

Хмельницький національний університет  
Факультет технологій і дизайну  
Кафедра хімії та хімічної інженерії

### КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

#### ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ НАНОПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ ЗАХИСТУ КУЗОВА АВТОМОБІЛЯ

Рівень вищої освіти	<u>другий (магістерський)</u>
Галузь знань	<u>16 Хімічна інженерія та біоінженерія</u>
Спеціальність	<u>161 Хімічні технології та інженерія</u>
Освітня програма	<u>«Хімічні технології та інженерія»</u>

Шифр КвРХТІ.024169.01.05.ПЗ

Виконав здобувач 2 курсу, група ХТІм-24-1  Валерій ЦІЛІНСЬКИЙ

Підпис


Керівник доктор техн. наук, професор  Ольга ПАРАСКА

Підпис

Нормоконтролер  Олександр СТРЕМЕЦЬКИЙ

Підпис

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри хімії та хімічної інженерії  Ольга ПАРАСКА

Підпис

19 грудня 2025 р.

Хмельницький 2025

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему: Оцінка ефективності нанополімерних покриттів у технологіях захисту кузова автомобіля.

Автор роботи – здобувач групи ХТІм-24-1

Валерій ЦІЛІНСЬКИЙ

Керівник роботи – д. т. н, професор

Ольга ПАРАСКА

Обсяг магістерської роботи 72 сторінки, таблиць 6, рисунків 10, джерел посилання 43, графічної частини слайдів виконаних у програмі презентації.

Ключові слова: нанополімерне покриття, руйнування кузова авто, лакофарбове покриття кузова, корозія.

Мета кваліфікаційної роботи – оцінити ефективність різних видів нанополімерних покриттів у захисті кузова автомобіля від механічного, корозійного, ультрафіолетового та хімічного впливу.

Об'єкт дослідження – технології нанополімерного захисту поверхні покриття кузова.

Предмет дослідження – нанополімерні захисні покриття.

Визначено чинники, які впливають на руйнування лакофарбового покриття кузова автомобіля. Визначено критерії та методи перевірки ефективності нанополімерних покриттів. Здійснено випробування трьох нанополімерних покриттів на зразках автомобільної лакофарбової системи та визначено значення основних показників. Обґрунтовано та розраховано інтегральний показник та сформувано практичні рекомендації щодо вибору покриття й регламенту догляду.

Здобувач групи ХТІм-24-1

Валерій ЦІЛІНСЬКИЙ

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....	2
ВСТУП.....	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАХИСТУ КУЗОВА АВТОМОБІЛЯ НАНОПОЛІМЕРНИМИ ПОКРИТТЯМИ .....	7
1.1 Чинники, що викликають руйнування кузова автомобіля .....	7
1.2 Сутність та класи захисних нанополімерних покриттів .....	11
1.2.1 Силоксанові та силіцієвмісні покриття .....	12
1.2.2 Фторполімерні покриття .....	13
1.2.3 Гібридні нанополімерні системи .....	14
1.3 Критерії оцінки ефективності захисних покриттів .....	16
2 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАНОПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ .....	23
2.1 Характеристики досліджуваних покриттів .....	23
2.2 Зразки матеріалів для випробування.....	28
2.3 Технологічні карти для нанесення покриттів .....	32
2.3.1 Технологічна карта нанесення Покриття А (силоксаново-керамічне покриття).....	33
2.3.2 Технологічна карта нанесення Покриття Б (фторполімерне покриття)...	35
2.3.3 Технологічна карта нанесення Покриття В (гібридне покриття) .....	36
2.3.4 Моделювання порушення регламенту.....	37
2.4 Методики вимірювання показників ефективності .....	37
2.4.1 Статистична обробка результатів.....	44
2.4.2 Підготовка даних до інтегральної оцінки .....	45

3 АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИПРОБУВАНЬ НАНОПОКРИТТІВ РІЗНИХ ТИПІВ .....	48
3.1 Результати випробувань покриттів А, Б, В.....	48
3.2 Інтегральна оцінка ефективності покриттів.....	56
3.3 Практичні рекомендації щодо вибору та застосування нанополімерних покриттів .....	60
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	67

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

УФ - ультрафіолет;

ПАР - поверхнево-активна речовина;

ЛФП – лакофарбове покриття;

ЛФС – лакофарбова система

## ВСТУП

Кузов автомобіля працює в умовах постійного агресивного середовища. Волога, дорожні солі (хлориди), пил і пісок, перепади температури, ультрафіолетове випромінювання, а також контакт із паливно-мастильними матеріалами й мийною хімією руйнують лакофарбове покриття. Це руйнування відбувається одночасно по кількох напрямках.

По-перше, корозія, вода з розчиненими солями утворює електроліт на поверхні металу. У місцях сколів, мікротріщин і подряпин запускається локальна електрохімічна корозія, що підриває лак з середини.

По-друге, абразивний знос, пісок і пил діють як дрібний абразив, а механічні мийки й неправильне ручне миття залишають мікроподряпини (завихрені сліди), які роблять лак матовим і відкривають шляхи для проникнення вологи.

