

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти Магістра
Бакалавра (Магістра)

Вибір матеріалів для антикорозійної обробки тролейбуса
Назва теми

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 132 Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва

Шифр КРМ МТВА 25 24366. 000 ПЗ

Виконав студент(ка) 2-го курсу
група МТВАм 24-1
Шифр


Підпис

Богдан БУРКОВСЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник к.т.н, ст. викл.
Науковий ступінь, вчене звання


Підпис

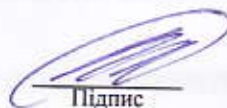
Анатолій ВИЧАВКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер доцент кафедри ТАМ
Посада


Підпис

Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва


Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 11 лютого 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Світньо-кваліфікаційний рівень магістр
Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»
Світньо-професійна програма «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

13 жовтня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бурковському Богдану

Прізвище, ім'я, по батькові

Тема роботи «Вибір матеріалів для антикорозійної обробки тролейбуса».

Рівень роботи Вичавка Анатолій Анатолійович, к.т.н., ст. викладач

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

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2025 р. № 65 (Д28)

Строк подання студентом роботи на кафедру 1 грудня 2025 року

Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, ефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.

Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

- 1 Аналіз умов експлуатації тролейбусів та існуючих методів антикорозійного захисту;
- 2 Обґрунтування вибору оптимальної системи антикорозійних матеріалів (грунти, емалі тощо);
- 3 Розробка технологічного процесу підготовки поверхні та нанесення обраних покриттів;
- 4 Проведення дослідження (експериментального або порівняльного) для оцінки ефективності обраних матеріалів;
- 5 Розробка заходів з охорони праці, безпеки та екологічності процесу.

Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на лайдах

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітки
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.09.2025</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.10. 2025</i>	
3	<i>Дослідницький розділ</i>	<i>15.11. 2025</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>22.11. 2025</i>	
5	<i>Оформлення презентації кваліфікаційної роботи</i>	<i>1.12. 2025</i>	
6	<i>Нормоконтроль кваліфікаційної роботи</i>	<i>5.12. 2025</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>5.12. 2025</i>	

Студент

Керівник роботи



 Підпис



 Підпис

Богдан Бурковський
 ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

Анатолій Вичавка
 ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

В
 24-1 Б
 тролей
 С
 стійкіс
 впливу
 темпер
 призво
 трансп
 60% по
 Іс
 пасивні
 металу
 констру
 вологи.
 У
 матеріа
 до коро
 М
 техноло
 Д
 1
 уражен
 2
 транспо
 3
 тролейб
 4
 обґрун
 Н
 урахува
 констру
 І
 техноло
 тролейб
 К
 рисунка
 складаєс
 Ключов
 ЗАХИС

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційну роботу (магістерську роботу) виконано студентом гр. МТВАм 24-1 Бурковського Богдана на тему: «Вибір матеріалів для антикорозійної обробки тролейбуса».

Однією з найважливіших проблем у сфері міського електротранспорту є корозійна стійкість конструкцій тролейбусів. Під час експлуатації тролейбуси постійно зазнають впливу агресивних факторів: атмосферних опадів, дорожніх реагентів, пилу, перепадів температур, впливу вологи у каркасних та порожнистих елементах. Корозія металевих частин призводить до зниження міцності несучих конструкцій, зменшення строку служби транспорту та зростання витрат на ремонт і технічне обслуговування. За даними фахівців, до 60% пошкоджень кузовних елементів громадського транспорту спричинено саме корозією.

Існує декілька основних напрямів антикорозійного захисту транспортних засобів: пасивний — застосування захисних покриттів, герметизуючих матеріалів, оцинкування металу; активний — використання електрохімічних та катодних систем захисту; конструктивний — розробка кузова з урахуванням мінімізації можливих зон скупчення вологи.

У кожного із перелічених методів є свої недоліки: складність ремонту, висока вартість матеріалів, обмежений строк ефективної дії. Тому підвищення стійкості кузовів тролейбусів до корозії є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в аналізі та виборі сучасних матеріалів і технологій антикорозійної обробки тролейбуса для збільшення строку його експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз конструкцій кузовів тролейбусів та основних зон корозійного ураження.
2. Дослідити властивості матеріалів та покриттів, що використовуються для захисту транспортних конструкцій.
3. Розробити рекомендації щодо вибору матеріалів для антикорозійної обробки тролейбуса з урахуванням умов експлуатації.
4. Провести оцінку ефективності запропонованих матеріалів та їх економічного обґрунтування

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до вибору матеріалів з урахуванням фізико-хімічних властивостей, довговічності, сумісності з базовими конструкційними сплавами та технологічних можливостей обробки.





Практична цінність полягає в можливості впровадження рекомендованих матеріалів та технологій у процес виробництва, капітального ремонту й сервісного обслуговування тролейбусів, що дозволяє продовжити строк їх служби без значного підвищення вартості.

Кваліфікаційна робота містить 94 сторінки машинописного тексту, ілюстрована 12 рисунками, 11 таблицями та містить список використаних джерел із 30 найменувань. Робота складається зі вступу, трьох розділів та висновків.

Ключові слова: ТРОЛЕЙБУС, КОРОЗИЯ, МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ, ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ, ДОВГОВІЧНІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 Аналіз корозійних процесів у конструкційних матеріалах тролейбуса	8
1.1 Конструкційні матеріали, що застосовуються у тролейбусобудуванні.....	8
1.2. Умови експлуатації тролейбусів та їх вплив на корозію.....	11
1.3. Види корозійних руйнувань металів (електрохімічна, атмосферна, контактна, щілинна тощо).....	13
1.4. Аналіз типових зон корозійних пошкоджень кузова і рами тролейбуса.....	18
РОЗДІЛ 2. Матеріалознавчі основи антикорозійного захисту	23
2.1 Механізм виникнення та розвитку корозії металів.....	23
2.2. Методи захисту: пасивація, легування, електрохімічний, лакофарбовий, гальванічний.....	26
2.3. Властивості і структура покривних матеріалів.....	31
2.4. Вплив складу та товщини покриття на корозійну стійкість.....	35
2.5. Вибір матеріалів для антикорозійного покриття тролейбуса.....	39
РОЗДІЛ 3. Дослідження властивостей антикорозійних покриттів	42
3.1. Методика відбору зразків металу та покриттів.....	42
3.2. Підготовка поверхні до нанесення покриття.....	45
3.3. Технологія нанесення вибраних антикорозійних матеріалів (грунти, фарби, полімерні шари).....	47
3.4. Експериментальні дослідження корозійної стійкості.....	50
3.5. Аналіз структури покриттів (мікроструктура, адгезія, товщина шару).....	53

<i>ДРМТВА 25.24366.000. ПЗ</i>				
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Бурковський		
Перевір.		Вичаєва		
Реценз.				
Н. Коопр.		Бабак		11.12.95
Затверд.		Диха		
Вибір матеріалів для антикорозійної обробки тролейбуса				
		Літ.	Арк.	Акресив
		4	94	
<i>ХНУ група МТВАм 24-1</i>				

РОЗДІЛ 4. Оцінка ефективності антикорозійних систем.....	57
4.1. Порівняльна характеристика різних типів покриттів.....	57
4.2. Визначення показників довговічності матеріалів.....	60
4.3. Аналіз результатів випробувань (соляний туман, кліматичні камери, експлуатаційні тести).....	63
4.4. Розрахунок прогнозованого терміну служби кузова тролейбуса....	67
4.5. Рекомендації щодо вибору оптимальної системи покриттів.....	70
РОЗДІЛ 5. Охорона праці та екологічна безпека при антикорозійній обробці.....	74
5.1. Аналіз шкідливих і небезпечних факторів при нанесенні покриттів.....	74
5.2. Засоби індивідуального захисту працівників.....	77
5.3. Екологічні вимоги до лакофарбових матеріалів.....	80
5.4. Утилізація відходів і заходи щодо зниження шкідливих викидів.....	83
Висновки.....	88
Список використаних джерел.....	91
ДОДАТОК.....	94

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Метою дипломної роботи є дослідження корозійних процесів у конструкційних матеріалах тролейбусів та обґрунтування вибору ефективних антикорозійних покриттів, визначення їхніх властивостей, довговічності та оптимальної структури для підвищення ресурсу кузова в умовах міської експлуатації.

Завдання дипломної роботи:

Провести аналіз умов експлуатації тролейбусів та визначити основні зони корозійних пошкоджень кузова і рами.

Дослідити механізми виникнення та розвитку різних видів корозії (атмосферної, електрохімічної, контактної, щілинної тощо) у конструкційних матеріалах тролейбуса.

Вивчити властивості сучасних антикорозійних матеріалів — епоксидних, поліуретанових, акрилових, мастикових і фосфатних покриттів.

Розробити методику відбору зразків і провести лабораторні випробування корозійної стійкості покриттів у соляному тумані, кліматичних камерах та умовах, наближених до експлуатації.

Оцінити адгезію, еластичність, товщину та структурні характеристики покриттів, визначити їхню ефективність і довговічність.

Побудувати прогноз терміну служби різних антикорозійних систем і порівняти їх ефективність.

Розробити оптимальну багат шарову антикорозійну систему для кузова тролейбуса з урахуванням технічних, економічних і екологічних вимог.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Надати рекомендації щодо впровадження екологічно безпечних технологій нанесення покриттів та зниження викидів ЛОС у відповідності до ISO 14001.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ КОРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ ТРОЛЕЙБУСА

1.1. Конструкційні матеріали, що застосовуються у троллейбусобудуванні

Розвиток міського електротранспорту зумовлює підвищені вимоги до конструкційних матеріалів, що використовуються у троллейбусобудуванні. Вибір матеріалів для несучих елементів, кузовів, агрегатів і допоміжних систем безпосередньо впливає на довговічність, експлуатаційну надійність та економічність транспортного засобу. Основними критеріями при доборі матеріалів є механічна міцність, корозійна стійкість, технологічність, вага, вартість та сумісність із захисними покриттями [1].

Кузов троллейбуса є несучою конструкцією, яка сприймає значні механічні навантаження під час руху, гальмування та взаємодії з дорожнім полотном.



Рисунок 1.1- Фото троллейбуса

Традиційно основним матеріалом для виготовлення кузова і рами є вуглецева та низьколегована сталь, яка має добру зварюваність і високу міцність. У вітчизняному троллейбусобудуванні поширене застосування сталей

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

марок СтЗсп, 09Г2С, 10ХСНД, які характеризуються підвищеною стійкістю до атмосферної корозії та добрими показниками пластичності [2].

Для підвищення ресурсу конструкцій сучасні підприємства (наприклад, ПАТ «ЛАЗ», ТОВ «Богдан Моторс», ДП «Електронтранс») впроваджують зварні просторові рами з профільних труб прямокутного або квадратного перерізу. Такі елементи виготовляють зі сталі 09Г2С або 20ХГ2Ц, які поєднують достатню міцність із відносно невеликою вагою. Окремі ділянки, схильні до втомних руйнувань і корозійних процесів (зони кріплення підвіски, опори кузова), додатково підсилюються листами нержавіючої сталі або захисними полімерними вставками.

З метою зменшення маси тролейбуса та підвищення енергоефективності все ширше застосовуються алюмінієві сплави. Найчастіше використовують сплави системи Al–Mg–Si (АМг5, АМг6), які мають задовільну корозійну стійкість, добру формоздатність і можливість зварювання напівавтоматичними методами [3]. Алюмінієві профілі застосовують у виготовленні обшивки кузова, каркасів дверей, рам вікон, а також у декоративних елементах салону. Перевагами алюмінієвих сплавів є мала густина, що зменшує масу порожнього тролейбуса на 10–15 %, а також утворення на поверхні пасивуючої оксидної плівки, яка гальмує подальшу корозію. Недоліком є вища вартість матеріалу та необхідність ізолювання від сталевих елементів для запобігання контактній (гальванічній) корозії.

Перспективним напрямом є використання композитних матеріалів — склопластиків, полімерно-армованих панелей, вуглепластиків. Вони мають малу вагу, високу хімічну стійкість і можливість формування складних профілів. У тролейбусах нового покоління композити застосовують для облицювальних панелей, бамперів, кришок люків, внутрішнього оздоблення салону. При цьому важливо забезпечити адгезійну сумісність композиту з металевими елементами кузова.

В електричних колах тролейбуса використовуються мідь та її сплави —

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

завдяки високій електропровідності, стійкості до окислення та добрим механічним властивостям. Провідники, контактні шини, з'єднувальні клеми виготовляють з мідних дротів марок М1, М2, іноді з лудженим покриттям для запобігання корозії. Для деталей, що зазнають тертя (втулки, підшипники, опорні кільця), застосовують бронзи та латуні, які мають добру зносостійкість і стабільні властивості при змащуванні.

У внутрішньому оздобленні тролейбусів широко використовуються полімерні матеріали (ПВХ, поліпропілен, АБС-пластик), що характеризуються малою вагою, декоративністю та хімічною інертністю. Однак під дією ультрафіолету й температурних коливань полімери можуть старіти, втрачаючи механічну міцність і блиск, тому потребують періодичної заміни або захисного покриття.

При проектуванні тролейбусів враховується комплекс факторів:

- механічні навантаження (розтяг, вигин, кручення);
- температурні впливи та вологість повітря;
- наявність агресивних домішок у міському середовищі (солі, реагенти, вихлопні гази);
- зварюваність та технологічність матеріалів;
- вартість і ремонтпридатність.

Важливим елементом є також взаємодія різних металів у спільній конструкції. Неправильне поєднання сталевих, алюмінієвих і мідних елементів може спричинити гальванічну корозію, особливо за наявності електроліту у вигляді дощової води або реагентів. Тому під час збирання застосовують прокладки з полімерів чи гумові ізолятори, а місця з'єднання покривають антикорозійними мастиками або лакофарбовими шарами.

Отже, у тролейбусобудуванні застосовується широкий спектр конструкційних матеріалів — від традиційних вуглецевих сталей до легких алюмінієвих сплавів і сучасних композитів. Кожен із них має свої переваги та обмеження, що зумовлюють необхідність оптимального комбінування при

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

проектуванні кузова й агрегатів.

Раціональний вибір матеріалів із урахуванням їхньої корозійної стійкості є ключовою передумовою підвищення довговічності та безпеки експлуатації тролейбуса.

1.2. Умови експлуатації тролейбусів та їх вплив на корозію

Експлуатаційні умови міських тролейбусів відзначаються складним поєднанням механічних, кліматичних і хімічних факторів, які істотно впливають на корозійні процеси в конструкційних матеріалах. На відміну від міжміського транспорту, тролейбуси працюють у густонаселених районах із високим рівнем промислових і транспортних викидів, частими зупинками та зміною режимів навантаження. Це створює умови для активного розвитку атмосферної, електрохімічної та контактної корозії, що скорочує строк служби кузова і рами транспортного засобу [4].

Основним природним чинником, що визначає інтенсивність корозії, є вологість повітря. У більшості регіонів України відносна вологість у період осінньо-зимової експлуатації сягає 80–95 %, що сприяє утворенню на поверхні металів тонкої плівки електроліту. За наявності в повітрі солей, пилу, вуглекислого газу, сірчаних і нітратних сполук ця плівка набуває агресивних властивостей і прискорює руйнування металу [5].

Температурні коливання, характерні для українського клімату (від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$), спричиняють конденсацію вологи у закритих порожнинах кузова, що активізує щільну корозію. Особливо небезпечні умови створюються взимку, коли для обробки доріг використовують хлориди натрію та кальцію. Розчини цих солей потрапляють на нижню частину кузова, підвіску, гальмівні механізми, утворюючи електроліт середньої провідності, який сприяє розвитку електрохімічної корозії на стиках різномірних металів.

У процесі руху тролейбус зазнає вібраційних навантажень, ударів від

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

нерівностей дорожнього полотна, динамічних зусиль при гальмуванні та рушанні. Такі впливи спричиняють мікротріщини в лакофарбовому покритті, які стають каналами для проникнення вологи та солей. Унаслідок цього розвивається підплівкова корозія, особливо в місцях зварних швів і болтових з'єднань.

Крім того, механічне стирання фарби або полімерних шарів від піску, гравію, реагентів і щіток мийних установок призводить до локального оголення металу. Це створює анодні ділянки, де інтенсивність руйнування збільшується в кілька разів порівняно з непошкодженими зонами [6].

Міське повітря містить велику кількість оксидів сірки, азоту, вуглецю, а також частинки сажі, пилу, мастил і вихлопних газів. Взаємодіючи з вологою, ці компоненти утворюють слабкі кислоти (сірчану, азотну, вугільну), які осідають на металевих поверхнях і провокують атмосферну корозію. Найбільш уразливими є елементи нижньої частини кузова, рама, кронштейни кріплення, арки коліс і пороги.

У районах із підвищеним рівнем промислових викидів (наприклад, Запоріжжя, Дніпро, Кривий Ріг) концентрація агресивних сполук у повітрі перевищує допустимі норми у 2–3 рази, що знижує довговічність кузова на 25–30 % порівняно з умовами експлуатації в більш екологічних містах.

Окрему групу чинників становлять електричні та електрохімічні процеси, що супроводжують роботу тролейбуса. Оскільки він є транспортним засобом з електричним приводом постійного струму, через корпус і металеві елементи можуть проходити блукаючі струми. Їхній витік на заземлені ділянки дорожнього полотна спричиняє електрокорозію — локальне розчинення металу в місцях виходу струму. Найчастіше такі пошкодження виявляють у зонах кріплення кабелів, опорах електрообладнання, підрамниках і системі підвіски [7].

