

Організація безпечних умов праці при виконанні операцій, пов'язаних із нанесенням та експлуатацією лакофарбових покриттів, потребує дотримання вимог виробничої санітарії, фізіології праці та гігієнічних норм. До таких вимог

належать контроль мікроклімату, забезпечення чистоти повітря робочої зони, оптимізація режимів роботи, раціональне планування виробничих приміщень та зниження впливу шкідливих факторів на організм працівника.

Санітарно-захисні зони відіграють важливу роль у забезпеченні належної якості повітря та мінімізації впливу виробничих викидів на населення. На зовнішній межі санітарно-захисної зони, що прилягає до житлової забудови, концентрації та рівні шкідливих факторів не повинні перевищувати встановлених гігієнічних нормативів (ГДК, ГДР). Для територій з особливим природоохоронним статусом — курортних та рекреаційних зон — максимально допустимий рівень шкідливих факторів повинен становити не більше 0,8 від відповідного нормативного значення.

З санітарно-гігієнічної точки зору важливим є благоустрій території підприємства. Озеленення, облаштування тротуарів, майданчиків для відпочинку та спортивних зон забезпечує поліпшення мікроклімату, зниження рівня пилу та газоподібних викидів, а також сприяє створенню комфортних умов праці та відпочинку. Рекомендовано, щоб площа озелених зон становила не менше ніж 10...15 % від загальної території виробничого майданчика.

Для поводження з виробничими відходами необхідно виділяти спеціально облаштовані ділянки. Вони мають бути огорожені, забезпечені твердим покриттям та мати зручний під'їзд для спеціалізованого транспорту. Забороняється зберігати відходи лакофарбових матеріалів (включно з шламами, залишками розчинників, фільтрами та забрудненими матеріалами) на відкритому ґрунті, оскільки це може призвести до забруднення ґрунту, підземних вод і атмосферного повітря.

Дотримання вимог фізіології та гігієни праці забезпечує оптимальний режим роботи персоналу. Правильно організовані перерви, належна вентиляція, контроль температурно-вологісного режиму, рівня освітленості та шуму сприяють

зменшенню втоми, підвищенню продуктивності праці та зниженню ризику професійних захворювань.

Комплексний підхід до виробничої санітарії та гігієни праці є необхідною умовою безпечної організації робіт з лакофарбовими покриттями у машинобудуванні та технічному сервісі, що забезпечує мінімізацію впливу шкідливих факторів на працівників і довкілля.

5.4. Основні вимоги до виробничих будівель та споруд.

Основні вимоги до будівель виробничого призначення викладені в СНіП 2.09.02-85.

При плануванні виробничих приміщень необхідно враховувати санітарну характеристику виробничих процесів, дотримуватись норм корисної площі для працюючих, а також нормативів площ для розташування устаткування і необхідної ширини проходів, що забезпечують безпечну роботу та зручне обслуговування устаткування.

Об'єм виробничих приміщень на одного працівника згідно з санітарними нормами повинен складати не менше 15 м^3 , а площа приміщень - не $< 4,5 \text{ м}^2$.

Якщо в одній будові необхідно розмістити виробничі приміщення, до яких з точки зору промислової санітарії та пожежної профілактики висуваються різні вимоги, то необхідно їх групувати таким чином, щоб вони були ізольованими один від одного. Цехи, відділення та ділянки зі значними шкідливими виділеннями, надлишком тепла та пожежонебезпечні необхідно розташовувати біля зовнішніх стін будівлі і, якщо допустимо за умовами технологічного процесу та потоковістю виробництва - на верхніх поверхах багатоповерхової будівлі. Не можна розташовувати нешкідливі цехи та ділянки (наприклад, механоскладальні, інструментальні тощо), а також конторські приміщення над шкідливими, оскільки при відкриванні вікон газу та пари можуть проникати в ці приміщення.

Приміщення, де розташовані електрощитове, вентиляційне, компресорне та інші види обладнання підвищеної небезпеки повинні бути постійно зачиненими на ключ, з тим, щоб в них не потрапили сторонні працівники.

Ширина основних проходів всередині цехів та дільниць повинна бути не < 1,5 м, а ширина проїздів – 2,5 м. Двері та ворота, що ведуть безпосередньо на двір, необхідно обладнати тамбурами або повітряними (тепловими) завісами. Важливе значення для здорових та безпечних умов праці мають раціональне розташування основного та допоміжного устаткування, виробничих меблів, а також правильна організація робочих місць. Порядок розташування устаткування і відстань між машинами визначаються їхніми розмірами, технологічними вимогами і вимогами техніки безпеки. Однак, у всіх випадках, до устаткування, що має електропривод, повинен бути вільний підхід з усіх сторін шириною не менше 1 м зі сторони робочої зони і 0,6 м – зі сторони неробочої зони. Виробничі меблі (шафи, стелажі, столи тощо) можна ставити впритул до конструктивних елементів будівлі - стін, колон.