По-третє, УФ-старіння, сонячне випромінювання руйнує полімерну структуру прозорого лаку: з'являється блиск, з'являється помутніння, зміцнює колір.

По-четверте, термоцикли нагрів–охолодження та замерзання–відтавання викликають мікротріщини й розшарування лаку.

По-п'яте, хімічне навантаження (солі, ПАР, лужні й кислотні реагенти) розщеплюють верхній шар покриття, прискорюючи втрату глянцею.

Традиційні засоби догляду, зокрема віск, має обмежений ресурс. Фактично він не зупиняє розвиток корозії, а лише тимчасово покращує вигляд. У сучасних умовах експлуатації (зимові реагенти, щільний трафік, часте миття) цього недостатньо.

Саме тому зростає інтерес до нанополімерних покриттів, які позиціонують як керамічне або нанозахист, що формують тонку плівку на поверхні лаку, підвищують мікротвердість верхнього шару, зменшують змочуваність і забезпечують стійкість до проникнення вологи та солі.

Вони одночасно зберігають блиск фарби, зменшують чутливість до мікроподряпин і відтягують появу корозійних дефектів. Проблема виникає в тому,

що ринок насичений продуктами з різною хімічною природою (силоксанові, силіційовмісні, фторполімерні, гібридні), але для споживача їх реальну ефективність описують лише маркетинговими формулами твердість 9H, самоочищення, ресурс 5 років, без єдиного критерію порівняння.

Тому метою кваліфікаційної роботи є оцінити ефективність нанополімерних покриттів у захисті кузова автомобіля від механічного, корозійного, УФ та хімічного впливу.

Для досягнення мети необхідно виконати таке завдання:

- проаналізувати фактори деградації кузова та вимоги до захисного шару;
- класифікувати поширені типи нанополімерних покриттів і принцип їх дії;
- визначити критерії ефективності застосування нанополімерних покриттів (адгезія, твердість, кут змочування, стійкість до сольового туману, УФ-стабільність збереження, блиску) і побудувати інтегральний показник ефективності.

Об'єкт дослідження – технології нанополімерного захисту поверхні покриття кузова.

Предмет дослідження – нанополімерні захисні покриття.

Наукова новизна роботи виникає у запровадженні інтегрального показника ефективності нанополімерного покриття, який комплексно враховує його фізико-хімічні, оптичні, корозійні властивості та доповнює їх економічним чинником - орієнтовною вартістю захисту в розрахунку на строк служби покриття.

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані для обґрунтованого вибору типу захисного покриття в реальних сервісних умовах.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАХИСТУ КУЗОВА АВТОМОБІЛЯ НАНОПОЛІМЕРНИМИ ПОКРИТТЯМИ

## 1.1 Чинники, що викликають руйнування кузова автомобіля

Кузов автомобіля є багатошаровою системою, в якій металеву основу (сталь або алюмінієві сплави) захищає комплекс лакофарбового покриття (нижній та верхній шари фарби, прозорий лак) (рисунок 1.1), що працює як бар'єр від механічних, хімічних та кліматичних впливів [1; 3; 4; 6].



Рисунок 1.1 – Багатошарова система покриття кузова автомобіля

Порушення цілісності, хоча б одного елементу цієї системи запускає прискорене руйнування всієї поверхні кузова. Важливо підкреслити, що руйнування не є одномоментним – це тривалий процес, який складається з корозійних явищ, абразивного зносу, фотоокиснення (старіння під дією ультрафіолету), термічного розтріскування, дії агресивних реагентів і залишкових напружень, що постійно присутні в кузові під час експлуатації [1; 3]. Таким чином, кузов автомобіля можна розглядати як об'єкт, який безперервно перебуває у стані руйнування, навіть у видимих нормальних умовах щоденної їзди (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Чинники, які впливають на поверхню кузова автомобіля

Одним із головних факторів руйнування кузова автомобіля є електрохімічна корозія [1; 10]. У класичному випадку для сталевих елементів кузова короза розвивається за рахунок утворення локальних гальванічних пар у присутності електроліту. У ролі такого електроліту в реальних дорожніх умовах виступає волога з розчиненими солями, зокрема хлоридами, які застосовуються як протиожеледні реагенти. Процес зазвичай починається в місцях, де захисний лакофарбовий шар уже пошкоджено: це сколи від дрібних камінців, краю арки, нижні кромки дверей, зони біля коліс та днище. Вода, що містить солі, проникає через мікрodefект лаку, накопичується в порах або мікротріщинах і виступає провідником іонів. Результат – локальна поява підплівкових пухирців іржі, подальше відшарування лаку по краях дефекту.

Для сучасних кузовів, в яких використовують алюмінієві елементи (капот, крила, дверні вставки), характерна також корозія алюмінієвих сплавів, що проявляється не стільки у вигляді традиційної іржі, скільки у вигляді локального пухиріння та побіління зони під лаком. Алюміній у нормі захищають тонкою оксидною плівкою, але при наявності агресивних іонів (хлоридів) і механічних пошкоджень ця плівка руйнується, а під покриттям утворюється підплівкова корозія. Якщо алюмінієвий елемент контактує зі сталевим кріпленням або вставкою, виникає мікрогальванічна пара, де менш шляхетний метал швидше руйнується. На практиці це означає, що навіть незначний скол лаку на алюмінієвих

деталях може через певний час перерости в підняття лаку, який є добре помітним і практично не піддається локальному косметичному ремонту без перефарбування.