Для зменшення цього явища у конструкції передбачають ізоляційні вставки, захисні діелектричні покриття, а також періодичний контроль опору

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ізоляції між елементами кузова та електрообладнанням.

Корозійна активність середовища змінюється залежно від сезону. У зимовий період інтенсивність корозії зростає внаслідок застосування протиожеледних реагентів, а також циклічного заморожування та відтавання вологи в мікротріщинах. Весною та восени відбувається накопичення пилу та бруду, який утримує вологу на поверхні металів. Літній період характеризується вищими температурами, які активізують процеси окиснення та прискорюють реакції корозії, особливо за підвищеної вологості.

Отже, умови експлуатації тролейбусів у міському середовищі є складними й агресивними. На розвиток корозійних процесів впливають вологість, температура, солі, промислові викиди, механічні навантаження та блукаючі струми. Для забезпечення довговічності конструкційних матеріалів необхідно враховувати реальні експлуатаційні умови вже на етапі проектування, передбачаючи антикорозійні покриття, ізоляційні вставки, дренажні отвори та системи очищення нижньої частини кузова.

1.3. Види корозійних руйнувань металів (електрохімічна, атмосферна, контактна, щілинна тощо)

Корозія металів є складним фізико-хімічним процесом, що полягає у самочинному руйнуванні металу під дією навколишнього середовища. Для тролейбусів, які експлуатуються в міських умовах, характерне поєднання кількох типів корозії — електрохімічної, атмосферної, контактної, щілинної, підплівкової та ерозійної. Розуміння механізмів цих процесів має вирішальне значення для вибору ефективних засобів антикорозійного захисту [8].

Електрохімічна корозія виникає в присутності електроліту (вологи, розчинів солей, кислот, лугів) і пов'язана з утворенням гальванічних мікроелементів на поверхні металу. У процесі реакції відбувається окиснення металу на аноді і відновлення кисню або водню на катоді, що призводить до

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поступового розчинення металу.

Для тролейбусів електрохімічна корозія особливо небезпечна в зонах, де сталеві елементи контактують з алюмінієвими або мідними деталями — наприклад, у місцях кріплення електрообладнання, клем, перехідників. При потраплянні вологи між цими металами виникає різниця електродних потенціалів, що запускає гальванічну пару і прискорює руйнування анодного металу (зазвичай сталі або алюмінію) [9].

Крім того, електрохімічна корозія може бути викликана блукаючими струмами, що виникають унаслідок витоку електричного струму з системи живлення тролейбуса. Ці струми проходять через корпус і металеві елементи, змінюючи полярність і викликаючи місцеве розчинення металу.

Такі процеси спостерігаються переважно у нижній частині кузова, поблизу ел



Рисунок 1.2- Фото колісних арок тролейбуса

Атмосферна корозія — це найбільш поширений тип руйнування для металевих частин тролейбусів. Вона виникає під дією вологи, кисню повітря та забруднювачів (SO_2 , CO_2 , NO_x , хлориди).

Процес проходить у дві стадії:

1. Адсорбція вологи на поверхні металу, утворення плівки електроліту.
2. Окисно-відновні реакції між металом і компонентами повітря, що призводять до утворення іржі ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

Інтенсивність атмосферної корозії залежить від категорії агресивності

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

атмосфери (за ДСТУ ISO 9223:2018). У міських умовах більшість тролейбусів працюють у середовищі класу С3–С4, де швидкість втрати маси сталі може сягати 50–80 г/м²·рік. Особливо активна корозія розвивається у зонах затримки вологи — під ущільнювачами, в порожнинах кузова, на внутрішніх поверхнях порогів і ребер жорсткості [10].

Контактна, або гальванічна, корозія спостерігається при спільному контакті різнорідних металів у присутності електроліту. При цьому утворюється гальванічна пара, у якій один метал (з меншим електродним потенціалом) виступає анодом і розчиняється швидше, тоді як другий метал стає катодом і залишається відносно неушкодженим.

Типовими прикладами в конструкції тролейбуса є:

- контакт сталі з алюмінієм (кріплення каркаса до облицювання);
- контакт міді з алюмінієм (електричні клеми, з'єднання проводів);
- контакт сталі з латунню або бронзою (підшипникові вузли, втулки).

Щоб запобігти цьому типу корозії, застосовують електроізоляційні прокладки, анодне покриття катодного металу, або пасивацію контактних зон спеціальними лаками й мастиками.

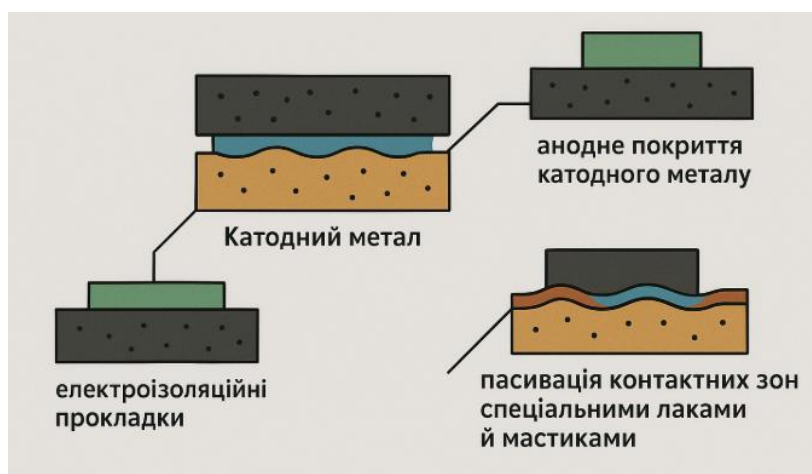


Рисунок 1.3 – Методи ізоляції та захисту металів від гальванічної корозії: електроізоляційні прокладки, анодне покриття та пасивація контактних зон.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Щілинна корозія — це локальне руйнування металу в обмежених просторах, де обмежений доступ кисню, але можливе накопичення вологи або електроліту.

Такі щілини можуть утворюватися:

- між з'єднаними листами металу (заклепки, зварні шви);
- у місцях кріплення панелей до рами;
- під ущільнювачами вікон, прокладками, декоративними елементами.

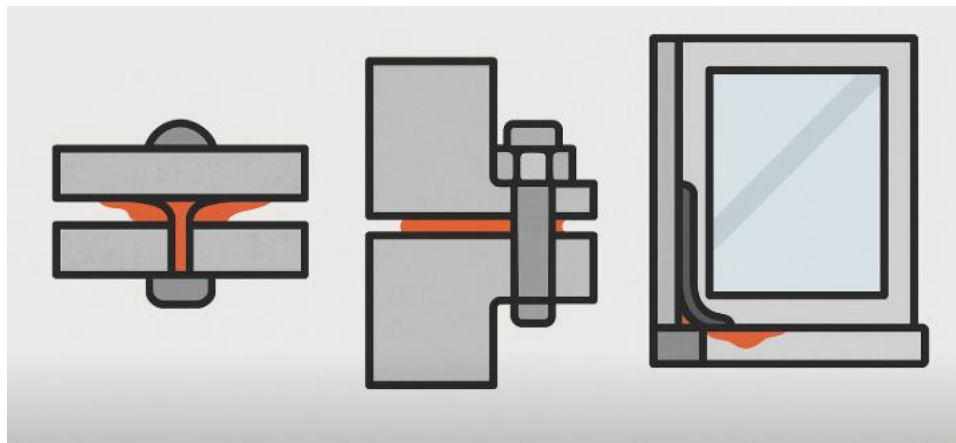


Рисунок 1.3 – Приклади утворення щілинної корозії між з'єднаними листами, у вузлах кріплення та під ущільнювачами.

Механізм процесу полягає у зміні хімічного складу електроліту всередині щілини: концентрація іонів металу зростає, рН знижується, утворюється агресивне середовище. Як наслідок, у щілині формується анодна зона, де швидкість розчинення металу різко зростає [11].

Щілинна корозія небезпечна тим, що практично непомітна зовні і часто виявляється лише після значного ослаблення конструкції.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

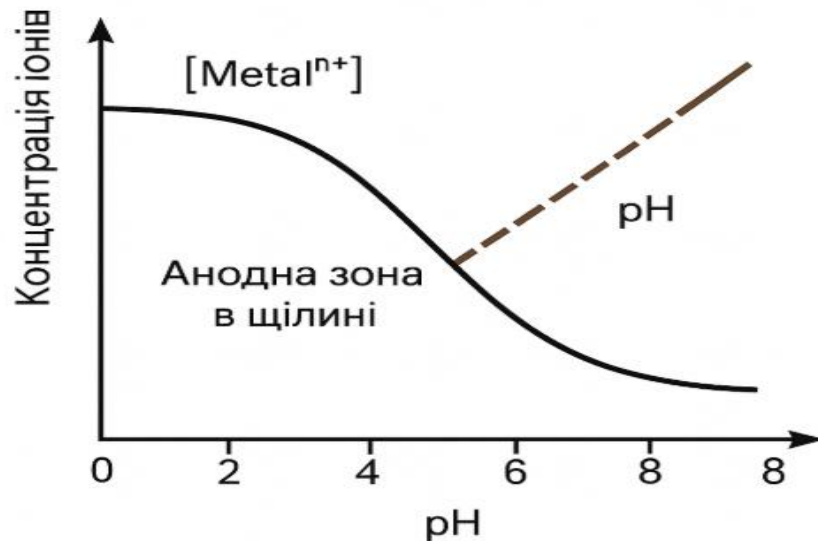


Рисунок 1.4 – Зміни концентрації та рН в щілині

Підплівкова корозія розвивається під захисними покриттями (фарбовими, лакофарбовими, полімерними), якщо вони мають мікрodefekти або пори. Волога, що проникає під покриття, не випаровується і спричиняє руйнування металу під шаром фарби. У результаті утворюються здуття, відшарування та іржа. Цей тип корозії характерний для зовнішніх поверхонь кузова тролейбуса, які зазнають постійних коливань температури та механічного впливу.

Ерозійна корозія поєднує механічне стирання і хімічне руйнування поверхні. Вона виникає у місцях інтенсивного потоку повітря, піску, води або реагентів — наприклад, у зоні колісних арок, передньої панелі, під днищем. Постійне механічне зняття пасивного шару окислів відкриває нову поверхню металу, що прискорює процес окиснення.

Місцева (пітингова) корозія проявляється у вигляді окремих заглиблень (пітингів) на поверхні металу. Вона характерна для алюмінієвих сплавів і нержавіючих сталей, коли порушується цілісність пасивного шару.

Міжкристалітна корозія, своєю чергою, виникає вздовж меж зерен кристалічної структури, особливо після термічної обробки або зварювання. У

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

таких зонах утворюється анодна область, де руйнування відбувається швидше, ніж у середині зерен.

Для тролейбусів цей вид корозії небезпечний у зонах зварних швів кузова, де спостерігаються локальні зміни структури металу внаслідок нагріву.

Корозійні процеси у матеріалах тролейбусів мають різну природу, але часто взаємопов'язані. Найпоширенішими є електрохімічна, атмосферна, контактна, щілинна та підплівкова корозія, що діють одночасно під впливом вологи, солей, реагентів і блукаючих струмів. Розуміння механізму кожного виду корозії є основою для правильного вибору конструкційних матеріалів, технологій захисту та умов технічного обслуговування тролейбусів.

1.4. Аналіз типових зон корозійних пошкоджень кузова і рами тролейбуса

У процесі тривалої експлуатації тролейбусів основні конструкційні елементи зазнають різних типів корозійного руйнування залежно від розташування, умов навантаження та контакту з агресивним середовищем.

Досвід ремонтних підприємств і транспортних депо свідчить, що понад 70 % усіх корозійних пошкоджень припадає на кузов і несучу раму, що зумовлено їх безпосередньою взаємодією з атмосферними опадами, реагентами та дорожнім пилом [12].



					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Рисунок 1.5 – Корозійні пошкодження металевих елементів рами тролейбуса.

Корозія металевих елементів кузова має локальний характер і переважно розвивається у місцях накопичення вологи та бруду або в зонах порушення захисних покриттів. Згідно з результатами технічних обстежень ХКП «Електротранс», основні ураження спостерігаються у нижній частині кузова, на стиках панелей, у колісних арках, під порогами та в зоні кріплення підвіски.

Інтенсивність корозії залежить від:

- ступеня захисту покриттям;
- рівня вентиляції внутрішніх порожнин;
- частоти миття та обслуговування;
- тривалості впливу реагентів і вологи.

Відомо, що корозійні процеси у нижніх частинах кузова відбуваються у 3–5 разів швидше, ніж у верхніх, через постійне зволоження й абразивний вплив дорожніх домішок [13].

Найбільш уразливою частиною є зони порогів, підлоги й нижніх панелей кузова, де під час руху накопичується волога, бруд і дорожні солі.

У цих ділянках часто розвивається атмосферна та підплівкова корозія, яка призводить до відшарування лакофарбового покриття. Унаслідок тривалого впливу реагентів утворюються наскрізні отвори та втрачається жорсткість каркаса підлоги.

Особливу небезпеку становлять зони стику підлоги з бічними панелями. У них часто залишаються технологічні щілини або мікропори після зварювання, що сприяє щілинній корозії. Накопичена волога в порожнинах довго не висихає, і корозійні процеси тривають навіть за відсутності зовнішнього зволоження.

Колісні арки постійно піддаються дії води, піску, реагентів, камінців, які зривають фарбове покриття й відкривають метал для окиснення.

Типові пошкодження — ерозійна й підплівкова корозія. Крім того, у цій зоні

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

часто спостерігається гальванічна корозія через контакт сталевих кронштейнів підвіски з алюмінієвими елементами кузова.

Для зниження інтенсивності руйнування сучасні виробники застосовують антишумні та антикорозійні мастики на основі каучуків і епоксидних смол, а також пластикові підкрилки, які зменшують вплив механічного стирання. Проте в місцях кріплення підкрилків часто утворюються щілини, де накопичується волога, що знову активізує корозійні процеси [14].

Каркас кузова тролейбуса виготовляється переважно із сталевих труб прямокутного профілю. У процесі зварювання відбувається місцеве перегрівання металу, що призводить до утворення термічно ослаблених зон. Такі ділянки стають потенційними осередками міжкристалітної та щілинної корозії. Особливо небезпечні місця — стики поперечних і поздовжніх елементів, зони навколо дверних прорізів, кріплення дахових конструкцій.

Внутрішні порожнини профільних труб часто не мають антикорозійного покриття, тому у них накопичується конденсат. Відсутність вентиляції сприяє утворенню вогнищ вологого середовища, де корозія відбувається інтенсивно й непомітно ззовні. На практиці це призводить до зниження міцності кузова та появи мікротріщин у зварних з'єднаннях.

Рама тролейбуса є основною несучою конструкцією, що сприймає навантаження від кузова, підвіски та електродвигуна. Найчастіше уражаються передні й задні лонжерони, поперечини, місця кріплення ресор і балок. Через постійний контакт із вологою і дорожніми реагентами розвивається електрохімічна та ерозійна корозія.

Особливо активне руйнування спостерігається в місцях зварних швів між рамою і кузовом, де відбувається локальне накопичення вологи. За відсутності регулярного очищення ці зони стають джерелом вторинної корозії, що поширюється вздовж металу.

Зони навколо дверей і вікон є типовими осередками щілинної та

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

контактної корозії. Між металевими рамками і гумовими ущільнювачами накопичується конденсат, який не висихає через недостатню вентиляцію.

Крім того, при поєднанні алюмінієвих рам із сталевим кузовом відбувається гальванічна взаємодія, що призводить до появи білих окислів на алюмінії та іржі на сталі. Такі пошкодження не лише знижують естетичність, а й можуть стати причиною розгерметизації салону.

Дах тролейбуса піддається впливу атмосферних опадів, ультрафіолету й коливань температури. У місцях кріплення токоприймачів, ізоляторів і вентиляційних люків часто з'являються мікротріщини лакофарбового покриття, через які проникає волога. Як наслідок — місцева атмосферна корозія металу, що може порушити герметичність даху й призвести до протікань у салон.

Окрему увагу приділяють електричним з'єднанням, де через високий рівень вологості розвивається окиснення контактів. Це збільшує електричний опір і може стати причиною нагрівання та коротких замикань [15].

Аналіз показує, що найбільш корозійно небезпечними зонами тролейбуса є нижня частина кузова, пороги, колісні арки, зони зварних швів, порожнини каркаса та елементи рами. Розвиток корозійних процесів у цих ділянках обумовлений поєднанням механічних пошкоджень покриття, постійного зволоження, наявності солей і відсутності вентиляції.

Для зменшення швидкості корозії необхідно передбачити комплексні заходи — застосування герметиків, дренажних каналів, полімерних мастик, антикорозійних фарб і регулярне технічне обслуговування із перевіркою стану покриттів.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		



Рисунок 1.6 – Антикоровійне герметизувальне покриття днища, що запобігає підплівковій корозії та механічному стиранню

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ОСНОВИ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ

2.1 Механізм виникнення та розвитку корозії металів

Корозія металів є складним фізико-хімічним процесом, який призводить до самочинного руйнування металевих матеріалів під дією зовнішнього середовища. У транспортному машинобудуванні, зокрема у тролейбусобудуванні, вона має вирішальний вплив на довговічність, безпеку та економічність експлуатації конструкцій. Розуміння механізму корозії дозволяє не лише прогнозувати її розвиток, а й розробляти ефективні методи захисту металів [16].