Для обробки та захисту внутрішніх поверхонь конструкцій приміщень від дії шкідливих та агресивних речовин (наприклад, кислот, лугів, свинцю) та вологи використовують керамічну плитку, кислотостійку штукатурку, олійну фарбу, які перешкоджають сорбції цих речовин та допускають миття поверхонь.

Висота виробничих приміщень має бути не менше 3,2 м, а для приміщень енергетичного та складського господарства – 3 м. Відстань від підлоги до конструктивних елементів перекриття – 2,6 м. Галереї, містки, сходи і майданчики повинні бути завширшки не менше 1 м і загороджені поруччями висотою 1 м і внизу повинні мати бортики висотою 0,2 м.

Всі майданчики, які розташовані на висоті понад 260 мм від підлог повинні мати поруччя Санітарні металеві сходи для обслуговування обладнання встановлюються під кутом, що не перевищує 45° з відстань між сходами 230-

260 мм і шириною сходів 250-300 мм. Сходи виготовляються ребристими або із смугастої сталі. Ширина виходів з приміщень має бути не меншою 1 м, висота не 2,2 м. При русі транспорту через двері їх ширина повинна бути 0,8 м більше з обох боків габариту транспорту; Підлоги виробничих приміщень повинні бути зносостійкими, теплими неслизькими, щільними, легко очищуватись, а в деяких цехах, дільницях – волого-, кислото- та вогнестійкими. Через підлогу в інше приміщення не повинні проникати вода, мастила, шкідливі речовини, гази.

При проектуванні систем водопостачання та каналізації необхідно впроваджувати найбільш прогресивну технологію і устаткування для підготовки та подачі води, відведення та очистки промислових стоків, забезпечувати найменшу забрудненість стічних вод, можливість утилізації та використання відходів виробництва.

В проходах між цехами, вестибюлях, приміщеннях для відпочинку необхідно передбачати фонтанчики чи установки з газованою водою. В гарячих цехах повинні бути передбачені місця площею 2-3 м² для установок з охолодженою підсоленою газованою водою (5 г солі на 1 л води).

Відстань від найбільш віддаленого робочого місця до пристроїв питтєвого водопостачання не повинна перевищувати 75 м. Не допускається з'єднання мереж господарсько-питтєвого водопроводу з мережами спеціальних виробничих та протипожежних водопроводів, що подають не питтєву воду.

Всі стічні води спускаються в міську каналізаційну систему. Зливання в каналізаційну мережу відпрацьованих розчинів кислот, лугів, електролітів та інших хімічних речовин допускається лише після їх нейтралізації та очищення. Забороняється зливати в каналізаційну мережу толуол, ацетон, бензин, мінеральні мастила.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

У виконаній кваліфікаційній роботі досягнуто поставлену мету, що полягала у підвищенні довговічності та експлуатаційної надійності машинобудівних виробів шляхом удосконалення технології нанесення лакофарбових покриттів. Проведені теоретичні дослідження та експериментальні випробування дали змогу встановити закономірності формування властивостей покриттів, залежність їх захисної здатності від попередньої підготовки поверхні та ефективності фосфатного підшару.

Встановлено, що оптимізація технології нанесення покриттів, зокрема застосування епоксиполіефірних порошкових матеріалів і рідких алкідних систем, суттєво впливає на захисні властивості сформованого шару. Попереднє фосфатування забезпечує формування міцного адгезійного підґрунтя, яке підвищує стабільність покриття під дією механічних, кліматичних і корозійних чинників. Порошкові покриття продемонстрували значно вищі експлуатаційні характеристики, включно з підвищеною адгезією, гладкістю поверхні, блиском, рівномірністю структури та підвищеною стійкістю до зношування порівняно з рідкими алкідними системами. Експериментально встановлено, що фосфатний підшар додатково зменшує пористість покриттів та помітно підвищує їх корозійну стійкість.

Корозійні та термічні випробування підтвердили, що порошкове покриття повністю відповідає вимогам стандарту ASTM B117 навіть за відсутності адгезійного підшару. Рідке покриття демонструє необхідну захисну здатність лише після попереднього фосфатування. Дослідження зносостійкості засвідчили, що фосфатування забезпечує підвищення опору стиранню на 15–20 %, що є значущим результатом для деталей, які працюють в умовах механічних навантажень та абразивного впливу.

У результаті аналізу наукових джерел та власних досліджень встановлено, що внутрішні напруження у лакофарбових покриттях є однією з головних причин їх передчасного руйнування. Доведено, що надмірна товщина плівки сприяє інтенсивному розтріскуванню та відшаровуванню навіть за достатнього рівня адгезії. Отримані емпіричні залежності підтверджують адекватність моделювання структурних і механічних змін у плівці та можуть використовуватися для прогнозування ресурсу покриттів.