Другий провідний фактор – абразивний знос і мікропошкодження поверхні [3; 4; 11]. Під час руху автомобіля кузов постійно піддають ударам твердих частинок (пісок, пил, дрібний щебінь, продукти зносу гальмівних колодок інших авто). Крім того, якщо ці частини не пробивають лакофарбове покриття до металу, вони руйнують верхній прозорий шар лаку мікрорисками. Додатковим джерелом пошкодження є ручне або автоматичне миття автомобіля. Нерегулярне використання жорстких щіток, брудних губок або текстилю з вкрапленим піском призводить до формування на лаку характерних концентричних мікропідряпин (голограма або завихрені сліди). Такі дефекти змінюють мікрорельєф поверхні: замість гладкої і рівномірно глянцевої плівки з'являється безліч дрібних борозенок. По-перше, це знижує візуальну привабливість. По-друге, критично важливо, що кожна мікроподряпина є каналом для наступних впливів – солі, агресивних складових мийних розчинів, УФ-випромінювання та інше. Тобто абразивний вплив не тільки псує зовнішній вигляд, а й прискорює подальшу корозію, тим самим полегшує доступ електроліту до металевої основи.

Третім напрямком негативного впливу на поверхню автомобіля є фотоокиснювальне старіння лакофарбового покриття під дією ультрафіолетового випромінювання [9; 11; 38]. Прозорий лак по своїй природі є полімерною плівкою, яка містить органічні зв'язки, чутливі до УФ. Під дією сонячного випромінювання (особливо у поєднанні з підвищеною температурою поверхні) відбувається руйнування цих зв'язків, внутрішньої еластичності й часткового пожовтіння або помутніння шару. Наслідок для власника автомобіля – зниження блиску, вицвітання кольору, поява зони тьмяності на горизонтальних панелях (капот, дах, багажник), які найбільше прогріваються [17; 36]. Крім оптичного ефекту, УФ-старіння небезпечне тим, що у виснаженому лаку відображається мікротріщина. Ці тріщини не завжди помітні на початкових етапах, але вони відкривають шлях волозі, кисню й забруднювачам до базової емалі та далі до металу.

Четвертий фактор – термічні та кліматичні навантаження [3; 4; 6]. Кузов

автомобіля постійно зазнає перепадів температури: нагрівання на сонці, охолодження під дощем, робота в умовах морозу, прогрівання двигуном, а взимку – ще й цикли замерзання та відтавання. Лакофарбове покриття й метал мають різні коефіцієнти теплового розширення. Коли температура змінюється різко (наприклад, гарячі авто під час миття обливаються холодною водою), у зоні межі лак-метал виникає напруження. За багато циклів таке напруження накопичується у вигляді сітки мікротріщин, локального відшарування прозорого лаку або кракелюрного ефекту (тонких розривів лаку). Додатково, узимку, вода яка вже проникла в подряпини або мікротріщину замерзає, і її додатковий об'єм буквально розсовує край дефекту. Таким чином, навіть якщо видимо кузов здається неушкодженим, на мікрорівні він може бути вже розтрісканим і розшарованим, що формує сприятливе середовище для розвитку корозії.

П'ятий напрямок руйнування пов'язаний із хімічними впливами. Кузов регулярно контактує з агресивними реагентами: дорожні протижеледні суміші, лужні та кислотні мийні суміші, залишки паливно-мастильних матеріалів, гальмівна рідина, сліди технічних оливо. Частина цих речовин (особливо лужні та сильнолужні активні піни для безконтактного миття нижньої частини кузова) здатна поступово розм'якшувати або деградувати верхній шар лаку, створюючи його сухим і матовим. Інші реагенти, навпаки, локально вимивають пластифікатори чи добавки, які забезпечують еластичність покриття. У результаті поверхня втрачає стійкість до подряпин і тріщин. Накопичувальний ефект тут особливо небезпечний: навіть якщо разовий контакт не дав помітного пошкодження, систематичне застосування неправильно підібраної хімії може призвести до прискорення старіння лаку, і це вже не повертається поліруванням без зняття значної частини шару.

Окремо слід відзначити дію дорожніх механічних факторів ударного характеру. При високій швидкості кузов отримує численні мікроудари дрібними фрагментами щебеню, продуктами абразивного зносу шин і дорожнім покриттям. У місцях таких ударів розміщені відкриті сколи, які доходять до обґрунтованості

або навіть до металу. Саме ці сколи часто стають відправною точкою розвитку корозії [10; 23; 29].

Таким чином руйнування кузова автомобіля є багатофакторним процесом. Корозійні явища забезпечують глибинне руйнування металу й підрив лакофарбового шару зсередини. Абразивний знос і мікропідряпини фізично пошкоджують верхній шар лаку, створюючи поверхню шорсткою й полегшуючи подальший доступ вологи й солі. Ультрафіолет і термічні цикли прискорюють старіння полімерної матриці лаку, формують мікротріщини та вицвітання. Хімічні реагенти додатково підривають хімічну стійкість покриття й позбавляють його еластичності. Все це взаємопов'язано: один тип пошкодження створює умови для іншого, і в підсумку кузов втрачає як естетичні, так і захисні властивості.