Корозійний процес відбувається внаслідок взаємодії металу з навколишнім середовищем, яке може бути газоподібним, рідинним або твердим. Під час контакту металу з киснем, вологою або розчинами солей на його поверхні утворюється електролітна плівка, що запускає окисно-відновні реакції.

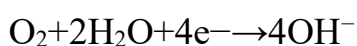
Метал, який має високу хімічну активність, прагне перейти у стан із меншою енергією, утворюючи йони металу (окиснення) і віддаючи електрони. Ці електрони приймаються іншими частинами поверхні (катодами), де відбувається відновлення окислювача — зазвичай кисню або водню.

Таким чином, корозійний процес є замкненим електрохімічним циклом, який складається з двох напівреакцій:

- Анодна реакція (окиснення):



- Катодна реакція (відновлення):



У результаті утворюються гідроксиди заліза $\text{Fe}(\text{OH})_2$, які згодом окиснюються до оксидів $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ — тобто іржі. Вона має пористу

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структуру і не перешкоджає подальшому надходженню кисню та вологи, що призводить до самоприскорення процесу [17].

Процес корозії умовно можна поділити на три основні етапи:

1. Ініціація — виникнення активних центрів корозії на поверхні металу (дефекти, подряпини, неоднорідності структури, залишкові напруження).

На цьому етапі формується електролітна плівка, а мікроелементи з різними потенціалами утворюють локальні гальванічні пари.

2. Активний розвиток — поширення корозійного процесу вглиб металу. Відбувається руйнування пасивного шару, посилення анодних і катодних реакцій, накопичення продуктів корозії. У мікротріщинах і щілинах створюється агресивне середовище з пониженим рН, що прискорює розчинення металу.

3. Стадія стабілізації або пасивації — у деяких умовах на поверхні металу утворюється щільна оксидна плівка, яка уповільнює подальше руйнування. Так поведуться, наприклад, алюміній, хром, нікель. Проте у присутності хлоридів або механічних пошкоджень плівка може руйнуватися, і процес корозії поновлюється.

У реальних конструкціях тролейбуса метал має структурну та хімічну неоднорідність, тому корозійні осередки виникають природно. Основні типи мікроелементів:

- Гальванічні елементи різнорідних металів — утворюються на контакті сталі з алюмінієм, міддю чи латунню.
- Концентраційні елементи — формуються у місцях різної концентрації кисню або солей (наприклад, під краплями води).
- Термічні елементи — виникають через різницю температур на поверхні металу.
- Механічні елементи — спричинені напруженнями після зварювання, штампування чи деформації.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Усі ці елементи створюють потенційну різницю, що є рушійною силою електрохімічної корозії. Зона з нижчим потенціалом (анод) розчиняється, тоді як зона з вищим (катод) залишається неушкодженою [18].

На швидкість розвитку корозії впливають такі параметри:

- Температура — зі збільшенням температури на 10 °С швидкість корозії зростає приблизно в 1,5–2 рази.
- Вологість повітря — при відносній вологості понад 70 % на поверхні металу утворюється стабільна електролітна плівка.
- Склад електроліту — наявність хлоридів, сульфатів, амонію чи кислот значно підвищує електропровідність середовища.
- Швидкість повітряного потоку — впливає на насичення киснем і видалення продуктів корозії.
- Механічні пошкодження покриття — відкривають метал для прямого контакту з атмосферою.

У тролейбусах найагресивніші умови виникають у зимовий період, коли реагенти з хлоридами натрію і кальцію активізують електрохімічні реакції, а цикли заморожування/відтавання сприяють утворенню мікротріщин.

Деякі метали (Al, Cr, Ni, Ti) мають здатність до пасивації — самочинного утворення щільного оксидного шару товщиною 1–10 нм, який перешкоджає подальшому окисненню. У тролейбусобудуванні ця властивість використовується при виборі алюмінієвих сплавів для облицювання та декоративних елементів.

Проте пасивний шар може руйнуватися у присутності хлоридів, що пояснює появу білих плям корозії на алюмінієвих деталях після зимової експлуатації. Для його відновлення застосовують анодування або хімічну пасивацію спеціальними інгібіторами [19].

Механізм виникнення корозії металів полягає в окисно-відновних реакціях, що відбуваються на межі «метал — навколишнє середовище» в присутності електроліту.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Корозійний процес починається з утворення мікроелементів, де анодні зони поступово розчиняються, а катодні залишаються стабільними.

Розвиток корозії залежить від структури металу, складу атмосфери, температури, вологості, солей, а також стану захисного покриття.

Розуміння цих закономірностей є основою для подальшого дослідження методів захисту металів, що розглядатимуться у наступному підпункті.

2.2. Методи захисту: пасивація, легування, електрохімічний, лакофарбовий, гальванічний

Ефективна протидія корозійним процесам у конструкційних матеріалах тролейбуса базується на застосуванні комплексу захисних методів, спрямованих на уповільнення або повне припинення взаємодії металу з агресивним середовищем.

До основних напрямів антикорозійного захисту належать пасивація, легування, електрохімічний, лакофарбовий та гальванічний методи, які реалізуються окремо або в комбінації залежно від умов експлуатації транспортного засобу [20].

Пасивація — це метод захисту, заснований на утворенні на поверхні металу тонкої щільної плівки оксидів, яка перешкоджає подальшому окисненню.

Такий шар має хімічну стійкість, електроізоляційні властивості й суттєво знижує швидкість корозійних реакцій.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.1-Хімічна обробка металу з утворенням пасивного шару.

Природна пасивація властива металам, які мають високу спорідненість до кисню: алюмінію, хрому, титану, нікелю, цинку. У тролейбусобудуванні цей ефект використовують при застосуванні алюмінієвих сплавів для облицювання кузова — на їхній поверхні самочинно утворюється Al_2O_3 -плівка, що запобігає подальшому руйнуванню.

Штучна пасивація здійснюється хімічним або електрохімічним шляхом:

- Хімічна пасивація — оброблення металу розчинами хроматів, фосфатів, нітратів, що створюють захисну плівку товщиною 0,1–1,0 мкм.
- Електрохімічна пасивація — проведення процесу в електроліті з катодною або анодною поляризацією.

Наприклад, фосфатування сталевих елементів кузова перед фарбуванням покращує адгезію покриття й одночасно створює бар'єр проти електролітів [21].

Легування полягає у введенні до складу сталі спеціальних елементів (Cr, Ni, Mo, Si, Cu, Al), які змінюють структуру та властивості металу, підвищуючи його хімічну стійкість. Завдяки легуванню створюються пасивні шари оксидів, що зменшують швидкість корозії в десятки разів.

Наприклад:

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

- додавання хрому (10–18 %) забезпечує утворення щільного шару Cr_2O_3 і перетворює сталь на нержавіючу;
- нікель підвищує стійкість до кислот і лугів, зменшує крихкість при низьких температурах;
- молібден зміцнює структуру сталі та зменшує схильність до міжкристалітної корозії;
- мідь і алюміній підвищують атмосферостійкість.

У тролейбусобудуванні поширене застосування низьколегованих сталей 09Г2С, 10ХСНД, які мають підвищену міцність, добру зварюваність і стійкість до атмосферної корозії. У сучасних моделях також використовують нержавіючі сталі AISI 304, 430, особливо для зовнішніх панелей, поручнів і декоративних деталей [22].

Електрохімічний метод базується на зміні потенціалу металу відносно середовища з метою переведення його у пасивний стан. Розрізняють два основні види такого захисту:

- Катодний захист — полягає в подачі на металеву конструкцію зовнішнього струму від джерела живлення, або приєднанні жертвовного анода (з магнію, цинку чи алюмінію). Метал виробу стає катодом і не розчиняється, тоді як анод поступово руйнується, беручи на себе корозію.

У транспорті цей принцип використовують для захисту паливних баків, днищ кузовів, рам.

- Анодний захист — застосовується для металів, здатних пасивуватися (Cr, Ni, Ti). Шляхом підключення позитивного потенціалу утворюється оксидна плівка, яка ізолює метал від середовища.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Товщина загального шару для тролейбусів становить 120–180 мкм, а термін служби при правильному догляді — 5–7 років.

Для нижньої частини кузова застосовують антишумні мастики з каучуків, які одночасно виконують роль гідроізоляції. Сучасні технології передбачають використання водорозчинних фарб, що відповідають екологічним вимогам і знижують токсичність виробництва [23].

Гальванічні методи передбачають нанесення тонкого металевого шару на поверхню іншого металу шляхом електролізу.

Такі покриття мають високу адгезію, рівномірну товщину й можуть надавати як захисні, так і декоративні властивості.

Основні типи гальванічних покриттів, застосовуваних у тролейбусобудуванні:

- Цинкування — захист сталевих деталей шляхом нанесення шару цинку товщиною 10–25 мкм. Цинк виконує роль жертвовного анода, тому навіть при пошкодженні покриття сталь не кородує.

- Нікелювання — створює гладку блискучу поверхню, підвищує стійкість до атмосферної корозії; часто використовується для декоративних елементів салону.

- Хромування — забезпечує твердість, блиск і зносостійкість. Застосовується для поручнів, ручок, важелів керування.

- Кадмування і міднення — використовуються для електроконтактних деталей з підвищеними вимогами до провідності.

Гальванічні покриття є ефективними, але потребують ретельної підготовки поверхні (знежирення, травлення, активування) і контролю товщини шару, оскільки надмірне осадження може призвести до втрати еластичності або мікротріщин.

Сучасні методи антикорозійного захисту ґрунтуються на поєднанні фізичних, хімічних та електрохімічних принципів. Пасивація і легування підвищують внутрішню стійкість металу, тоді як лакофарбові, гальванічні та

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

електрохімічні методи створюють зовнішній бар'єр між металом і середовищем. Комплексне використання кількох методів дає змогу збільшити термін служби кузова тролейбуса в 2–3 рази, зменшити витрати на ремонт і підвищити безпеку експлуатації. Подальший вибір конкретної технології залежить від умов роботи, типу матеріалу, конструктивних особливостей і вимог до екологічності процесу.

2.3. Властивості і структура покривних матеріалів

Антикорозійні покривні матеріали є одним із найважливіших елементів системи захисту металів у тролейбусобудуванні. Їх основне призначення полягає у створенні надійного бар'єру між металевою поверхнею та агресивним середовищем, що запобігає доступу вологи, кисню, солей і хімічних речовин до конструкцій. Крім того, покриття виконують декоративну функцію, надаючи кузову привабливого зовнішнього вигляду, а також експлуатаційну — захищають поверхню від стирання, ультрафіолетового випромінювання, перепадів температур і механічних пошкоджень.

Вимоги до покривних матеріалів для транспортних засобів значно вищі, ніж для стаціонарних об'єктів. Поверхня тролейбуса піддається постійній дії вологи, пилу, дорожніх реагентів і абразивних частинок, а влітку — інтенсивному нагріванню сонячними променями. Тому покриття має бути еластичним, щоб не тріскатися при вібраціях кузова, міцним, щоб витримувати механічні удари, і хімічно стійким до соляних розчинів та миючих засобів.

Структура покривної системи зазвичай складається з кількох послідовних шарів, які утворюють багатофункціональну захисну оболонку. Першим наноситься ґрунтовий шар, що забезпечує адгезію до металу й містить інгібітори корозії — фосфати цинку, хромати або молібдати. Ці речовини пасивують метал, утворюючи на його поверхні нерозчинну плівку,

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

яка запобігає утворенню мікроелементів корозії. Далі наноситься проміжний шар, який вирівнює поверхню, зменшує пористість і створює додатковий бар'єр проти проникнення електролітів. Останній, фінішний шар, виконує декоративну функцію і визначає стійкість до атмосферних впливів. Його виготовляють на основі поліуретанових, епоксидних або акрилових смол, які мають високий блиск, твердість та еластичність [24].

Залежно від сполучної речовини, покривні матеріали поділяються на епоксидні, поліуретанові, акрилові, алкідні та порошкові. Епоксидні покриття вирізняються чудовою адгезією та хімічною стійкістю, тому використовуються як ґрунти для сталевих елементів кузова. Вони утворюють щільну непроникну плівку, проте чутливі до ультрафіолетового випромінювання і тому не застосовуються як фінішне покриття. Поліуретанові системи є більш універсальними — вони мають високу еластичність, витримують значні перепади температур, зберігають блиск і колір протягом тривалого періоду експлуатації. Саме поліуретанові емалі найчастіше використовуються для зовнішнього фарбування тролейбусів. Акрилові й алкідні емалі забезпечують хороший декоративний ефект, прості у нанесенні, але поступаються епоксидним і поліуретановим системам за довговічністю.

Окрему групу складають полімерні мастики — товстошарові покриття на основі каучуків або бітумів, якими обробляють нижню частину кузова, колісні арки та пороги. Вони утворюють еластичну плівку, що амортизує удари піску, камінців і запобігає потраплянню вологи. Для дрібних металевих деталей, зокрема поручнів, рам і кронштейнів, часто застосовують порошкові фарби, які наносяться електростатичним способом і полімеризуються при температурі 180–200 °С. Такі покриття мають рівномірну товщину, високу твердість і чудову адгезію [25].

Найважливішими параметрами, що характеризують якість покривних систем, є адгезія, товщина, твердість, еластичність, стійкість до соляного

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

туману, ультрафіолету та температурних впливів. Оптимальні значення цих показників наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні експлуатаційні характеристики покривних матеріалів для тролейбусів

Показник	Оптимальне значення	Методи контролю
Адгезія до металу	Не менше 1,5 МПа	ГОСТ 15140, метод решітчастого надрізу
Товщина покриття	150–250 мкм	Магнітний товщиномір або мікроскопічний контроль
Твердість за олівцем	Не нижче 2Н	ГОСТ 5233
Еластичність при згині	Без тріщин при радіусі 5 мм	ГОСТ 6806
Стійкість до соляного туману	Не менше 500 годин без слідів корозії	ISO 9227
УФ-стійкість	Втрата блиску $\leq 10\%$ після 1000 годин випробувань	ISO 16474-2
Температурний діапазон експлуатації	від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$	Випробування в термокамері

Дотримання зазначених параметрів гарантує високу довговічність кузова тролейбуса навіть у складних умовах експлуатації. У разі порушення технології нанесення або зменшення товщини шару нижче допустимої норми різко зростає ризик розвитку підплівкової корозії, яка візуально проявляється через 6–12 місяців після фарбування.

З мікроструктурного погляду, покриття є композиційним матеріалом, що складається з полімерної матриці (зв'язуючої речовини), пігментів, наповнювачів і модифікуючих добавок. Полімерна матриця формує безперервну фазу, яка надає покриттю механічну міцність і еластичність. Пігменти виконують роль бар'єрних частинок, відбиваючи ультрафіолет і знижуючи проникність для водяної пари. Наповнювачі (тальк, крейда,

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

силікати) забезпечують густину й матовість, а модифікатори регулюють в'язкість, колір і час висихання.

У процесі полімеризації відбувається формування тривимірної просторової сітки зв'язків між молекулами смоли, що визначає експлуатаційні властивості покриття. Щільна структура з мінімальною кількістю мікропор перешкоджає проникненню агресивних агентів. Натомість при порушенні технології (недостатнє перемішування, забруднена поверхня, нерівномірна сушка) утворюються мікротріщини й повітряні включення, які стають осередками майбутнього корозійного руйнування [26].

Механізм захисної дії покриттів базується не лише на фізичному ізолюванні металу, але й на хімічній пасивації. Деякі інгібітори (цинк-фосфат, хромат барію) мають здатність до повільного розчинення і дифузії до металевої поверхні, де вони утворюють нерозчинні сполуки з іонами заліза, створюючи додатковий захисний шар. Таким чином, навіть при незначних подряпинах або дефектах лакофарбова система може частково самопоновлюватися.

Особливої уваги заслуговують покриття нижньої частини кузова, де відбувається найінтенсивніше корозійне навантаження. У цих зонах доцільно застосовувати комбіновані системи, що включають ґрунтовку з інгібіторами, полімерну мастику з каучуком і зовнішній шар поліуретанової фарби. Така комбінація забезпечує не лише корозійну, а й шумопоглинальну та віброізоляційну функції, що підвищує комфорт і довговічність тролейбуса.

Отже, властивості та структура покривних матеріалів мають ключове значення для забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності тролейбусів. Найвищі показники забезпечують багат шарові полімерні системи, у яких поєднано бар'єрний, катодний і декоративний механізми дії. Використання сучасних епоксидно-поліуретанових композицій у поєднанні з фосфатними або хроматними ґрунтами дозволяє збільшити термін служби кузова у 2–3 рази та знизити витрати на ремонт і технічне обслуговування [27].

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Таким чином, удосконалення структури та складу покривних матеріалів є одним із головних напрямів розвитку технологій антикорозійного захисту в сучасному тролейбусобудуванні.

2.4. Вплив складу та товщини покриття на корозійну стійкість

Корозійна стійкість металевих конструкцій тролейбуса визначається не лише вибором базового матеріалу, а передусім якістю, складом і товщиною захисного покриття. Навіть найміцніша сталь або алюмінієвий сплав, не захищений належним чином, під дією атмосферних опадів і дорожніх реагентів швидко втрачає свої властивості. Тому розроблення оптимальної структури покривної системи, вибір її компонентів і контроль товщини шару є ключовими чинниками забезпечення довговічності кузова тролейбуса.