Узагальнення результатів дослідження дає підстави рекомендувати застосування попереднього фосфатування в розчині КФ-14 як ефективного способу підвищення адгезійних та антикорозійних властивостей покриттів. Доцільним є використання епоксиполіефірних порошкових матеріалів як основного виду покриттів для відповідальних машинобудівних деталей, що працюють у контакті з абразивними частинками, під дією агресивних чинників або за умов значних коливань температур.

Оптимізація товщини плівки, контроль шорсткості та дотримання режимів підготовки поверхні є обов'язковими параметрами, які забезпечують довговічність лакофарбового покриття. Запропонований комплекс технологічних рішень може бути впроваджений у виробничі та ремонтні процеси машинобудівних підприємств, що дозволить підвищити надійність деталей, зменшити частоту обслуговування та скоротити витрати, пов'язані з експлуатаційними пошкодженнями.

Отримані результати підтверджують ефективність застосованих підходів та їхню практичну значущість для підвищення довговічності та захисної здатності лакофарбових покриттів машинобудівної продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воробей П. І., Кондратенко І. С. Хімічні технології одержання лакофарбових покриттів: Конспект лекцій. Харків : ХНТУСГ, 2020. 128 с.
2. Сергієнко А. М., Шевченко В. С. Технологія лакофарбових композиційних матеріалів: навчальний посібник. Київ : НАУ, 2019. 152 с.
3. Коваленко В. Ю., Іващенко О. П. Технологія нанесення сучасних антикорозійних покриттів та сучасні ЛКМ для антикорозійного захисту металів: наукова стаття. Київ : Видавництво "Airless", 2020. 68 с.
4. Марченко Г. О., Степаненко Н. І. Удосконалення лакофарбових матеріалів і покриттів: наукова стаття. Київ : КНТЕУ, 2021. 84 с.
5. Петренко Д. В., Орлов С. А. Аналіз технологічних особливостей виробництва лакофарбової продукції: наукова стаття. Київ : Молодий вчений, 2017. 92 с.
6. Халабуденко В. В., Лиходід І. В. Основи трибології: тертя, зношування та змазування. Київ : Політехніка, 2015. 380 с.
7. Roberge P. R. Handbook of Corrosion Engineering. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2012. 1072 p.
8. Літовченко В. Г., Андрущенко В. С. Основи теорії механізмів і машин. Харків : ХНУРЕ, 2017. 452 с.
9. Сергієнко А. М., Шевченко В. С. Технологія лакофарбових композиційних матеріалів: навчальний посібник. Київ : НАУ, 2019. 152 с.
10. Марченко Г. О., Степаненко Н. І. Удосконалення лакофарбових матеріалів і покриттів: наукова стаття. Київ : КНТЕУ, 2021. 84 с.
11. Петренко Д. В., Орлов С. А. Аналіз технологічних особливостей виробництва лакофарбової продукції: наукова стаття. Київ : Молодий вчений, 2017. 92 с.

12. Ковальчук В. І., Гончарук О. С. Сучасні лакофарбові покриття: матеріали науково-практичного вебінару. Київ : НУБіП, 2021. 68 с.
13. Кравченко Л. П., Білозерський М. С. Сучасні способи радіаційного сушіння лакофарбових матеріалів: наукова стаття. Харків: Радіотехніка, 2020. 58 с.
14. Дудла І. О. Дослідження властивостей і якості алкідних лакофарбових матеріалів // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. 2010. № 42. С. 302–307.
15. Голодюк Г. І. Дослідження атмосферостійкості фарбувальної композиції і лакофарбових покриттів на основі алкідних смол // Товарознавчий вісник: Збірник наукових праць. Луцьк, 2011. Вип. 3. С. 62–67.
16. Paints, Coatings and Solvents / Eds. Dieter Stoye, Werner Freitag. Weinheim : Wiley-VCH, 2008. 344 p.
17. Müller B. Principles of Formulation of Paints and Coatings. New York : Paint-Media, 2015. 234 p.
18. Барабаш С. В., Трофімова Ю. В. Розвиток лакофарбових матеріалів // Тези доповідей V міжнародної наукової конференції «Інноваційні технології, впровадження та розвиток»: Т. 2. Дніпропетровськ : ДНДІ, 2007. С. 46–47.
19. Надійність технічних систем : підручник / за ред. В. О. Петрова. Київ : Політехніка, 2015. 278 с.
20. Harun M. Application of Coatings to Agricultural Machinery for Corrosion Resistance // Journal of Surface Engineering. 2018. Vol. 25, No. 3. P. 112–120.
21. Vernède A., Pradel A. Coatings and Surface Treatments. Amsterdam : Elsevier, 2010. 412 p.
22. Practical Maintenance and Repair Techniques / Ed. H. A. Thomas. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2009. 298 p.