Використання нанополімерного покриття дозволяє утворити додатковий, більш стійкий захисний шар над штатним лакофарбовим покриттям, що дозволяє підвищити його захист.

## 1.2 Сутність та класи захисних нанополімерних покриттів

Захисні нанополімерні покриття для кузова використовують не як маскувальний шар, а як додатковий елемент захисної системи кузова [2; 3; 14]. Таким чином, захист відбувається не тільки за рахунок того, що новий шар закриває доступ зовнішнім агентам до лаку, а й за рахунок того, що він володіє спеціальними властивостями: мало змочується водою і сольовими розчинами, не так легко дряпається абразивом, менше піддається впливу до фотоокиснення і термічної крихкості, ніж відкритий лак. У цьому сенсі нанополімерне покриття розглядають як поверхневу модифікацію заводського лаку.

З практично-технологічного погляду сучасні нанополімерні покриття можна поділити три основні класи [11; 12]:

- силоксанові/силіцієвмісні покриття (позначають SiO<sub>2</sub>-покриття, кварцові тощо);
- фторполімерні покриття (на основі фторованих вуглеводневих фрагментів,

що формують низькоенергетичну поверхню);

– гібридні системи (комбіновані структури, які об'єднують силосанову каркасну сітку з фторполімерними або іншими нанонаповнювачами для досягнення балансу твердості, гідрофобності, оптичної прозорості та еластичності).

### 1.2.1 Силосанові та силіційовмісні покриття

У цьому класі покриттів використовують склад на основі органосиліційних сполук (силани, силосани, силосан-похідні), які після нанесення здатні утворювати на поверхні прозорого лаку сітку на основі зв'язків Si-O-Si. У популярній термінології це називають керамічним покриттям або кварцевим захистом.

Механізм захисту такого типу покриття умовно складається з трьох компонентів: бар'єрність, підвищення мікротвердості поверхні, стабільність оптичних властивостей.

Силосановий шар зменшує проникність поверхні для вологи та агресивних іонів, насамперед хлоридів. За рахунок цього відбувається зниження швидкості пропускання сонячного електроліту через мікродфекти лаку до металевої основи.

Силосанова сітка утворює досить жорсткий верхній шар, який механічно сприймає частину абразивного навантаження. У результаті дрібні частинки піску чи пилу менше пошкоджують заводський лак. Подряпини частіше залишаються в межах шару покриття, а не вриваються в лак і верхній шар фарби.

Керамічні покриття можуть зменшувати швидкість фотоокиснення лаку, після частково екранувати УФ-випромінювання і зменшувати прямий контакт ЛФП з киснем у присутності УФ. Це додатково довше зберігає блиск і глибину кольору та відтерміновує типи дефектів прозорого лаку: помутніння, пожовтіння, крейдування [11; 29-31].

З технологічної точки зору при нанесенні силосанових/силіційовмісних покриттів необхідно враховувати наступні фактори:

– підготовка поверхні, для якісної адгезії необхідно механічно й хімічно очистити лак. Прибрати металеві вкраплення, дорожню плівку, сліди бітуму, залишки полірувальної пасти, знежирити поверхню. Інакше покриття поєднується не з лаком, а з забрудненням, і захист буде нестійким.

– дотримування часу полімеризації. Після нанесення склад витримують, іноді контролюють температуру і вологість, щоб сітка стабільно сформувалася. У цей період поверхня чутлива до повторного забруднення або до механічного дотику.

Перевагою керамічних систем є висока мікротвердість і стійкість до абразиву. Основне обмеження – крихкість, надто жорсткий верхній шар може з часом стати ламким, особливо за інтенсивних термічних циклів нагрівання-охолодження, і нестійким до мікротріщин.

### 1.2.2 Фторполімерні покриття

Фторполімерні покриття – це покриття з високим вмістом фторованих фрагментів фторполімерів. Типова властивість таких матеріалів вкрай низька поверхнева енергія поверхні (до 20 мН/м) [2; 9]. З практичного погляду це означає, що вода, сольові розчини, оливи й бруд погано змочують поверхню, не розтікаються тонкою плівкою, а кожна округлена крапля з великим кутом контакту.

Основні захисні механізми фторполімерних покриттів такі [2; 9; 11]:

Гідрофобність та олеофобність. Високий статичний кут змочування і низький кут скошування краплі призводять до ефекту самоочищення. Крапля не прилипає і під дією гравітації або вітру рухається поверхнею, механічно збираючи дрібні частинки бруду. Менше налиплого забруднення означає меншу потребу у жорстких мийних засобах і менш агресивне тертя губкою чи щіткою. Таким чином, непрямо відбувається зменшення абразивне пошкодження лаку.

Змінення хімічного навантаження на лак. Через низьку змочуваність агресивні рідини, наприклад, сольовий розчин, паливно-мастильні матеріали, лужні склади, гірше підтримується на поверхні. Час їх контакту з лаком скорочується. Це важливо для зон із підвищеним ризиком, таких як пороги, нижні

частини дверей, арки коліс, де дорожні розчини накопичуються найбільш активно.