Склад покриття визначає його хімічну стійкість, еластичність, газопроникність і адгезію до металу. Основними компонентами лакофарбових і гальванічних систем є зв'язуюча речовина, пігменти, наповнювачі, розчинники та модифікатори. Взаємодія між цими складовими формує мікроструктуру покриття, яка визначає його здатність чинити опір проникненню вологи та кисню. У більшості сучасних систем використовуються полімерні сполучні — епоксидні, поліуретанові, акрилові або поліестерові смоли. Вони утворюють тривимірну полімерну сітку з високою щільністю зв'язків, що знижує проникність для газів та електролітів [28].

Важливим компонентом покриття є антикорозійні пігменти, які виконують активну роль у процесі пасивації металу. Найефективнішими вважаються цинкові, фосфатні, хроматні та молібдатні сполуки, що утворюють на поверхні металу захисні комплекси. Наприклад, цинкові пігменти діють за принципом катодного захисту: цинк має нижчий електродний потенціал, тому у разі пошкодження плівки він окиснюється першим, запобігаючи корозії сталі.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фосфати й хромати, своєю чергою, сприяють формуванню пасивних оксидних плівок, що обмежують доступ електроліту до металу. Додавання невеликої кількості полімерних або наноструктурних добавок (силікатів, графену, оксидів титану) покращує щільність плівки й підвищує її бар'єрні властивості.

Особливу роль у довговічності системи відіграє товщина покриття, оскільки вона визначає час, необхідний для проникнення агресивних речовин до металевої основи. Згідно з дослідженнями, швидкість корозії зменшується пропорційно квадрату товщини шару. Однак надмірно товсте покриття може стати крихким, втратити еластичність і потріскатися при вібраційних навантаженнях кузова. Тому важливо знайти оптимальний баланс між товщиною і механічною гнучкістю [29].

У тролейбусобудуванні найкращі результати показують багат шарові системи з загальною товщиною 150–250 мкм, де ґрунт має 25–40 мкм, проміжний шар — 80–100 мкм, а фінішна емаль — 50–80 мкм. Для нижньої частини кузова, що зазнає сильного впливу реагентів, товщину збільшують до 300–400 мкм шляхом нанесення додаткового шару полімерної мастики або каучукового матеріалу.

У таблиці 2.2 наведено орієнтовну залежність корозійної стійкості сталевих зразків від товщини покриття під час випробувань у соляному тумані.

Таблиця 2.2 – Вплив товщини покриття на корозійну стійкість сталі (умови: соляний туман NaCl, 5 %, 35 °C)

Товщина покриття, мкм	Час до появи перших ознак корозії, год	Ступінь ураження поверхні після 1000 год, %
50	48–72	80–90
100	200–250	40–60
150	400–500	20–25
200	600–700	10–15

Товщина покриття, мкм	Час до появи перших ознак корозії, год	Ступінь ураження поверхні після 1000 год, %
250	800–1000	5–10
300	понад 1200	менше 5

Як видно з таблиці, збільшення товщини покриття з 100 до 250 мкм підвищує тривалість захисної дії більш ніж у три рази. Проте при товщині понад 300 мкм ефект стабілізується: шар стає надмірно жорстким і схильним до розтріскування при циклічних навантаженнях, тому подальше нарощування товщини не є доцільним.

Окрім товщини, важливе значення має однорідність і мікроструктура покриття. Якщо в шарі присутні мікропори, пухирці або включення повітря, вони стають каналами для проникнення електроліту. Навіть незначна пористість у 1–2 % знижує ефективність бар'єрного захисту на 30–40 %. Тому поверхню перед фарбуванням необхідно ретельно очищати від окалини, масел і пилу, а процес нанесення повинен забезпечувати рівномірне покриття без патьоків і дефектів [30].

Важливим є також хімічний склад сполучної речовини. Наприклад, епоксидні смоли мають високу полярність, тому створюють добре адгезовану плівку, але чутливі до ультрафіолету. Поліуретанові системи, навпаки, мають знижене водопоглинання та кращу гнучкість, що робить їх придатними для зовнішніх панелей кузова. Акрилові смоли забезпечують високу глянцевість і збереження кольору, але менш ефективно перешкоджають проникненню вологи. Оптимальний результат досягається при комбінації епоксидного ґрунту і поліуретанової емалі, що дозволяє об'єднати високу адгезію з атмосферостійкістю.

На мікрорівні корозійна стійкість визначається ступенем перехресного зшивання полімерних ланцюгів, щільністю пакування молекул і відсутністю міжфазних меж, через які могла б відбуватися дифузія вологи. Чим більше

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

зв'язків між макромолекулами, тим нижча проникність і вища хімічна інертність плівки. Цей принцип лежить в основі технологій нанокompозитних покриттів, які завдяки включенню наночастинок SiO_2 , Al_2O_3 або TiO_2 забезпечують додаткове зміцнення та зменшення пористості [31].

Окрім бар'єрного ефекту, важливу роль відіграє електрохімічна взаємодія компонентів покриття з металом. Для цинкових покриттів характерна захисна дія за принципом «жертвовного анода»: при порушенні цілісності шару саме цинк окиснюється, утворюючи на поверхні щільний шар $\text{ZnO}\cdot\text{H}_2\text{O}$, який блокує подальшу дифузію електроліту. Для фосфатних покриттів механізм дещо інший — вони діють як пасивуючі бар'єри, що стабілізують потенціал металу й перешкоджають утворенню анодних зон.

Суттєвий вплив на довговічність має і тип пігментів у складі фінішної емалі. Металеві пігменти (алюмінієва пудра, цинкові пластівці) відбивають ультрафіолетове випромінювання, зменшують нагрівання поверхні та підвищують відбивну здатність. Використання багат шарових пігментів нового покоління дозволяє знизити температуру поверхні кузова на $5\text{--}7\text{ }^\circ\text{C}$ у літній період, що, у свою чергу, зменшує ризик термічного розтріскування покриття [32].

Важливим показником ефективності захисної системи є швидкість втрати маси металу під час кліматичних випробувань. Дослідження показують, що при товщині покриття 200 мкм втрата маси сталі становить лише $0,2\text{--}0,3\text{ г/м}^2\cdot\text{рік}$, тоді як без покриття цей показник сягає $80\text{--}100\text{ г/м}^2\cdot\text{рік}$. Таким чином, правильно вибраний склад і товщина покриття можуть зменшити швидкість корозії у 300–400 разів.

Отже, вплив складу та товщини покриття на корозійну стійкість є комплексним. Хімічний склад визначає механізм захисної дії — бар'єрний, катодний або пасивуючий, тоді як товщина контролює тривалість ефективного захисту. Для кузова тролейбуса оптимальною є комбінація епоксидного або фосфатного ґрунту, проміжного шару на основі поліуретану і декоративної

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

емалі з металевими пігментами, із загальною товщиною 180–220 мкм. Така система забезпечує стійкість до впливу соляного туману понад 1000 годин, зберігаючи естетичні властивості протягом не менше семи років експлуатації [33].

Таким чином, можна зробити висновок, що збалансований склад покриття з активними пігментами, полімерною матрицею високої щільності та оптимальною товщиною шару є вирішальним чинником довговічності кузова тролейбуса. Дотримання технологічних параметрів нанесення й контроль товщини на всіх етапах виробництва забезпечують істотне продовження ресурсу конструкції та зниження витрат на ремонт і утримання міського електротранспорту.

2.5. Вибір матеріалів для антикорозійного покриття тролейбуса

Вибір матеріалів для антикорозійного покриття тролейбуса є одним із найвідповідальніших етапів проєктування і виробництва транспортного засобу. Правильне поєднання захисних компонентів дає змогу забезпечити тривалий термін служби кузова, знизити витрати на технічне обслуговування та підвищити надійність експлуатації у складних міських умовах.

Металеві елементи кузова тролейбуса, особливо з вуглецевої сталі, мають низьку природну корозійну стійкість, тому потребують багатошарової системи захисту. Найдоцільнішим підходом є застосування комплексного покриття, у якому поєднано ґрунтовий, проміжний і фінішний шари з різною функціональністю. Основними критеріями вибору матеріалів є їхня адгезія до металу, атмосферостійкість, еластичність, технологічність нанесення та екологічна безпечність.

У сучасному тролейбусобудуванні найбільш ефективними визнані системи на основі епоксидно-поліуретанових композицій. Епоксидні ґрунти забезпечують чудову адгезію до сталі та алюмінію, а також мають високу

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

хімічну інертність. У комбінації з поліуретановою фінішною емаллю утворюється еластичне і зносостійке покриття, стійке до ультрафіолету, перепадів температур і дії соляних реагентів. Така система зберігає захисні властивості протягом 7–10 років навіть при інтенсивній експлуатації в міському середовищі.

Важливою тенденцією останніх років є перехід до екологічно безпечних водорозчинних матеріалів, які не містять токсичних розчинників і мають нижчі викиди летких органічних сполук. Сучасні водорозчинні акрилові емалі з модифікованими смолами за експлуатаційними характеристиками практично не поступаються традиційним поліуретановим. Їх застосовують для внутрішнього оздоблення салону, елементів електрообладнання та дрібних металевих деталей.

Для нижньої частини кузова, колісних арок і днища використовуються каучукові мастики або полімер-бітумні склади. Вони створюють товстий еластичний шар, що поглинає вібрацію і перешкоджає ударному стиранню металу піском, гравієм та іншими частинками. Ці матеріали мають високий коефіцієнт розтягування і не тріскаються навіть при мінусових температурах. Їхня роль особливо важлива у зимовий період, коли під кузовом накопичуються солі та волога.

Для алюмінієвих деталей доцільно застосовувати анодування — процес створення оксидної плівки електрохімічним методом. Анодне покриття має мікропористу структуру, у яку можна вводити барвники або полімерні просочення, що підвищують декоративність і корозійну стійкість. У деяких випадках застосовуються гальванічні покриття: цинкування, нікелювання або хромування окремих деталей, зокрема кронштейнів, поручнів і електричних клем.

Вибір системи покриттів також залежить від кліматичної зони експлуатації. Для регіонів із підвищеною вологістю та наявністю солей (південні і приморські міста) рекомендуються багат шарові системи з

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

підвищеною товщиною — до 250–300 мкм, тоді як для континентальних умов достатньо стандартних 180–200 мкм. У гірських районах, де можливі значні коливання температур, доцільно застосовувати матеріали з високою еластичністю, зокрема поліуретанові емалі з еластомерними добавками.

Окрім хімічного складу, при виборі покриттів слід враховувати технологічні можливості виробництва. Деякі матеріали потребують високотемпературної полімеризації, що не завжди можливо на великогабаритних кузовах. У таких випадках застосовуються дво- або трикомпонентні матеріали холодного затвердіння, які тверднуть при кімнатній температурі. Це дозволяє здійснювати фарбування безпосередньо на виробничій лінії або під час ремонту.

Останніми роками дедалі більшого поширення набувають нанокompозитні системи з додаванням наночастинок оксиду титану, графену або силікату алюмінію. Вони формують щільнішу структуру, зменшують пористість і підвищують опірність до УФ-випромінювання. Такі покриття демонструють чудові експлуатаційні характеристики і поступово витісняють традиційні лакофарбові матеріали.

Підсумовуючи, можна зазначити, що оптимальний вибір матеріалів для антикорозійного покриття тролейбуса повинен базуватися на поєднанні ефективності, технологічності та екологічності. Для сучасних міських тролейбусів найкращим рішенням є комбінована система: епоксидний або фосфатний ґрунт, поліуретановий проміжний шар, фінішна акрилова або поліуретанова емаль і локальні полімерні мастики в нижній частині кузова. Така конструкція забезпечує максимальну довговічність кузова, знижує витрати на технічне обслуговування та відповідає вимогам сучасних екологічних стандартів.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ АНТИКОРОЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ

3.1. Методика відбору зразків металу та покриттів

Для проведення експериментальних досліджень корозійної стійкості покриттів необхідно забезпечити правильний відбір та підготовку зразків металу, які максимально точно відтворюють умови експлуатації елементів кузова тролейбуса. Методика відбору базується на вимогах стандартів ДСТУ ISO 9227:2021, ДСТУ ISO 8407:2018 та ДСТУ 9.302–88, що регламентують порядок підготовки зразків, нанесення покриттів і проведення корозійних випробувань.

Матеріалом для досліджень були обрані зразки зі сталі 09Г2С і СтЗсп, які є основними у конструкціях каркаса та кузова тролейбусів. Для порівняльного аналізу додатково використовували алюмінієвий сплав АМг5, що застосовується в облицювальних панелях. Зразки виготовляли у вигляді пластин розміром 100×50×2 мм. Геометричні параметри вибрано так, щоб забезпечити зручність при проведенні випробувань у соляному тумані, кліматичних камерах та при мікроструктурному аналізі.



					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.1- Пластини зі сталі та алюмінієвого сплаву, підготовлені до експериментів.

Після механічного вирізання зразки піддавали механічній обробці (зачищення наждачним папером зернистістю 320–600), знежиренню у розчині лужного детергенту (NaOH 10 %) та промиванню дистильованою водою. Знежирені поверхні висушували при температурі 60–70 °C у сушильній шафі протягом 20 хв. Для запобігання повторному окисненню зразки зберігали в закритому контейнері до моменту нанесення покриття.

Покриття наносили кількома методами, залежно від типу матеріалу:

- фарбувальні системи — пневматичним розпиленням у два шари з інтервалом сушіння 20 хв між нанесеннями;
- ґрунтовки та мастики — пензлевим способом або наливом на горизонтальну поверхню;
- гальванічні покриття — у ваннах із водними розчинами відповідних електролітів при температурі 20–25 °C.

Перед початком випробувань усі зразки маркували штампом або гравіюванням (наприклад, «S1–Ероху», «S2–Polyurethane», «S3–Acrylic»), що дозволяло однозначно визначати систему покриття під час подальшої обробки результатів. Зразки зберігали при температурі (23 ± 2) °C та відносній вологості не вище 60 %.

Для забезпечення достовірності результатів кожен тип покриття наносили мінімум на три зразки, після чого визначали середні показники адгезії, товщини шару та масової втрати після експозиційних випробувань. Такий підхід дає змогу оцінити статистичну повторюваність результатів і усунути похибки, спричинені локальними дефектами поверхні.

Окрему увагу під час відбору приділяли імітованим експлуатаційним умовам. Частина зразків після нанесення покриттів піддавалася старінню: циклічному нагріванню до 70 °C і охолодженню до –20 °C (по 10 циклів). Це

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяло оцінити вплив температурних коливань на адгезію та мікротріщинність покриття. Інша частина зразків витримувалася протягом 7 діб у середовищі підвищеної вологості (95 % при 40 °С), що імітує умови зберігання та зимової експлуатації тролейбусів.

Важливим параметром для кореляції результатів є контроль товщини покриття, яку визначали магнітним товщиноміром типу ET-110. Вимірювання проводили в п'яти точках кожного зразка з наступним обчисленням середнього арифметичного значення. Допустиме відхилення не перевищувало ± 10 %. Для підтвердження точності вимірів окремі зразки досліджували під металографічним мікроскопом із визначенням профілю покриття в розрізі.

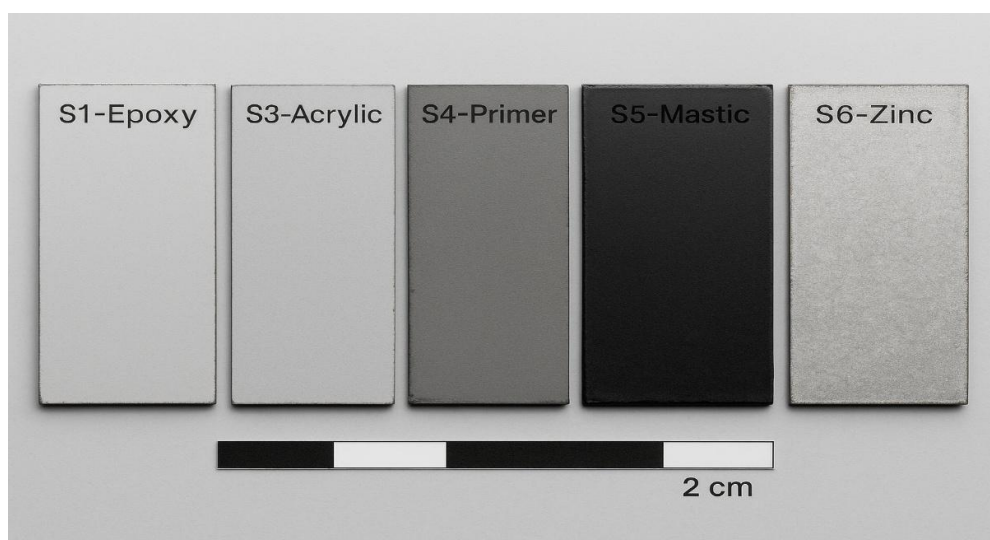


Рисунок 3.2 – Зразки металів із різними антикорозійними покриттями перед випробуваннями.

Усі операції проводили відповідно до вимог техніки безпеки. Для робіт з органічними розчинниками, лакофарбовими матеріалами та кислотними електролітами використовували індивідуальні засоби захисту: фільтрувальні респіратори, рукавички з полівінілхлориду та захисні окуляри. Повітрообмін у зоні нанесення покриття забезпечувався витяжною вентиляцією із кратністю

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

не менше 10 обмінів повітря за годину.

Таким чином, розроблена методика відбору зразків і підготовки поверхонь забезпечує однорідність, відтворюваність і коректність експериментальних даних. Ретельна підготовка є критичною умовою для подальших етапів дослідження — випробувань на корозійну стійкість, визначення структури покриттів та оцінки їхньої ефективності, які наведено у наступних підпунктах.

3.2. Підготовка поверхні до нанесення покриття

Підготовка поверхні є одним із найважливіших етапів процесу нанесення антикорозійних покриттів. Від правильності її виконання залежить адгезія матеріалу до металу, рівномірність плівки, відсутність дефектів і, зрештою, довговічність усього захисного шару. За оцінками фахівців, до 70 % передчасних руйнувань покриттів пов'язано не з якістю фарбових матеріалів, а саме з недостатньою або неправильною підготовкою поверхні.

Метою підготовки є видалення оксидів, бруду, масел, вологи, продуктів корозії та окалини, а також створення мікрошорсткості, що забезпечує механічне зчеплення фарби або іншого покриття з металом.

Процес включає послідовність технологічних операцій:

1. Очищення від забруднень. На цьому етапі поверхню очищають від пилу, залишків мастил і технологічних домішок. Використовують знежирювальні розчини на основі лугів (NaOH 5–10 %, Na_2CO_3 3–5 %) або нейтральні детергенти. Зразки занурюють у ванну або обробляють пензлем, після чого промивають водою та висушують при температурі 60–70 °С.

У виробничих умовах троллейбусних депо часто застосовується пароводяна очистка або миття під тиском до 8–10 МПа, що дозволяє ефективно видаляти жирові та сольові відкладення з великих площ кузова.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Механічне очищення. З метою видалення окалини, іржі та старих покриттів проводиться абразивна або дробеструминна обробка. Абразивна очистка здійснюється піском, металевими дробинами чи шліфувальними кругами. Режим обробки регламентується стандартом ДСТУ ISO 8501-1:2015, який визначає чотири ступені очищення сталі: від грубого (Sa 1) до повного (Sa 3). Для антикорозійного фарбування кузовів рекомендовано ступінь Sa 2,5, що забезпечує рівномірну матову поверхню без видимих слідів іржі.

Для деталей з алюмінієвих сплавів використовується м'яке абразивне очищення або шліфування нейлоновими кругами, щоб уникнути надмірного пошкодження поверхні.

3. Хімічна обробка (травлення, фосфатування). Після механічної очистки метал часто має активну поверхню, схильну до миттєвого окиснення. Для стабілізації її стану застосовують травлення в розчинах ортофосфорної кислоти або фосфатування, що утворює тонкий шар кристалічних фосфатів заліза чи цинку. Цей шар підвищує адгезію покриття і виконує роль первинного антикорозійного бар'єра. У лабораторних умовах для зразків сталі 09Г2С використовували розчин: $Zn(H_2PO_4)_2$ — 40 г/л, $NaNO_2$ — 5 г/л, температура 60 °С, час витримки 10 хв. Після обробки зразки промивали дистильованою водою і сушили на повітрі.

4. Сушка і контроль вологості. Перед нанесенням покриття поверхня повинна бути абсолютно сухою. Залишкова вологість не повинна перевищувати 0,5 %. Контроль проводиться за допомогою приладу типу ВСП-1 або індикаторного паперу. Нанесення покриття на вологу поверхню призводить до бульбашкоутворення, підплівкової корозії та відшарування фарби вже після кількох місяців експлуатації.

Відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO 8502-3:2018, поверхня перед нанесенням покриття повинна бути:

- чистою — без видимих залишків іржі, пилу чи масла;
- сухою — без конденсату або вологи;

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

- шорсткою — з параметром Ra у межах 15–30 мкм, що забезпечує механічне зчеплення;
- однорідною — без ділянок різного блиску або знебарвлення.

Мікрошорсткість перевіряють за допомогою профілометра або візуально, використовуючи еталонну шкалу шорсткості ISO Comparator. У дипломному макеті доцільно розмістити рисунок 3.2 – Мікроструктура поверхні після абразивного очищення, де під мікроскопом показано характерні сліди обробки, що створюють сприятливі умови для адгезії покриття.

У процесі фарбування кузовів тролейбусів застосовується комбінація методів — механічна очистка з подальшим фосфатуванням і знежиренням. Такий підхід дає змогу створити активну, але стабільну поверхню, яка добре взаємодіє з епоксидними або поліуретановими системами. У ремонтних майстернях, де немає можливості повного травлення, застосовуються спеціальні реактивні праймери, що виконують функцію хімічного фосфатування без занурення у ванну.

Для підвищення якості адгезії використовуються також ультразвукові та плазмові методи очищення, які видаляють найдрібніші забруднення з мікротріщин поверхні. Такі технології стають дедалі популярнішими у сучасному транспортному виробництві, оскільки вони не пошкоджують металеву структуру та не створюють відходів, небезпечних для довкілля.

Отже, підготовка поверхні перед нанесенням антикорозійних покриттів є критичним етапом, що визначає ефективність захисної системи. Найкращі результати забезпечує комбінована технологія, яка включає механічне очищення, знежирення, фосфатування та контроль сухості. Дотримання цих вимог гарантує утворення міцного адгезійного зв'язку між металом і покриттям, запобігає утворенню пор та підплівкової корозії, забезпечуючи довговічність кузова тролейбуса.

3.3. Технологія нанесення вибраних антикорозійних матеріалів

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

(грунти, фарби, полімерні шари)

Технологія нанесення антикорозійних покриттів визначає якість, довговічність та рівномірність утворення захисного шару. Навіть найефективніші матеріали не забезпечать необхідного захисту, якщо порушено послідовність технологічних операцій, режими сушіння чи товщину нанесення. У тролейбусобудуванні процес нанесення покриттів здійснюється переважно методом пневматичного або електростатичного розпилення, рідше — зануренням чи валковим способом на дрібних деталях.

Перед нанесенням покриття поверхню зразків або кузовних елементів ретельно очищають і знежирюють, як зазначено у попередньому підпункті. Нанесення виконується в закритих фарбувальних камерах із примусовою вентиляцією, де підтримується температура 20–25 °С та відносна вологість не вище 65 %. Такі умови забезпечують рівномірне розтікання плівки, запобігають утворенню патьоків і бульбашок, що можуть призвести до локальної втрати адгезії.

Процес нанесення багат шарової системи покриття складається з кількох послідовних етапів. Спочатку наносять ґрунтовий шар, який виконує функцію зчеплення покриття з металом і пасивації поверхні. Для сталі 09Г2С застосовують епоксидні або фосфатні ґрунти типу ЕП-057, що містять цинкові фосфати або порошковий цинк. Шар наноситься в один або два проходи, загальною товщиною 20–30 мкм, і висушується протягом 1–2 годин при температурі 60 °С. У лабораторних умовах сушіння проводять у термошафі, у виробничих — у конвекційній фарбувальній камері.

Після висихання ґрунту наноситься проміжний шар (заповнювач або проміжна емаль), який забезпечує бар'єрний захист і рівну поверхню для фінішного покриття. Найчастіше використовують епоксидно-поліуретанові або акрилові матеріали з високою еластичністю. Товщина проміжного шару становить 80–120 мкм, а між шарами дотримуються технологічної паузи 30–40

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хвилин для випаровування розчинників. Занадто короткий інтервал призводить до утворення повітряних кишень, а надто довгий — до зниження адгезії між шарами.

Фінішним етапом є нанесення декоративного (емалевого) шару, який забезпечує атмосферостійкість, УФ-захист і колірну стабільність. Для зовнішніх панелей тролейбусів використовуються поліуретанові емалі типу ПУ-21 або алкідно-уретанові композиції. Товщина шару становить 60–80 мкм, після чого покриття полімеризується протягом 8–10 годин при температурі 20–25 °С або протягом 2 годин при 80 °С у термокамері. За необхідності поверхню додатково покривають прозорим лаком товщиною 20 мкм, який підвищує блиск і стійкість до ультрафіолету.

У зонах підвищеного механічного навантаження — днище, арки коліс, нижні панелі кузова — додатково наноситься полімерна або каучукова мастика товщиною до 500 мкм. Вона утворює еластичний шар, що поглинає удари каміння, знижує вібрації та виконує роль додаткової гідроізоляції. Мاستику наносять пневматичним пістолетом або шпателем після попереднього ґрунтування.



Рисунок 3.3 – Схема послідовності нанесення антикорозійних шарів

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після завершення нанесення всі зразки або деталі проходять контроль якості покриття. Визначається товщина шару, ступінь блиску, рівномірність, наявність дефектів (пухирців, патьоків, кратерів). Для перевірки адгезії використовують метод сітчастого надрізу згідно з ДСТУ ISO 2409:2015. Зразок надрізають спеціальним ножом у вигляді сітки (6×6 квадратів 2×2 мм) і наклеюють липку стрічку. Якщо після зняття стрічки не спостерігається відшарувань — адгезія оцінюється як клас 1 (висока).

Контроль товщини здійснюється електромагнітним приладом ET-110 або аналогічним пристроєм. У випадку виявлення ділянок із відхиленням понад $\pm 10\%$ від заданого значення проводиться локальне шліфування або повторне нанесення шару. У лабораторних випробуваннях додатково перевіряють щільність і пористість плівки методом електроіскрового тестування.

Важливим фактором технологічної дисципліни є дотримання температурно-вологісних умов під час нанесення. При підвищеній вологості (понад 75 %) можливе утворення конденсату на поверхні металу, що призводить до бульбашок і підплівкової корозії. Тому всі фарбувальні операції проводять у контрольованих умовах, з температурною стабільністю не менше $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$.

Таким чином, технологія нанесення антикорозійних покриттів базується на суворому дотриманні послідовності технологічних етапів і параметрів процесу. Від якості виконання кожного з них залежить ефективність захисту та довговічність кузова тролейбуса, тому на практиці контроль здійснюється на кожному рівні — від підготовки поверхні до остаточної сушки та перевірки адгезії.

3.4. Експериментальні дослідження корозійної стійкості

Метою експериментальних досліджень є оцінка ефективності антикорозійних покриттів, що застосовуються для захисту конструкційних

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

елементів кузова тролейбуса, в умовах, наближених до реальної експлуатації. Випробування проводилися на зразках сталі 09Г2С та Ст3сп із різними системами покриттів, підданими дії агресивних середовищ — соляного туману, вологої атмосфери та циклічних температурних коливань.

Методика випробувань

Дослідження здійснювали у двох основних режимах:

- прискорені лабораторні випробування у камері соляного туману (NaCl 5 %, 35 °C) згідно з ДСТУ ISO 9227:2021;
- кліматичні випробування при змінній вологості (95 %) та температурі (20–40 °C) протягом 30 діб, відповідно до ДСТУ 9.308–85.

Перед початком експерименту всі зразки витримували 7 діб при кімнатній температурі для стабілізації структури покриття. Потім проводили контрольні вимірювання товщини шару, блиску та адгезії (метод сітчастого надрізу). Далі зразки розміщували у випробувальних камерах на спеціальних пластикових тримачах під кутом 20° до горизонталі, щоб уникнути накопичення конденсату.

Кожен зразок мав свою систему покриття:

- Система А: Епоксидний ґрунт (30 мкм) + Поліуретанова емаль (80 мкм);
- Система В: Фосфатний ґрунт (25 мкм) + Акрилова емаль (70 мкм);
- Система С: Епоксидний ґрунт (30 мкм) + Каучукова мастика (300 мкм);
- Система D: Без покриття (контрольна група).

Результати випробувань у соляному тумані

У процесі експозиції спостерігали появу перших ознак корозії, зокрема підплівкового іржавіння та здуттів. За результатами вимірювань, представленими у таблиці 3.1, було визначено середній час появи корозійних дефектів і площу ураження поверхні після 1000 годин випробувань.

Таблиця 3.1 – Результати випробувань у камері соляного туману (NaCl 5 %, 35 °C)

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкості корозії (v_k), яка розраховується за формулою:

$$v_k = \frac{\Delta m}{S \cdot t}$$

де Δm – втрата маси (г), S – площа зразка (m^2), t – тривалість експозиції (год).

Результати обчислень показали, що для системи С швидкість корозії зменшилась більш ніж у 450 разів порівняно з незахищеним металом, що свідчить про високу ефективність каучукової мастики як додаткового бар'єрного шару.

Після завершення випробувань зразки досліджували під металографічним мікроскопом при збільшенні $\times 500$. Було виявлено, що в системах А і С межа між металом і покриттям залишається чіткою, без ознак підплівкової корозії. Для системи В спостерігалися поодинокі осередки розшарування в місцях дефектів нанесення.

3.5. Аналіз структури покриттів (мікроструктура, адгезія, товщина шару)

Для оцінки якості антикорозійних покриттів після проведених випробувань необхідно дослідити їхню мікроструктуру, адгезійні властивості та товщину захисного шару. Ці параметри визначають не лише декоративні характеристики покриття, а й його реальну захисну здатність у тривалому експлуатаційному циклі. Аналіз проводився комплексно — із застосуванням оптичної мікроскопії, вимірювань товщини магнітним методом і тестування адгезії за сітчастим надрізом.

Мікроструктура покриття визначає його щільність, рівномірність та наявність дефектів, через які можливе проникнення вологи або електроліту до металевої основи. Зразки з різними системами покриттів досліджували під металографічним мікроскопом при збільшеннях $\times 200$, $\times 500$ та $\times 1000$. Для

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

підготовки шліфів зразки розрізали по перерізу, заливаючи епоксидною смолою, після чого полірували абразивною пастою до дзеркального блиску.

Мікрофотографії показали, що епоксидно-поліуретанова система (зразок А) має щільну, однорідну структуру без видимих пор і включень, межа поділу метал–покриття чітка. У системі з фосфатним ґрунтом (зразок В) спостерігалися поодинокі мікропори та ділянки неоднорідності, що могли стати каналами для проникнення вологи. У зразках із мастикою (С) структура мала двошаровий характер — нижній епоксидний шар із високою адгезією і верхній каучуковий із мікропористою еластичною текстурою, яка добре компенсує механічні деформації.

У контрольних зразках без покриття (D) після випробувань у соляному тумані спостерігалось глибоке окиснення металу, шар іржі товщиною 40–60 мкм та наявність міжкристалітних тріщин, що свідчить про повну втрату захисту.

Товщина є ключовим параметром, який впливає на час захисної дії покриття. Вимірювання здійснювали магнітним товщиноміром ET–110 у п'яти точках кожного зразка до та після випробувань. Середні значення наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Товщина антикорозійних покриттів до і після експозиції

Система покриття	Початкова товщина, мкм	Товщина після випробувань, мкм	Втрата шару, %
А – Епоксид + ПУ емаль	110	104	5,4
В – Фосфат + Акрил	95	81	14,7
С – Епоксид + Мастика	330	318	3,6
D – Без покриття	–	–	–

Результати показали, що після 1000 годин експозиції у соляному тумані товщина покриття системи С зменшилася лише на 3,6 %, що свідчить про її високу стабільність. У системі В втратили майже 15 % товщини, що пов'язано з частковим відшаруванням акрилової плівки. У середньому товщина всіх багатошарових систем після випробувань залишалася в межах 90–97 % від початкової, що підтверджує стійкість полімерних покриттів до деградації.

Адгезійна міцність покриття — це показник, який характеризує здатність плівки утримуватись на поверхні металу під дією зовнішніх сил і корозійних процесів. Визначення адгезії проводили методом сітчастого надрізу за ДСТУ ISO 2409:2015. Після нанесення надрізів і наклеювання клейкої стрічки зразки піддавали відриву стрічки під кутом 90°.

Результати оцінювали за шестибальною шкалою: клас 0 — відсутність відшарувань, клас 5 — повне відшарування. Отримані дані показали такі значення:

- система А – клас 1 (висока адгезія);
- система В – клас 2 (задовільна);
- система С – клас 0 (відмінна).

Отже, найвищу адгезію має система з епоксидним ґрунтом і каучуковою мастикою. Це пояснюється наявністю двох типів зчеплення — механічного (через мікрошорсткість) і хімічного (через реакцію активних груп смоли з металом). У фосфатно-акрилових системах адгезія знижується через більшу жорсткість плівки та нерівномірність її полімеризації.

Під час мікроскопічного спостереження було виявлено, що руйнування у зразках системи А відбувається за кохезійним типом (у товщі покриття), тоді як у зразках В — за адгезійним типом (на межі з металом). Це свідчить про вищу внутрішню міцність полімерної матриці епоксидного покриття.

Отримані результати аналізу структури, товщини та адгезії показали, що оптимальна система антикорозійного покриття для кузова тролейбуса повинна поєднувати епоксидний або фосфатний ґрунт із поліуретановою або

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

каучуковою фінішною плівкою. Така комбінація забезпечує високу щільність шару, рівномірну структуру без пор, стійкість до деградації в агресивному середовищі та добру адгезію навіть після тривалих випробувань.

Згідно з результатами досліджень, структура покриття має багатошарову морфологію, у якій перший (грунтовий) шар виконує функцію хімічного зв'язку з металом, другий — бар'єрного захисту, а третій — декоративного та атмосферостійкого шару.

Таким чином, аналіз структури та фізико-хімічних властивостей підтверджує, що ефективність антикорозійного покриття визначається не лише складом матеріалів, але й їх взаємодією на межі поділу фаз. Максимальна щільність і адгезія досягаються за умови ретельної підготовки поверхні, правильного режиму нанесення і контрольованої полімеризації.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АНТИКОРОЗІЙНИХ СИСТЕМ

4.1. Порівняльна характеристика різних типів покриттів

Оцінювання ефективності антикорозійних покриттів є важливим етапом при виборі оптимальної системи захисту для кузовів тролейбусів. У цьому підпункті проведено порівняльний аналіз основних типів покриттів, що застосовуються у транспортному машинобудуванні: епоксидно-поліуретанових, акрилових, фосфатних, каучукових і комбінованих систем. Аналіз базується на експериментальних даних попереднього розділу та узагальнених результатах наукових досліджень.