Стабілізація зовнішнього вигляду. Гладка, мало змочена поверхня краще зберігає оптичну глибину лаку. Бруд менше в'їдається, матовість накопичується вільніше, а автомобіль більше зберігає ефект свіжого блиску без полірування.

Фторполімерні покриття фактично тонші й еластичніші, ніж класичні керамічні силоксанові. Вони менш орієнтовані на підвищення жорсткої мікротвердості, зате дуже ефективні для змочування та самоочищення. Їх часто застосовують як топ-покриття, тобто як фінальне покриття над іншим захистом для посилення гідрофобності.

### 1.2.3 Гібридні нанополімерні системи

Гібридні покриття поєднують жорсткість і бар'єрні властивості силоксанової умовно керамічної складової з низьким змочуванням та самоочищенням фторполімерної складової. Концептуально це багатоконпонентні композиції, в яких [14; 37]:

- сітка на основі Si-O-Si або аналогічна неорганічно-органічна «каркасна» матриця, здатна отримувати абразивне навантаження;
- фторвмісні фрагменти або інші низькоенергетичні домішки, орієнтовані на гідрофобність/олеофобність;
- інші нанонаповнювачі (оксиди, модифіковані наночастинки), які впливають на оптичну прозорість, блиск, опір термічного розтріскування.

Основною метою таких систем є створення твердого покриття без значної крихкості. Це важливо, бо надто жорстка верхня плівка, яка не має еластичності, з високою ймовірністю матиме мікротріщини на ділянках, що зазнають циклічного навантаження, наприклад, на капоті в зоні теплового поля двигуна. Гібридна формула компенсує це, надаючи шару здатність переносити термоцикли без утворення сітки поверхневих тріщин.

Інша задача гібридних систем – забезпечення оптичної стабільності. Якісне гібридне покриття повинно залишатися прозорим, не давати помутніння і не

спотворювати відбиття. Це важливо для сучасних автомобільних лаків із вираженим ефектом глибокого блиску. Якщо покриття дає матовість, помутніння плівки, зниження чіткості відбитка, воно помітно старить кузов, навіть якщо формально захищає.

Ще однією важливою властивістю є сповільнення розвитку локальних корозійних зон після сколів. Додатковий шар має виступати як герметизатор краю сколу, доповнюючи прямий контакт відкритого металу або шару підложки з вологим сольовим середовищем.

Гібридні системи часто позиціонують як преміальний захист з покращеною гідропружністю і гідрофобністю, однак вони вимагають коректного нанесення не менше, ніж силоксанові. Вони також чутливі до стану підкладки: якщо лак під ними вже має мікротріщини, то покриття не усуне структурні дефекти, а лише тимчасово зменшить їх прояв.

Проте жодне нанополімерне покриття не є абсолютною бронею. Крім того необхідно враховувати наступні обмеження:

- Покриття не усуває глибинні дефекти, якщо лак вже відшаровується, якщо є активна корозія, тріщина до обґрунтування, нанополімерний шар не зупиняє руйнування металу. Ця функція профілактична, а не відновлювальна.

- Якість покриття залежить від коректності підготовки поверхні. Недостатнє очищення, пошкодження полірувального видалення мікропідряпин, залишки абразивної пасти, сліди силікону або жирів різко знижують адгезію. У таких випадках захисний шар частково відшаровується або зношується нерівномірно.

- Ефективність покриття має ресурс, також тверді силоксанові системи деградують під дією абразиву, УФ та термоциклів. Фторполімерні покриття з часом втрачають гідрофобність і потребують оновлення. Таким чином, характеристика термін служби покриття є невід'ємною складовою оцінки його ефективності.

- Можлива перевірка реальних властивостей. Декларації типу 9Н твердість, захист на 5 років тощо часто є рекламними. Для інженерного підходу важливо перевести ці характеристики в вимірювальні параметри: твердість/стійкість до подряпин за стандартним методом, кут змочування (гідрофобність), стійкість у

сольовому тумані (корозійна стабільність), зміна блиску після УФ-старіння тощо.

### 1.3 Критерії оцінки ефективності захисних покриттів

Оцінка ефективності нанополімерних покриттів для захисту кузова автомобіля має спиратися на вимірювальні показники, а не на видимі враження чи заяви виробника. Захисне покриття виконує функції одночасно: бар'єр проти корозійно-активного середовища, підвищення стійкості до абразивного зносу, збереження оптичних властивостей ЛФП, стабілізація поверхні під впливом ультрафіолету, термоциклів, зменшення змочуваності водою і брудом. Тому система критеріїв має включати механічні, хімічні, оптичні та експлуатаційно-економічні характеристики [1; 3; 6].

Адгезія покриття до лакофарбового шару – це міцність зчеплення нанесеного захисного шару із заводським лакофарбовим покриттям [18]. Покриття може мати якісний склад і характеризуватись високу механічну стійкість, але якщо воно слабо тримається на лаку, втрачається цілісність уже на ранніх етапах експлуатації (миття, абразивний пил, механічні дотики).