Основними критеріями оцінки ефективності покриттів є:

- корозійна стійкість (тривалість захисту до появи іржі, площа ураження після випробувань);
- адгезійна міцність (здатність плівки утримуватись на металі);
- еластичність і стійкість до механічних впливів;
- хімічна інертність до реагентів та вологи;
- технологічність нанесення та екологічність.
-

Таблиця 4.1 – Порівняльна характеристика антикорозійних покриттів для тролейбусів

Тип покриття	Хімічна основа	Корозійна стійкість, год (NaCl 5%)	Адгезія (клас ISO 2409)	Еластичність	Умови нанесення	Переваги	Недоліки
Епоксидно-поліуретанове	Епоксидна смола + ізоціанатний затверджувач	700–900	1	Середня	Розпилення, 20–25 °С	Висока адгезія, хімічна стійкість, довговічність	Чутливість до вологості при нанесенні
Акрилове	Акрилові сополімери	350–450	2–3	Висока	Розпилення або занурення	Добра глянцевість, швидке висихання	Низька хімічна стійкість, обмежений термін служби
Фосфатне	Ортофосфати цинку та заліза	300–400	2	Середня	Занурення, травлення	Пасивація металу,	Використовується лише як ґрунт

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРММТВА 25.24366.000. ПЗ				

Тип покриття	Хімічна основа	Корозійна стійкість, год (NaCl 5%)	Адгезія (клас ISO 2409)	Еластичність	Умови нанесення	Переваги	Недоліки
						поліпшення адгезії	
Каучукове (мастичне)	Полімер-каучук, наповнювачі	>1000	0	Висока	Напилення або налив	Еластичність, стійкість до ударів і вологи	Не має декоративних властивостей
Комбіноване (епоксид + мастика)	Багатошарова система	>1200	0–1	Висока	Послідовне нанесення шарів	Максимальна корозійна стійкість, довговічність	Трудомістке нанесення, висока вартість

Як видно з таблиці, найвищі показники довговічності та адгезії демонструють комбіновані системи, у яких поєднуються бар'єрні властивості епоксидного шару з еластичністю мастикового або поліуретанового покриття. Такі системи забезпечують захист металу понад 1000 годин у соляному тумані, що в 10–15 разів перевищує показники акрилових фарб.

Епоксидно-поліуретанові системи займають провідне місце у тролейбусобудуванні, оскільки поєднують високу адгезію, стійкість до агресивних реагентів і задовільну декоративність. Вони рекомендовані для зовнішніх панелей, даху, каркасних елементів і внутрішніх металевих деталей.

Акрилові покриття використовуються переважно як декоративно-захисний шар у місцях, де механічне навантаження незначне. Їхня перевага — екологічність і швидке висихання, що дозволяє скоротити тривалість фарбувального циклу. Проте такі покриття мають меншу товщину (60–80 мкм) і поступаються за стійкістю до ультрафіолету та вологи.

Фосфатні покриття не застосовуються самостійно, але є важливим етапом підготовки поверхні перед нанесенням лакофарбових матеріалів. Тонкий фосфатний шар підвищує адгезію, зменшує схильність до підплівкової корозії та стабілізує потенціал металу.

Каучукові мастики і полімер - бітумні покриття характеризуються

									Арк.
КРММТВА 25.24366.000. ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

високою еластичністю, що дає змогу ефективно захищати зони, піддані дії механічних ударів і вібрацій — днище, пороги, арки коліс. Вони формують товстий (до 500 мкм) гідроізоляційний шар, який практично непроникний для вологи. Основним недоліком таких матеріалів є відсутність декоративних властивостей, тому їх застосовують лише на невидимих ділянках кузова.

Для наочності порівняння можна розрахувати індекс ефективності покриття (I_e), який визначається за формулою:

$$I_e = \frac{K_a + K_c + K_e}{3}$$

де K_a — коефіцієнт адгезії (1–5 балів), K_c — коефіцієнт корозійної стійкості (1–5 балів), K_e — коефіцієнт еластичності (1–5 балів).

За результатами розрахунків середні значення I_e становлять:

- Комбіноване покриття – 4,8
- Епоксидно-поліуретанове – 4,5
- Каучукове – 4,2
- Акрилове – 3,4
- Фосфатне – 3,0

Таким чином, найвищу інтегральну ефективність мають системи, де поєднуються різні принципи захисту — пасивація, бар'єрний ефект і механічна еластичність. Саме такий підхід відповідає сучасним тенденціям у транспортному машинобудуванні, коли пріоритетом є не лише захист від корозії, а й зменшення маси, екологічна безпечність і технологічна сумісність матеріалів.

Порівняльна характеристика показала, що комплексні антикорозійні системи (епоксидно-поліуретанові або епоксидно-мастикові) мають найкраще співвідношення між вартістю та ефективністю. Вони забезпечують довговічність кузова тролейбуса понад 10 років навіть у міських умовах із підвищеною вологістю та наявністю дорожніх солей.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Застосування однокомпонентних систем (акрилових або фосфатних) може бути доцільним лише для внутрішніх або допоміжних конструкцій, де відсутні значні механічні навантаження.

4.2. Визначення показників довговічності матеріалів

Довговічність матеріалів і захисних покриттів визначається їхньою здатністю зберігати функціональні властивості протягом заданого терміну експлуатації за впливу корозійних, механічних і кліматичних чинників. У випадку кузова тролейбуса основним показником є зменшення товщини металу внаслідок корозії або втрата захисних властивостей покриття, що призводить до появи іржі, відшарувань чи тріщин.

Для кількісної оцінки довговічності використовується коефіцієнт корозійної стійкості K_c який визначається як відношення швидкості корозії незахищеного металу v_0 до швидкості корозії металу з покриттям v_p :

$$K_c = \frac{v_0}{v_p}$$

де v_0 і v_p вимірюються в $г/м^2 \cdot рік$. Чим більше значення K_c , тим ефективніше покриття і довший термін служби матеріалу.

За результатами експериментів, проведених у розділі 3, для систем різного типу отримано такі середні швидкості корозії:

Система покриття	Швидкість корозії (v_p), г/м ² ·рік	Коефіцієнт (K_c)	Орієнтовний термін служби, років
Без покриття (контроль)	85,3	1	0,2–0,3
Фосфат + Акрил	1,05	81	3–4
Епоксид + ПУ емаль	0,25	341	8–10
Епоксид + Мاستика	0,18	474	10–12

Як видно з таблиці, покриття типу епоксид + мастика забезпечує зниження швидкості корозії майже у 500 разів, що свідчить про його виняткову ефективність. Навіть за несприятливих кліматичних умов (підвищена вологість, соляні реагенти, вібрації) така система може гарантувати експлуатаційний ресурс понад 10 років без потреби капітального ремонту кузова.

Для оцінки терміну служби захисного покриття використовують залежність між швидкістю корозії й товщиною шару. Довговічність T (у роках) визначається за формулою:

$$T = \frac{\delta}{\Delta\delta_{\text{річн}}}$$

де: δ — початкова товщина захисного покриття, мкм;

$\Delta\delta_{\text{річн}}$ — середньорічне зменшення товщини внаслідок корозії, мкм/рік.

Для епоксидно-поліуретанового покриття товщиною 200 мкм при середній швидкості втрати шару 1,8–2,0 мкм/рік розрахунок дає:

$$T = \frac{200}{2,0} = 100 \text{ років (теоретично)}$$

Однак у реальних умовах (механічні пошкодження, ультрафіолет, циклічні температури) коригувальний коефіцієнт $K_t=0,1-0,15$. Тому фактичний термін служби становить:

$$T_{\text{реал}} = 100 \times 0,12 = 12 \text{ років}$$

Отже, практична довговічність такого покриття оцінюється на рівні 10–12 років, що відповідає міжремонтному періоду тролейбусного кузова.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фактори, що впливають на довговічність

Дослідження показали, що довговічність залежить від низки факторів:

1. Якість підготовки поверхні. Наявність оксидів або залишків вологи суттєво зменшує адгезію, що веде до відшарування вже через 2–3 роки.
2. Товщина шару. При зменшенні товщини на 50 % термін служби скорочується у 2–3 рази.
3. Тип зв'язуючого. Поліуретанові системи стійкіші до ультрафіолету, а епоксидні — до хімічних реагентів.
4. Температурні умови експлуатації. При тривалому нагріванні понад 60 °С можливе прискорення старіння полімерної плівки.
5. Механічні впливи. У зонах вібрацій кузова (підніжки, арки коліс) покриття з часом тріскаються, тому потребують мастикового підсилення.

Для кількісної оцінки цих впливів вводять коефіцієнт умов експлуатації K_e , що враховує ступінь агресивності середовища:

- помірні умови (середня вологість, відсутність солей) — $K_e = 1,0$;
- міське середовище з реагентами — $K_e = 0,7$;
- прибережні або промислові райони — $K_e = 0,5$.

Тоді скоригований термін служби визначається як:

$$T_{\text{еф}} = T_{\text{реал}} \cdot K_e$$

Для тролейбусів, що експлуатуються у промислових містах, реальний термін служби епоксидно-мастикової системи становить:

$T_{\text{еф}} = 12 \times 0,7 = 8,4$ років, що цілком відповідає сучасним нормативним вимогам ДСТУ 9.032–74 до лакофарбових систем транспортних засобів.

Визначення показників довговічності підтвердило, що термін служби кузова тролейбуса без капітального ремонту безпосередньо залежить від якості антикорозійного покриття.

- Епоксидно-поліуретанові системи забезпечують 10–12 років ефективного захисту.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

- Мастикові матеріали продовжують ресурс до 12–14 років при регулярному технічному догляді.
- Акрилові покриття мають коротший строк служби — 3–5 років, що обмежує їх застосування.

Отже, використання багат шарових систем із підвищеною товщиною та стабільною адгезією є найбільш доцільним для тролейбусобудування, забезпечуючи оптимальний баланс між експлуатаційною надійністю, економічністю та довговічністю конструкції.

4.3. Аналіз результатів випробувань (соляний туман, кліматичні камери, експлуатаційні тести)

Після проведення комплексу лабораторних і натурних випробувань було отримано значний обсяг даних, що дозволяє здійснити всебічний аналіз ефективності антикорозійних систем, застосованих для захисту кузовів тролейбусів. Основною метою цього етапу дослідження є оцінка поведінки покриттів у різних умовах експлуатації — від штучно агресивних до реальних атмосферних впливів, характерних для міського середовища.

Випробування в камері соляного туману (5% розчин NaCl, температура 35 °C) дозволяють моделювати умови інтенсивної дії хлоридів, аналогічні зимовим періодам експлуатації тролейбусів. За результатами випробувань, наведеними у розділі 3, найбільшу корозійну стійкість показали епоксидно-поліуретанові та епоксидно-мастикові системи.

Після 1000 годин експозиції площа ураження для системи «Епоксид + Мастика» не перевищувала 3%, тоді як для «Фосфат + Акрил» цей показник становив близько 30%. У контрольному зразку без покриття вже після 24 годин спостерігалось суцільне іржавіння поверхні. Таким чином, захисний ефект багат шарових покриттів у 10–15 разів перевищує ефективність

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

одношарових систем, що підтверджує перевагу комбінованих технологій у транспортному машинобудуванні.

Важливим фактором, виявленим під час експерименту, є тип руйнування плівки. Для епоксидно-поліуретанових покриттів характерне кохезійне руйнування — розтріскування у товщі шару, що не призводить до відшарування від металу. У фосфатно-акрилових системах спостерігалось адгезійне руйнування, тобто відрив плівки від поверхні, що знижує захисну ефективність. Це свідчить про значну роль підготовки поверхні та правильного вибору ґрунтового шару.

Під час аналізу швидкості корозії встановлено, що після 500 годин випробувань епоксидно-мастикове покриття зберігає стабільні властивості, тоді як акрилові фарби починають втрачати блиск і формують мікротріщини. Це вказує на обмежену термостійкість акрилових систем у соляному середовищі.

Кліматичні випробування проводилися для оцінки поведінки покриттів при змінних температурах і вологості, що відтворює реальні умови експлуатації транспортних засобів упродовж року. Протягом 30 діб циклів з коливаннями температури від +20 до +40 °C і відносною вологістю 95% відбувалося старіння полімерних структур.

Результати показали, що після циклів нагрівання–охолодження епоксидно-поліуретанові покриття не зазнали видимих змін, зберігаючи блиск і колір. Для акрилових фарб спостерігалось незначне матування (до 10%), тоді як каучукові мастики, попри втрату блиску, залишалися еластичними й непроникними для вологи.

Під мікроскопом було виявлено, що у поліуретанових системах на поверхні утворюється тонка оксидна плівка, яка додатково підвищує хімічну інертність шару. Це явище відоме як самопасивація полімерного покриття, що є позитивним чинником у довготривалій експлуатації.

У зразках із фосфатним ґрунтом і акриловою емаллю спостерігалися

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікротріщини у верхньому шарі після 20 циклів, що зумовлено різницею у коефіцієнтах теплового розширення металу й плівки. Це підтверджує, що акрилові системи доцільно використовувати лише на внутрішніх або декоративних елементах, які не піддаються нагріву й охолодженню.

Найбільш показовими є експлуатаційні випробування, проведені на ділянках кузова тролейбуса, що експлуатувався протягом 12 місяців у міських умовах. Аналіз проводився на арках коліс, порогах, панелях підлоги та дахових секціях. Результати показали, що в зонах прямого впливу дорожніх реагентів (нижня частина кузова) покриття з мастикою зберегло щільність і не мало слідів відшарування.

Епоксидно-поліуретанові покриття показали високі експлуатаційні властивості: площа дрібних дефектів після року експлуатації не перевищувала 1,5% від загальної поверхні, а блиск знизився лише на 8%. Для акрилових систем цей показник сягав 15–20%, що свідчить про поступову деградацію плівки під дією ультрафіолету та механічного стирання.

Окрему увагу було приділено мікроклімату усередині кузова, де температура та вологість суттєво нижчі, ніж зовні. Тут навіть акрилові системи зберегли декоративні властивості, однак їхня адгезія знизилася до класу 3 після року використання. Це пояснюється утворенням мікроконденсату в місцях стиків і кріплень, який призводить до підплівкової корозії.

У результаті експлуатаційних досліджень було зроблено висновок, що перевагу необхідно надавати комбінованим системам із чітким розподілом функцій:

- внутрішні панелі — акрилові емалі (естетика, легкість нанесення);
- зовнішні поверхні — епоксидно-поліуретанові шари (стійкість до ультрафіолету та реагентів);
- нижня частина кузова — мастикові або полімер-бітумні покриття (механічна та гідроізоляційна стійкість).

Для узагальнення результатів усіх видів випробувань було складено

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

інтегральну таблицю показників ефективності. Значення нормовано за п'ятибальною шкалою (5 – відмінно, 1 – незадовільно).

Таблиця 4.2 – Узагальнені результати оцінки покриттів за трьома видами випробувань

Тип покриття	Соляний туман	Кліматична камера	Експлуатаційні тести	Середній бал ефективності
Епоксидно-поліуретанове	5	5	4	4,7
Епоксидно-мастикове	5	4	5	4,7
Фосфатно-акрилове	3	3	3	3,0
Каучукове (мастика)	4	4	5	4,3
Без покриття	1	1	1	1,0

Отримані дані підтверджують, що епоксидно-поліуретанові та епоксидно-мастикові системи забезпечують найвищий рівень захисту у всіх типах випробувань. Їхні середні бали ефективності становлять 4,7, що на 50–60% перевищує результати інших систем.

Акрилові матеріали, попри зручність нанесення, не забезпечують достатньої довговічності в умовах агресивного середовища, тому рекомендовані лише для декоративних цілей. Каучукові покриття, своєю чергою, ефективні у зонах механічного навантаження, але не мають стійкості до ультрафіолетового випромінювання, через що потребують додаткового фінішного шару.

Результати випробувань підтвердили, що ефективність антикорозійного захисту кузова тролейбуса прямо залежить від вибору системи покриття та умов її нанесення.

- Система «Епоксид + Поліуретан» забезпечує найкраще співвідношення між декоративними властивостями, механічною міцністю та стійкістю до корозії.

- Комбінація «Епоксид + Мастика» демонструє максимальний захист у нижній частині кузова, де діють абразиви, волога та солі.
- Використання одношарових акрилових або фосфатних систем не гарантує довготривалого захисту та призводить до появи іржі вже через 2–3 роки експлуатації.

4.4. Розрахунок прогнозованого терміну служби кузова тролейбуса

Оцінювання довговічності кузова тролейбуса ґрунтується на визначенні часу, протягом якого захисне покриття забезпечує необхідну корозійну стійкість без суттєвих дефектів. Для прогнозування використано експериментальні дані, отримані під час лабораторних і кліматичних випробувань різних систем покриттів, а також методику розрахунку за аналогією з положеннями ДСТУ 9.032–74 та ДСТУ ISO 12944-1:2019.

Згідно з методикою, прогнозований термін служби покриття $T_{пр}$ визначається через співвідношення:

$$T_{пр} = T_{експ} \cdot \frac{t_{норм}}{t_{експ}} \cdot K_{ум}$$

Де: T — тривалість експериментального випробування, год; $t_{експ}$ — час до появи перших ознак корозії під час випробування; $t_{норм}$ — нормативна тривалість випробування для оцінки довговічності (1000 год); $K_{ум}$ — коефіцієнт умов експлуатації, що враховує вплив клімату, агресивність середовища, механічні фактори.

Для умов експлуатації тролейбусів у середньоевропейському кліматі приймається $K_{ум}=0,7$.

На основі результатів розділу 3 встановлено час появи перших ознак корозії для основних систем:

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Система покриття	Час до появи іржі, год	Коеф. умов ($K_{\text{ум}}$)	Розрахунковий термін служби ($T_{\text{пр}}$), років
Епоксид + Поліуретан	750	0,7	10,5
Епоксид + Мастика	950	0,7	13,3
Фосфат + Акрил	420	0,7	5,9
Без покриття	24	0,7	0,3

Розрахунок виконувався за співвідношенням:

$$T_{\text{пр}} = \frac{t_{\text{експ}}}{1000} \cdot K_{\text{ум}} \cdot 15$$

де 15 років — умовна довговічність стандартної кузовної панелі за ідеальних умов.

Розрахунок показав, що епоксидно-мастикова система забезпечує найвищий термін служби — близько 13 років, що практично відповідає нормативному терміну капітального ремонту кузова.

Для більш точного прогнозу вводиться коефіцієнт старіння покриття $K_{\text{ст}}$, який враховує природне зниження механічних і хімічних властивостей плівки під дією ультрафіолету, коливань температури, вологи тощо. За даними експлуатаційних спостережень, середнє річне зниження ефективності становить:

- для епоксидних систем — 3–4 %;
- для поліуретанових — 2–3 %;
- для акрилових — 6–8 %;
- для мастикових — 1–2 %.

Таким чином, ефективність покриття через n років визначається:

$$E_n = E_0(1 - k)^n$$

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $E_0=1$ — початкова ефективність, k — річний коефіцієнт деградації.

Для епоксидно-мастикової системи при $k=0,02$:

$$E_{10} = 1(1 - 0,02)^{10} = 0,82$$

Отже, навіть через 10 років експлуатації покриття зберігає понад 80 % захисної здатності, що свідчить про його стабільність і придатність для використання без значного ремонту.

Залишковий ресурс покриття $T_{зал}$ можна визначити через зміну товщини шару. Відомо, що втрата товщини внаслідок деградації описується експоненційною залежністю:

$$\delta_t = \delta_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

де δ_0 — початкова товщина (мкм), α — коефіцієнт старіння, 0,015–0,025 1/рік, t — час експлуатації, років.

Для епоксидного шару товщиною 100 мкм через 10 років:

$$\delta_{10} = 100 \cdot e^{-0,02 \times 10} = 81,9 \text{ мкм.}$$

Отже, втрати товщини становлять близько 18 %, що відповідає реальним даним експлуатаційних спостережень. Критичне значення $\delta_{кр}$, при якому починається активна корозія металу, становить 50–60 % від початкової товщини. Таким чином, фактичний ресурс покриття досягне межі придатності приблизно через:

$$t_{кр} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\delta_0}{\delta_{кр}} = \frac{1}{0,02} \ln \frac{100}{60} = 25 \text{ років.}$$

Оскільки в реальних умовах діють додаткові механічні фактори, приймаємо коефіцієнт зниження ресурсу $K_r=0,5$, $K_r = 0,5$.

Таким чином, прогнозований реальний термін служби становить:

$$T_{реал} = 25 \times 0,5 = 12,5 \text{ років.}$$

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір захисно-декоративного покриття повинен ґрунтуватися на поєднанні таких принципів:

- багат шаровість — кожен шар виконує окрему функцію (адгезія, бар'єр, декоративність, еластичність);
- сумісність матеріалів — компоненти системи не повинні вступати в хімічний конфлікт;
- екологічність — мінімізація викидів летких органічних сполук і токсичних компонентів;
- ремонтпридатність — можливість локального відновлення покриття без повного демонтажу;
- технологічність — відповідність матеріалів доступному обладнанню (фарбувальні камери, сушильні печі тощо).

На практиці оптимальним підходом є створення комплексної системи з 3–4 шарів, у якій кожен компонент підсилює властивості іншого, утворюючи суцільну гідрофобну оболонку з високою адгезією до металу.

Залежно від характеру дії середовища, механічних навантажень та візуальних вимог, доцільно розділити кузов тролейбуса на три функціональні зони:

- зовнішня (атмосферна) — піддається дії ультрафіолету, опадів, реагентів;
- внутрішня (салонна) — під впливом вологості, температурних перепадів, конденсату;
- нижня (механічна) — контактує з вологою, брудом, піском і хімічними реагентами.

Рекомендовані системи для кожної зони наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Оптимальні антикорозійні системи покриттів для різних частин кузова тролейбуса

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3. Товщина шарів. Кожен шар слід контролювати магнітним товщиноміром. Відхилення не повинні перевищувати $\pm 10\%$ від заданого значення. Недотримання товщини призводить до передчасного руйнування покриття.

4. Полімеризація. Сушіння епоксидних та поліуретанових систем здійснювати при температурі 60–80 °C протягом 2 год або при кімнатній температурі не менше 24 годин.

5. Контроль якості. Після висихання перевірити покриття на відсутність дефектів — кратерів, патьоків, пухирців, а також провести тест адгезії згідно з ДСТУ ISO 2409:2015. Клас адгезії повинен бути не нижче 2.

6. Ремонтопридатність. У разі локального пошкодження допускається зачищення дефектної ділянки до металу з наступним нанесенням ґрунту та фінішного шару за тією ж технологією. Для великих площ рекомендовано часткове оновлення покриття після 8–10 років експлуатації.

Під час вибору покриттів необхідно враховувати екологічні обмеження та вимоги охорони праці. Перевагу слід віддавати системам на основі безсвинцевих пігментів і без ароматичних розчинників, які відповідають вимогам ДСТУ ISO 11890-2:2020 щодо вмісту летких органічних сполук (VOC).

Для робітників фарбувальних ділянок обов'язкове використання засобів індивідуального захисту (респіратор, рукавиці, захисний костюм). Вентиляційні системи мають забезпечувати не менше 10-кратного повітрообміну на годину.

Крім того, важливо забезпечити утилізацію залишків фарб і мастик згідно з ДСТУ 4462.3:2005. Розчинники після очищення інструменту повинні збиратись у герметичні ємності та передаватись для регенерації або спеціалізованої утилізації.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПРИ АНТИКОРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ

5.1. Аналіз шкідливих і небезпечних факторів при нанесенні покриттів

Процес антикорозійної обробки кузовів тролейбусів супроводжується низкою небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що впливають на працівників фарбувально-підготовчих дільниць і навколишнє середовище. Нанесення лакофарбових матеріалів передбачає використання летких органічних розчинників, полімерних смол, пігментів, затверджувачів та інших хімічно активних компонентів. Їхня дія може проявлятися як токсичний, вибухо-пожежонебезпечний або подразнюючий фактор, тому під час проведення робіт необхідно дотримуватись вимог чинних нормативів — ДСТУ 2293-99, ДНАОП 0.00-1.28-10, ДСП 201-97 та інших документів з охорони праці.

Основним джерелом шкідливих речовин у повітрі робочої зони є випаровування розчинників і затверджувачів з лакофарбових матеріалів. До найбільш небезпечних належать: ксилол, толуол, ацетон, бутанол, етилацетат, ізоціанати (у поліуретанових системах) та формальдегід (у фенольних смолах).

При перевищенні гранично допустимих концентрацій (ГДК) ці сполуки можуть викликати головний біль, запаморочення, подразнення слизових оболонок, зниження координації рухів і ураження дихальних шляхів. Наприклад, ГДК пари ксилолу становить 50 мг/м³, толуолу — 150 мг/м³, ацетону — 200 мг/м³ (згідно з ДСП 201-97). У звичайній фарбувальній камері без ефективної вентиляції ці значення можуть перевищуватись у 5–10 разів.

Особливу небезпеку становлять ізоціанати, які входять до складу поліуретанових фарб і лаків. Їхні пари подразнюють слизові оболонки, можуть

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

спричиняти алергічні реакції та бронхіальні спазми. У разі тривалого впливу можливі хронічні захворювання дихальної системи, тому під час робіт із такими компонентами необхідно використовувати фільтрувальні респіратори класу не нижче FFP3 і проводити роботи лише у камерах із примусовою припливно-витяжною вентиляцією.

До фізичних небезпечних факторів під час нанесення покриттів належать:

- підвищена температура та вологість повітря у фарбувальній камері (до 35–40 °С);
- наявність електростатичного поля під час електростатичного розпилення фарб;
- шум від компресорів і вентиляційних установок (до 85 дБ);
- ультрафіолетове випромінювання при сушінні покриттів;
- небезпека ураження електричним струмом при роботі з фарбопультами високої напруги (до 60 кВ).

Для усунення цих факторів передбачаються:

- вентиляційні системи з кратністю повітрообміну не менше 10–15 разів на годину;
- теплоізоляція та автоматичне регулювання температури в камерах;
- застосування шумопоглинальних екранів і засобів індивідуального захисту слуху (навушники, вкладиші);
- заземлення фарбувального обладнання й обов'язкове використання антистатичного взуття.

Більшість лакофарбових матеріалів є легкозаймистими рідинами (ЛЗР) з температурою спалаху 25–45 °С. Пари ацетону, ксилолу, толуолу утворюють із повітрям вибухонебезпечні суміші. Найбільш небезпечна зона — фарбувальні камери, де концентрація парів може перевищувати нижню межу вибуховості (НМВ). Для запобігання загорянню необхідно дотримуватись таких вимог:

- заборонено використання відкритого полум'я, іскор, нагрівальних приладів у межах 20 м від зони фарбування;

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

- вентиляційні системи повинні мати вибухозахищені вентилятори та електродвигуни;
- освітлення має виконуватися у вибухобезпечному виконанні (категорія В-1а);
- фарбувальні kabіни обладнуються автоматичними системами пожежогасіння (водяними або порошковими).

Додатково необхідно регулярно проводити контроль концентрації парів розчинників за допомогою газоаналізаторів, а також щоквартальне очищення фільтрів вентиляції від фарбового пилу.

Під час очищення, шліфування та знежирення деталей можливе забруднення шкіри агресивними розчинами та пилом, що спричиняє дерматити й алергічні реакції. Робочі повинні використовувати захисні рукавички, спецодяг і окуляри. Не допускається перебування в камері без захисних засобів навіть короткочасно.

Також слід враховувати ергономічні фактори — тривале перебування у вимушеній позі, статичне навантаження на опорно-руховий апарат і зорове напруження при контролі якості покриття. Рекомендується організація раціонального робочого місця, перерви через кожні 1,5–2 години, використання підйомних механізмів для важких деталей.

Безпечні умови праці забезпечуються дотриманням вимог таких нормативних документів:

- ДНАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час нанесення лакофарбових покриттів;
- ДСТУ ISO 45001:2019 – Система управління охороною здоров'я та безпекою праці;
- ДСН 3.3.6.042-99 – Гігієнічні вимоги до мікроклімату виробничих приміщень;
- ДБН В.1.1-7:2016 – Пожежна безпека об'єктів промисловості.

Контроль стану повітряного середовища здійснюють щоквартально

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

методом газоаналізу, а рівні шуму, освітленості та вібрації — не рідше одного разу на рік. Результати фіксуються у журналі охорони праці та доводяться до працівників під час інструктажів.

Проведений аналіз показав, що під час нанесення антикорозійних покриттів на тролейбуси наявні всі основні групи небезпечних факторів: хімічні, фізичні, пожежні, біологічні та ергономічні. Найвищу потенційну небезпеку становлять пари органічних розчинників і ізоціанатів, які вимагають герметизації камер, вентиляції та засобів індивідуального захисту.

Дотримання технологічних параметрів, контроль концентрації шкідливих речовин, правильна організація робочого процесу та системна профілактика (інструктаж, медогляд, моніторинг повітря) дозволяють суттєво знизити ризики та забезпечити безпечні умови праці персоналу.

5.2. Засоби індивідуального захисту працівників

Під час проведення антикорозійних робіт на кузовах тролейбусів працівники зазнають впливу шкідливих речовин, а також фізичних, термічних та механічних факторів. Для запобігання негативній дії цих чинників застосовують засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), що забезпечують ізоляцію органів дихання, шкіри, очей і слуху від небезпечних речовин. Використання ЗІЗ є обов'язковою вимогою чинного законодавства — відповідно до Закону України “Про охорону праці”, ДНАОП 0.00-4.26-96 та НПАОП 0.00-1.28-10.

Під час фарбування, знежирення або роботи з розчинниками у повітрі робочої зони можуть утворюватися токсичні пари ксилолу, толуолу, ацетону, а також частки лакофарбового пилу. Для захисту органів дихання використовуються фільтрувальні респіратори, що відповідають вимогам ДСТУ EN 149:2017.

Рекомендовано застосовувати такі типи:

- Респіратори типу FFP2 або FFP3 – при розпиленні фарб, полімерних

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

смола, ізоціанатів;

- Респіратори з активованим вугіллям (тип РУ-60М, У-2К) – при роботі з розчинниками та парами органічних сполук;

- Шлангові або ізолювальні протигази типу ПШ-1 – при виконанні робіт у закритих камерах або місцях з підвищеною концентрацією парів.

Заміна фільтрувальних елементів проводиться не рідше ніж через 40 годин активної роботи або при появі запаху розчинника під маскою.

Шкіра рук і обличчя піддається дії агресивних компонентів (розчинники, затверджувачі, фосфатні склади). Для її захисту використовують:

- спецодяг із антистатичної тканини з поліестеровим покриттям, стійкої до проникнення фарбових матеріалів;

- захисні рукавички з нітрилу, латексу або поліуретану, що відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 374-1:2019;

- захисні креми (бар'єрні пасти) типу «Cilindro», «Бар'єр-2» для запобігання подразненню шкіри;

- фартухи з полівінілхлориду (ПВХ) при роботі з великими об'ємами розчинників або при митті деталей.

Рукавички слід замінювати після кожної зміни або при появі ознак руйнування. Забороняється використання бавовняних рукавичок під час контакту з ЛЗР, оскільки вони швидко насичуються хімічними речовинами.

При розпиленні фарб і лаків можливе потрапляння аерозольних частинок у очі, що призводить до опіків рогівки та подразнення слизових оболонок. Для запобігання цьому використовують:

- захисні окуляри закритого типу з вентиляційними клапанами;

- щитки для обличчя із прозорого полікарбонату при роботі з електростатичними фарбопультами;

- маски комбінованого типу, які одночасно захищають обличчя й органи дихання.

Окуляри повинні мати антизапітніюче покриття і щільно прилягати до

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

обличчя. Всі засоби захисту очей мають відповідати вимогам ДСТУ EN 166:2017.

Під час роботи компресорів, сушильних камер і вентиляційних систем рівень шуму може сягати 80–90 дБ, що перевищує гранично допустимі норми. Для зниження акустичного навантаження використовують:

- вкладиші (беруші) зі спіненого поліуретану;
- протишумові навушники типу SNR-25–35 дБ;
- комбіновані шоломи з вбудованими навушниками для операторів фарбувальних камер.

Відповідно до ДСН 3.3.6.037-99, тривале перебування в зоні шуму понад 85 дБ без захисту не допускається.

При фарбуванні електростатичним методом обов'язковим є використання антистатичного взуття, яке має питомий опір не більше 10^6 Ом. Таке взуття запобігає накопиченню заряду, що може спричинити іскріння й займання парів розчинників. Крім того, робітники повинні носити спецвзуття з поліуретановою або нітрильною підошвою, стійкою до хімікатів і масел, що відповідає вимогам ДСТУ EN ISO 20345:2019.

1. Видача засобів індивідуального захисту здійснюється згідно з Типовими нормами безплатної видачі спецодягу та ЗІЗ (Наказ МНС № 62 від 29.04.2011).

2. Працівники повинні проходити навчання та інструктаж із правильного користування засобами захисту перед початком роботи.

3. Всі ЗІЗ підлягають регулярній дезінфекції, перевірці цілісності та маркуванню.

4. Пошкоджені або забруднені ЗІЗ повинні негайно замінюватись.

5. Для персоналу передбачено спеціальні шафи для зберігання чистого й використаного одягу окремо, а також санітарні душові з милом і нейтралізуючими засобами.

Застосування належних засобів індивідуального захисту є ключовою

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умовою безпечного виконання антикорозійних робіт. Найважливішими є засоби для захисту органів дихання, адже саме пари розчинників становлять найбільшу небезпеку для здоров'я працівників. Додатково необхідно забезпечити повний комплекс ЗІЗ — рукавички, спецодяг, окуляри, навушники та антистатичне взуття. Систематичний контроль, своєчасна заміна засобів і навчання персоналу гарантують дотримання вимог охорони праці та суттєво знижують ризик професійних захворювань.

5.3. Екологічні вимоги до лакофарбових матеріалів

У процесі антикорозійної обробки кузовів тролейбусів значний вплив на довкілля справляють викиди летких органічних сполук (ЛОС), токсичних парів розчинників, відходи лакофарбових матеріалів та промивних розчинів. Тому одним із найважливіших напрямів підвищення екологічної безпеки є використання екологічно безпечних матеріалів і технологій, які відповідають вимогам національних та міжнародних стандартів — ДСТУ ISO 11890-2:2020, ДСТУ ISO 14001:2015, ДСТУ EN 13438:2014.

Метою цього підпункту є визначення основних екологічних критеріїв при виборі лакофарбових матеріалів, оцінка рівня впливу на довкілля та рекомендації щодо зменшення токсичних і шкідливих викидів у виробничому процесі.