Недостатня адгезія проявляється у двох формах:

- локальне відшарування країв сколів і подряпин;
- плямисте здирання покриття під час миття або в місцях, де поверхнею активно стікає вода.

Це важливо, адже після внутрішньої неперервності шару утворюється простір, через який волога й сіль досягають лаку або навіть ґрунтування (металу).

Адгезію традиційно оцінюють стандартизованими методами типу решітчастого надрізу з подальшим відривом клейкої стрічки (cross-cut / tape test), регламентовані стандартом ASTM D3359. Суть методу: на поверхні роблять сітку надрізів певної глибини та кроку, після чого до неї приводять стрічку з регламентованими адгезійними властивостями і різко відривають. Далі візуально або мікроскопічно оцінюють відсоток відшарованих фрагментів. Чим нижча площа відриву, тим краща адгезія. У стандартах цей результат виражають в балах

(умовні класи від без відшарування до суцільного відривання фрагментами).

Таким чином, адгезія є базовим критерієм: без достатнього зчеплення з лаком інші властивості покриття (гідрофобність, твердість) не мають значення, адже нанополімерне покриття фізично не утримуватиметься на кузові.

Мікротвердість і стійкість до абразивного пошкодження полягає у здатності покриття протидіяти утворенню мікропідряпин від пилу, піску, частинок дорожнього шару та від механічного контакту під час миття, а саме опір поверхні до появи подряпин при контрольованому механічному впливі.

Існують два розширені підходи до оцінки цього критерію, що стандартизовані в ASTM D4060 [3; 4; 33]:

- метод визначення олівцевої твердості: покриття поверхню навантажують грифелями різної твердості (від м'яких до твердих), фіксують найменшу твердість грифеля, який залишає видимий слід. Метод типовий для полімерних і лакофарбових систем;

- абразивні випробування (наприклад, обертальні або маятникові, випробування за типом Taber), де поверхню піддають контрольованому тертю стандартним абразивом під постійним навантаженням, після чого вимірюють глибину чи площу пошкодження та втрату блиску.

Практичний зміст цього критерію полягає в тому, що абразивні мікропідряпини - це стартові точки видимої деградації. Вони створюють павутинку, роблять лак матовим, підвищують площу контакту з агресивними середовищами (соляний розчин, мийні хімікати).

Комерційно це один із найбільш вагомих аргументів. Якщо захисний шар забирає на себе мікропідряпини, то заводський лак залишається досить неушкодженим, а автомобіль видимо більше виглядає новим.

Гідрофобні та олеофобні властивості (змочування поверхні) характеризують змочування поверхні водою, сольовими розчинами, паливно-мастильними забруднювачами тощо. Кількісно цей критерій виражають через статичний контактний кут змочування (кут між краплею рідини та поверхнею), кут скочування краплі (мінімальний нахил поверхні, за якого крапля починає

рухатися).

Чим більший контактний кут, тим більше рідина розтікається поверхнею, тим легше вона зберігає форму краплі. Чим менший кут скочування, тим легше крапля самостійно стікає з поверхні, збираючи із собою частинки бруду. У практичних умовах це означає менше налипання пилу, солей і маслянистих забруднень, а отже – рідше потрібне жорстке миття із силовим тертям.

Висока гідрофобність важлива з двох причин. По-перше, зменшується тривалість контакту агресивних розчинів (в тому числі хлоридів) із поверхнею. Менший час контакту - менше шансів для початку корозійного осередку в зоні мікропідряпини. По-друге, спрощується догляд. Якщо бруд і солі не містяться на кузові у вигляді липкої плівки, для очищення достатньо менш агресивних мийних засобів і менш жорсткого механічного впливу. Це опосередковано знижує абразивні навантаження на поверхню, уповільнює накопичення мікрорисок.

Тому стабільно високі гідрофобні властивості після певного періоду експлуатації (наприклад, після циклу мийних/соляних навантажень) вважають ознакою функціональної ефективності покриття.

Корозійна стійкість описує, наскільки покриття забезпечує здатність обмежити або уповільнити розвиток корозії в умовах дії вологи, солі та циклічної вологи/висихання. Для кузова автомобіля цей критерій є одним із ключових, після тривалих довгострокових витрат власника пов'язана саме з корозійними пошкодженнями порогів, арок, нижніх країв дверей тощо.

Типово корозійну стійкість оцінюють у камері сольового туману або за прискореними циклами впливу соляного розчину, вологи й висихання. Методи, які використовуються при оцінці даного критерію регламентують ASTM B117 – стандартна практика використання камери сольового туману, та ISO 9227 – корозійні випробування в штучних середовищах, зокрема в нейтральному сольовому тумані (NSS), а також у модифікованих середовищах (AASS, CASS).

Обидва документи описують умови створення контрольованого корозійно-активного середовища (аерозоль розчину натрію хлориду за фіксовану температуру). Зразок панель із ЛФП і нанесеним покриттям забезпечує агресивні

дії середовища протягом заданого часу, після чого фіксують:

- появу місцевих джерел корозії;
- площу підплівкового відшарування лаку навколо механічного дефекту, сколу;
- зміну кольору й блиску в зоні зображення.