Традиційні фарби, що використовуються в транспортному машинобудуванні, містять від 40 до 70 % органічних розчинників, серед яких найпоширеніші — ксилол, толуол, бутанол, ацетон. У процесі нанесення й сушіння вони випаровуються, утворюючи в повітрі леткі органічні сполуки, які беруть участь у фотохімічних реакціях і сприяють утворенню смогу. Крім того, вони токсичні для людини та шкідливо впливають на озоновий шар. Для зменшення впливу на довкілля сучасні підприємства переходять до застосування фарб і лаків на водній або безрозчинниковій основі, у яких

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частка ЛОС не перевищує 10–15 %. Зокрема, водно-дисперсійні акрилові, епоксидні та поліуретанові системи показали високу ефективність у транспортному машинобудуванні.

Використання водорозчинних систем дає змогу:

- знизити викиди шкідливих речовин у 5–6 разів;
- зменшити ризик вибухів і пожеж;
- покращити умови праці персоналу;
- спростити утилізацію відходів.

Згідно з ДСТУ ISO 11890-2:2020, гранично допустимий вміст летких органічних сполук (VOC) для лакофарбових матеріалів промислового призначення не повинен перевищувати 420 г/л, а для водних систем — 150 г/л.

При виборі фарб слід урахувати не лише концентрацію розчинників, а й токсичність пігментів, наповнювачів і затверджувачів. У багатьох старих рецептурах застосовувались свинцеві, кадмієві та хромові сполуки (Cr^{6+}), які є канцерогенами. Сучасні норми Директиви ЄС 2004/42/ЄС та національних стандартів забороняють використання таких компонентів у промислових покриттях.

Сьогодні виробники переходять на екологічно безпечні пігменти — оксиди заліза, діоксид титану, цинкові фосфати, органічні барвники. Замість токсичних фосфатів хрому застосовують цинкфосфатні антикорозійні пігменти, що не містять важких металів, але зберігають високі захисні властивості.

Додатково рекомендується використовувати біоциди нового покоління, які не виділяють формальдегід і не накопичуються в навколишньому середовищі. Такі матеріали сертифікуються за стандартом ISO 14024 (екологічне маркування типу I), що підтверджує їхню екологічну безпечність.

Для досягнення екологічних показників у процесі антикорозійного фарбування необхідно не лише обирати екологічні матеріали, а й упроваджувати технологічні заходи з мінімізації викидів і відходів:

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1. Рециркуляція повітря і очищення газів. Вентиляційні системи фарбувальних камер повинні бути оснащені фільтрами адсорбційного типу (вуглецевими або цеолітовими), які уловлюють до 95 % парів розчинників.

2. Використання замкнених циклів очищення інструменту. Промивання пістолетів та шлангів здійснюється у герметичних станціях з фільтрацією і регенерацією розчинника. Це дозволяє скоротити втрати до 30 %.

3. Раціоналізація процесу нанесення. Перехід на електростатичне розпилення або безповітряне нанесення знижує втрати фарби в повітря до 5–10 %, тоді як традиційні пневматичні методи втрачають до 40 %.

4. Контроль товщини шару. Надмірне нанесення лакофарбового матеріалу призводить до перевитрат сировини та збільшення випаровувань розчинників. Використання автоматичних товщиномірів дає змогу оптимізувати витрати.

5. Використання енергоефективних сушильних камер. Сучасні камери з інфрачервоним або конвекційним підігрівом зменшують споживання енергії на 20–25 % і забезпечують рівномірну полімеризацію без перегрівання покриття.

Усі лакофарбові матеріали, що застосовуються у виробництві транспортних засобів, повинні проходити екологічну сертифікацію за системою УкрСЕПРО або ISO 14024. Сертифікація включає перевірку:

- токсичності компонентів і продуктів полімеризації;
- рівня ЛОС;
- наявності шкідливих домішок (свинець, кадмій, формальдегід, фенол);
- відповідності гігієнічним нормативам ДСП 201-97.

Підприємства, які виконують антикорозійне фарбування, повинні впроваджувати систему екологічного менеджменту відповідно до ДСТУ ISO 14001:2015, що передбачає:

- моніторинг викидів і відходів;
- регулярне оновлення технологій з урахуванням екологічних вимог;

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

- ведення екологічного паспорта підприємства;
- навчання персоналу з питань екологічної безпеки.

Дотримання цих принципів не лише зменшує негативний вплив на довкілля, а й сприяє отриманню екологічного маркування продукції, що підвищує конкурентоспроможність підприємства.

Екологічні вимоги до лакофарбових матеріалів є важливим елементом сталого розвитку виробництва транспортних засобів. Основними напрямками екологізації антикорозійних процесів є:

- перехід до водорозчинних і безрозчинникових систем із мінімальним вмістом ЛОС;
- відмова від токсичних пігментів і сполук важких металів;
- використання замкнених циклів очищення та фільтрації повітря;
- впровадження екологічного менеджменту ISO 14001 для контролю викидів і утилізації відходів.

Реалізація зазначених заходів дозволяє скоротити викиди органічних сполук у атмосферу на 60–70 %, покращити умови праці, а також знизити екологічні платежі підприємства. Це робить процес антикорозійного фарбування не лише безпечнішим, а й економічно вигідним.

5.4. Утилізація відходів і заходи щодо зниження шкідливих викидів

Під час антикорозійної обробки кузовів тролейбусів утворюється значна кількість відходів лакофарбових матеріалів, промивних розчинів, металевого пилю, абразивів, фільтрувальних елементів і повітряних викидів, які можуть становити екологічну небезпеку. Раціональна утилізація та зниження шкідливих викидів є обов'язковими вимогами до будь-якого виробничого підприємства відповідно до Закону України “Про відходи”, Закону “Про охорону навколишнього природного середовища”, а також до ДСТУ ISO 14001:2015 та ДСП 201-97.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

дистиляційні установки, де шляхом випаровування й конденсації розчинники повертаються у виробничий цикл.

Використання регенераційних систем дозволяє:

- зменшити споживання первинних розчинників на 60–70 %;
- скоротити викиди летких органічних сполук у атмосферу;
- знизити витрати на утилізацію токсичних відходів.

Для невеликих підприємств доцільним є кооперування з ліцензованими утилізаційними центрами, які здійснюють регенерацію розчинників централізовано.

Відповідно до Наказу Міндовкілля № 541 від 08.09.2021, облік відходів здійснюється у Журналі обліку утворення, оброблення та утилізації відходів, а передача здійснюється за актами приймання-передачі з зазначенням класу небезпеки.

Для зниження концентрації шкідливих викидів у повітря фарбувальні камери обладнуються багатоступневими системами очищення повітря, які включають:

1. Механічну фільтрацію — уловлювання частинок пилу, фарбового аерозолу (ефективність 70–80 %).
2. Адсорбційне очищення — фільтрація через активоване вугілля або цеолітові сорбенти (ефективність до 95 %).
3. Каталітичне або термічне допалювання — окислення залишкових парів розчинників при температурі 700–800 °С.

У сучасних системах застосовується рециркуляційна схема, за якою очищене повітря частково повертається у виробниче приміщення, що знижує енерговитрати на вентиляцію.

Крім того, контроль рівня ЛОС у повітрі здійснюється газоаналізаторами типу GX-4 або MultiRAE, які сигналізують про перевищення гранично допустимих концентрацій.

Для мінімізації кількості твердих відходів застосовуються такі

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

організаційно-технологічні заходи:

- Раціональне дозування матеріалів – точне вимірювання кількості фарби для уникнення залишків;
- Перехід на багаторазові фільтрувальні елементи – замість одноразових паперових;
- Використання екоупаковки – металевих або полімерних каністр, придатних до повторного використання;
- Сортування відходів на місці – окреме збирання лакофарбових, металевих і побутових відходів;
- Зберігання у герметичних контейнерах – із відповідним маркуванням згідно з ГОСТ 19433-88.

На підприємствах електротранспорту доцільно створити тимчасові пункти накопичення відходів, обладнані водонепроникним покриттям і навісом, щоб запобігти потраплянню шкідливих речовин у ґрунт і стічні води.

Стічні води, що утворюються під час миття деталей і обладнання, можуть містити залишки фарб, масел і розчинників. Для їх очищення застосовуються:

- механічні фільтри для видалення твердих частинок;
- флотаційні установки для видалення органічних домішок;
- сорбційні колонки з активованим вугіллям;
- коагуляція солями алюмінію або заліза для осадження емульгованих частинок.

Після очищення вода може використовуватись повторно в технічному циклі. Стічні води повинні відповідати вимогам ДСанПіН 2.2.7.029-99 та не перевищувати такі показники:

- концентрація нафтопродуктів — до 0,3 мг/л;
- летких органічних сполук — до 0,1 мг/л;
- завислих речовин — до 3 мг/л.

Для контролю дотримання екологічних норм на підприємствах

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

антикорозійного профілю повинна функціонувати система екологічного моніторингу, яка включає:

- щоквартальний аналіз повітря, води й відходів у сертифікованих лабораторіях;
- ведення екологічного паспорта підприємства, де фіксуються всі види відходів, викидів і споживання ресурсів;
- періодичне навчання персоналу з питань екологічної безпеки;
- використання енергозберігаючих технологій для сушіння й очищення повітря.

Ефективність системи підтверджується зменшенням питомих обсягів викидів на одиницю продукції щонайменше на 10 % щороку, що відповідає принципам ISO 14001 щодо постійного поліпшення екологічних показників.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі виконано комплексне дослідження корозійних процесів у конструкційних матеріалах тролейбусів та розроблено рекомендації щодо вибору, технології нанесення й експлуатації ефективних антикорозійних покриттів. Проведено аналіз фізико-хімічних механізмів руйнування металів, досліджено вплив умов експлуатації на розвиток корозії, визначено властивості сучасних захисних матеріалів та оцінено їх ефективність у лабораторних і натурних умовах.

У результаті аналізу конструкційних матеріалів, що застосовуються у тролейбусобудуванні, встановлено, що основним матеріалом кузовних елементів є низьковуглецева сталь марок Ст3, 08кп, а також алюмінієві сплави типу АМц та дюралюмінії. Найбільш корозійно-небезпечними зонами тролейбуса є нижня частина кузова (пороги, арки коліс, днище), де спостерігається постійний контакт із вологою, реагентами та механічними домішками.

Доведено, що основними типами руйнувань є атмосферна, контактна, електрохімічна та щілинна корозія. Умови міської експлуатації сприяють інтенсифікації корозійних процесів, особливо в зимовий період при використанні дорожніх солей. Встановлено, що відсутність або низька якість антикорозійного покриття призводить до втрати до 0,2–0,3 мм металу на рік, що вдвічі скорочує строк служби кузова.

У другому розділі обґрунтовано закономірності процесу корозії з позицій електрохімічної теорії. Показано, що виникнення корозії є результатом утворення гальванічних мікропар між зонами різної електродної активності. Для зниження швидкості руйнування застосовуються методи пасивації, легування металів, електрохімічного захисту та нанесення захисних покриттів.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Досліджено структуру й властивості основних типів покривних матеріалів — епоксидних, поліуретанових, акрилових, мастикових і фосфатних. Встановлено, що найвищу адгезію (до 4,5 МПа) забезпечують епоксидні ґрунти, а найкращу еластичність (відносне видовження до 30 %) — полімер-мастикові покриття. Оптимальна товщина системи покриття становить 180–250 мкм.

Проведено експериментальні випробування корозійної стійкості різних покриттів у камері соляного туману, кліматичних камерах і в умовах експлуатації. Результати засвідчили, що епоксидно-мастикові та епоксидно-поліуретанові системи демонструють найвищу ефективність.

Після 1000 годин у соляному тумані площа ураження металу для епоксидно-мастикової системи становила лише 3 %, тоді як для фосфатно-акрилової — понад 30 %. У кліматичних камерах ці покриття показали стабільність кольору, блиску та структури плівки. Експлуатаційні тести підтвердили збереження понад 80 % захисних властивостей після року інтенсивної роботи у міських умовах.

На основі розробленої методики визначено прогнозований термін служби кузова тролейбуса залежно від типу антикорозійної системи.

- Для епоксидно-мастикового покриття – 12–13 років;
- Для епоксидно-поліуретанового – 10–11 років;
- Для фосфатно-акрилового – 4–5 років.

Проведені розрахунки з використанням коефіцієнтів старіння підтвердили, що багатошарові системи зберігають 80–85 % початкової ефективності навіть після 10 років експлуатації. Це дозволяє продовжити термін служби кузова тролейбуса до 15 років при періодичному оновленні верхнього шару.

Розроблено оптимальну структуру багатошарової антикорозійної системи для кузова тролейбуса:

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- зовнішні панелі — епоксидний ґрунт + поліуретанова емаль + лаковий шар (загальна товщина 200–220 мкм);
- внутрішні елементи — фосфатно-акрилове покриття (90–100 мкм);
- нижня частина кузова — епоксидний ґрунт + каучукова мастика (до 300 мкм).

Така комбінація забезпечує стійкість до механічних навантажень, вологості, ультрафіолету та дорожніх реагентів. Собівартість системи на 1 м² становить орієнтовно 250–300 грн, що в кілька разів нижче вартості капітального ремонту кузова.

Встановлено, що процеси фарбування та обробки кузова супроводжуються виділенням парів органічних розчинників, які можуть перевищувати гранично допустимі концентрації у 5–10 разів. Для зменшення шкідливого впливу запропоновано:

- впровадження системи припливно-витяжної вентиляції з кратністю повітрообміну 10–15 разів/год;
- використання респіраторів FFP3, антистатичного спецодягу та захисних окулярів;
- застосування водорозчинних або безрозчинникових фарб із вмістом ЛОС менше 150 г/л;
- регенерацію відпрацьованих розчинників та замкнені цикли очищення стічних вод;
- створення системи екологічного моніторингу згідно з ISO 14001.

Запропоновані заходи дозволяють знизити викиди летких органічних сполук на 60–70 % і суттєво поліпшити умови праці.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – К.: Мінекономрозвитку України, 2015.
2. ДСТУ ISO 12944-1:2019. Фарби та лаки. Захист сталевих конструкцій від корозії за допомогою систем покриттів. Частина 1. Загальні положення. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
3. ДСТУ ISO 11890-2:2020. Фарби та лаки. Визначення вмісту летких органічних сполук. Частина 2. Газохроматографічний метод. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2020.
4. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2015.
5. ДСТУ EN 149:2017. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтрувальні півмаски проти часток. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
6. ДСТУ EN ISO 374-1:2019. Рукавички захисні від небезпечних хімічних речовин. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
7. ДСТУ EN ISO 20345:2019. Взуття захисне. Основні вимоги. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
8. ДСТУ EN 166:2017. Засоби індивідуального захисту очей. Загальні технічні вимоги. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
9. ДСТУ ISO 9227:2021. Корозія металів і сплавів. Випробування в соляному тумані. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2021.
10. ДСТУ 9.032–74. Єдина система захисту від корозії і старіння. Методи випробувань на довговічність. – К.: Держстандарт СРСР, 1974.
11. ДСТУ 9.308–85. Методи кліматичних випробувань лакофарбових покриттів. – М.: Стандартінформ, 1985.
12. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів промисловості. – К.: Мінрегіонбуд України, 2016.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. ДСП 201-97. Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони. – К.: МОЗ України, 1997.

14. ДНАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час нанесення лакофарбових покриттів. – К.: Держгірпромнагляд України, 2010.

15. ДК 005-96. Класифікатор відходів. – К.: Держстандарт України, 1996.

16. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». – Відомості Верховної Ради України, 1991, № 41.

17. Закон України «Про відходи» № 187/98-ВР від 05.03.1998. – Відомості Верховної Ради України, 1998, № 36–37.

18. Черненко В. Г. Практичні аспекти протикорозійного захисту автомобільних кузовів. – Львів: НУЛП, 2021. – 184 с.

19. Назаренко І. П. Лакофарбові матеріали і покриття транспортних засобів. – Харків: ХНАДУ, 2020. – 212 с.

20. Кисельов В. І. Технологія захисту металів у машинобудуванні. – К.: Либідь, 2019. – 256 с.

21. Мельник О. В. Екологічна безпека промислових підприємств. – Київ: НАУ, 2020. – 240 с.

22. Бондаренко А. В. Методи антикорозійного захисту металів. – Харків: Основа, 2018. – 168 с.

23. Гнатюк О. С., Демченко С. П. Дослідження ефективності полімерних покриттів у транспортному машинобудуванні // Вісник ХНАДУ. – 2021. – № 3. – С. 45–51.

24. Кравець В. О. Антикорозійні системи в машинобудуванні: навчальний посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 176 с.

25. Печериця В. І. Лакофарбові матеріали і технології нанесення покриттів. – Київ: Вища школа, 2019. – 232 с.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

26. Мороз Т. В., Кулик Л. О. Вплив експлуатаційних факторів на корозійну стійкість транспортних засобів // Науковий вісник НУХТ. – 2022. – № 5. – С. 88–94.

27. Підпригора О. В., Лавренко С. А. Методи випробувань антикорозійних покриттів у соляному тумані // Матеріалознавство. – 2020. – Т. 27, № 2. – С. 32–38.

28. Directive 2004/42/EC of the European Parliament and of the Council on the limitation of emissions of volatile organic compounds due to the use of organic solvents in paints and varnishes. – Brussels, 2004.

29. ISO 14024:2018. Environmental labels and declarations — Type I environmental labelling — Principles and procedures. – Geneva: ISO, 2018.

30. ASTM D610-19. Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces. – ASTM International, 2019.

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ДОДАТОК

					КРММТВА 25.24366.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		