Кількісно можна оцінити площу корозійного пошкодження ( $\text{мм}^2$ ), довжину крайової підкорозії, ступінь відшарування лаку за бальною шкалою.

Практичне значення критерію – покриття має не просто «блищати», а фактично відсікати соляну воду, запобігати тому, щоб вода залишалась в мікротріщині лаку й до металу. Саме цей показник впливає на довговічність кузова в регіонах із зимовими реагентами.

Стійкість до ультрафіолетового випромінювання та термоциклів. Лакофарбове покриття кузова деградує під дією УФ випромінювання та під впливом зміни температури (нагрівання на сонці, охолодження, замерзання-розмерзання). Захисне покриття має дві функції [1; 6]:

- уповільнювати фотоокиснення прозорого лаку;
- зберігатися саме при циклічних термічних навантаженнях (не ставати крихким, не давати мікротріщин сітчастого типу).

У міжнародній практиці використання полімерних покриттів, зокрема, ASTM G154 – стандартна практика використання апаратури з флуоресцентними УФ-лампами для впливу на неметалічні матеріали.

ASTM G154 описує принципи й процедури експонування зразків для контрольованого УФ-випромінювання, підвищених температур, зволоження, щоб імітувати реальне старіння під дією сонячного світла, тепла й вологи.

Критерій оцінюють шляхом прискореного старіння в УФ-камері або в камері кліматичних випробувань із застосуванням температурних режимів. Після заданого числа годин впливу фіксують [6; 13]:

- зміну блиску (в глянцевиx одиницях, вимірюваних глосметром (рисунок 1.3);
- зміну кольору (наприклад, показник  $\Delta E^*_{ab}$  у кольоровому просторі CIE76:

$L^*a^*b$ );

- появу помутніння, пожовтіння чи крейдуватості;
- наявність або виникнення мікротріщин у шарі.



Рисунок 1.3 – Зображення глосметру

З науково-прикладної точки зору цей критерій важливий тому, що нестабільні до УФ покриття можуть самі стати джерелом дефектів. Якщо верхній шар жовтіє, мутніє або тріскає, він фактично прискорює естетичну деградацію кузова, замість того, щоб її гальмувати.

Оптичні показники (блиск, прозорість, візуальна однорідність) характеризують:

- рівень блиску, яку поверхні відбивають дзеркально світло;
- прозорість чіткість відбиття;
- ступінь глибини кольору (видима насиченість базового шару під прозорим лаком).

Ці параметри вимірюють приладами глосметрами, спектрофотометрами і фіксують фотографічно/мікрофотографічно до і після навантаження (миття, абразив, сольовий туман, УФ).

Вимірювання блиску виконують за стандартом ASTM D523, який регламентує метод вимірювання дзеркального блиску неметалевих поверхонь при фіксованих геометричних падіннях/відбитті світла  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  та  $85^\circ$ .

Геометрія  $60^\circ$  є базовою, використовують для додаткової поверхні;  $20^\circ$  використовують для дуже глянцевиx поверхонь (високі значення блиску), а  $85^\circ$  – для низькоблискових поверхонь.

Слід звернути увагу, що втрата блиску часто є маркером накопиченого механічного зносу поверхні (множинні мікрориски, локальне матування). Помутніння покриття свідчить про часткову деградацію шару або лаку (фотоокиснення, мікротріщини, локальне відшарування).

Нерівномірність блиску на панелі часто сигналізує про нерівномірну товщину покриття або про відшарування в окремих ділянках.

Технологічність нанесення – це здатність покриття створювати відтворений результат в умовах сервісного центру. Цей критерій включає:

- чутливість до чистоти й ступеня підготовки;
- вимоги до температури та вологості повітря під час нанесення;
- тривалість полімеризації (скільки часу авто не можна віддавати в агресивну експлуатацію);

- ремонтпридатність (можливість локального оновлення шару без повного перероблення у всій панелі).

На практиці це означає, якщо покриття має високі лабораторні показники, але тільки за умов, що практично недосяжні у звичайному сервісному середовищі (чиста камера, контроль вологості до відсотків, довга підтримка без пилу), то його ефективність у масовому застосуванні буде обмеженою.

Покриття, яке дає стабільний захист при типових умовах, має вищу прикладну цінність, ніж покриття, яке вимагає умов кузовного цеху авіабудівного рівня.

Економічний показник доцільності застосування має пряму фінансову мотивацію (зменшення витрат на кузовний ремонт, перекрашування, полірування, усунення корозії). Один із критеріїв ефективності – це економічна доцільність у перерахунку на ефективність служби покриття.

У найпростішому варіанті застосовують показник умовної вартості захисту за одиницю часу використання кузова:

$$C_{\text{суміш}} = \frac{C_{\text{нанесення}} + C_{\text{догляду}}}{T_{\text{ресурсу}}} \quad (1.1)$$

- де  $C_{\text{суміш}}$  – умовна вартість захисту на один місяць експлуатації;  
 $C_{\text{нанесення}}$  – повна вартість матеріалів і робіт при нанесенні;  
 $C_{\text{догляду}}$  – витрати на рекомендований супровід (спеціальні мийні засоби, періодичне оновлення топ-шару, контрольні огляди);  
 $T_{\text{ресурсу}}$  – реальний термін збереження ключових властивостей покриття гідрофобності, блиску, стійкості до подряпин, захисту від корозії.

Цей підхід дозволяє одночасно порівняти захисне нанополімерне покриття з іншими методами, наприклад: регулярним нанесенням воску, локальним перефарбуванням проблемних елементів раз на кілька сезонів, обклеюванням зон ризику поліуретановою плівкою тощо.

Слід звернути увагу, що перелічені критерії не є ізольованими. Навпаки, вони є складовими системи. Якщо адгезія слабка, швидко втрачають локально гідрофобність і бар'єрність у цих зонах. Корозійна стійкість падає, блиск руйнується, економічна доцільність знижується. Якщо мікротвердість і абразивність недостатні, поверхня швидко вкривається мікроподряпинами, втрачає блиск, посилюється змочування, прискорюється корозія.

Таким чином важливою є необхідність застосування нанополімерних покриттів як елемента технологічного захисту кузова автомобіля. Оскільки кузов працює в умовах постійної дії агресивних факторів – вологи з хлоридами дорожніх реагентів, абразивного пилу, камінців, ультрафіолетового випромінювання, перепадів температури, мийної хімії. Сукупна дія цих чинників призводить до руйнування лакофарбового покриття, утворення мікротріщин і зони підплівкової корозії, втрати блиску та нерівномірного вицвітання.

Основними класами таких покриттів є: силоксанові/силіцієвмісні керамічні, фторполімерні та гібридні композиції. Для коректного порівняння різних покриттів застосовують систему критеріїв (адгезія, мікротвердість, абразивність, гідрофобність, корозійна стійкість, УФ- та термостійкість, стабільність блиску й кольору, однорідність шару, технологія нанесення, економічна доцільність) за відповідними стандартними методами випробувань.

## 2 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАНОПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ

### 2.1 Опис досліджуваних покриттів

Для експериментальної оцінки ефективності нанополімерних покриттів вибрано три різні за хімічною природою системи захисту кузова. В дослідженнях умовно позначені як «Покриття А», «Покриття Б» та «Покриття В». Такий підхід дозволяє уникнути прив'язки до конкретних торговельних марок і водночас дослідити різні принципи захисту: силоксановий, фторполімерний (гідрофобно-олеофобний), а також гібридний, у якому поєднані функції бар'єрності, мікротвердості та самоочищення.

Вибір цих трьох типів відповідає сучасній практиці сервісного захисту кузова: саме ці класи продуктів пропонують як преміальний захисний лак для легкових автомобілів, позашляховиків і комерційного транспорту. Вони відрізняються як за механізмом дії, так і за вимогами до підготовки поверхні, технологічною дисципліною нанесення та заявленим строком служби.

Покриття А (силоксаново-керамічне покриття) є представником класу керамічних або  $\text{SiO}_2$ -подібних покриттів, у складі яких є органосиліційні компоненти (силоксанові/силан-органічні структури), які після нанесення та витримки формують шар з великою частиною зв'язків типу Si-O-Si (рисунок 2.1). Такий шар працює як жорсткий зовнішній бар'єр над заводським лакофарбовим покриттям [11; 14].

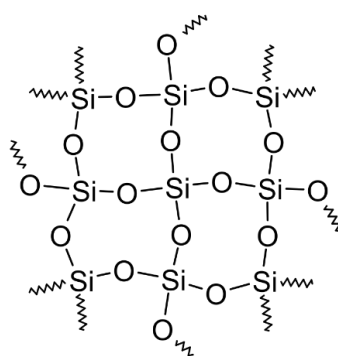


Рисунок 2.1 – Кремнію діоксид

Заявлені виробником властивості типових покриттів цього класу обов'язково включають (рисунок 2.2) [3;15]:

- підвищену мікротвердість поверхні (в маркетингу це описують як твердість 9H, на практиці означає опір подряпинам у тесті олівцевої твердості);
- стійкість до абразивного впливу дрібних частинок пилу/піску;
- зменшення швидкості утворення мікроподряпин після миття;
- підвищену бар'єрність щодо вологи й агресивних реагентів (хлоридів дорожньої солі, паливно-мастильних залишків).



Рисунок 2.2 – Приклади керамічних покриттів від різних виробників

Механізм захисту в цьому випадку має переважно бар'єрно-механічний характер. Завдяки силосановій сітці верхній шар стає більш жорстким і менш проникним, ніж лак. Це обмежує проникнення водно-сольових розчинів у ділянки дрібних сколів і мікротріщин, а також бере на себе перший шар абразивного навантаження.

Технологічні умови нанесення для Покриття А є жорсткими. Перед нанесенням необхідно провести [24; 26]:

- повну дезактивацію кузова (видалення бітуму, залізовмісних речовин, дорожньої плівки);
- коригувальне полірування для зняття мікроподряпин і відновлення блиску

лаку;

– знежирення поверхні спеціальними засобами з низьким вмістом залишкових поверхнево-активних речовин.

Після нанесення покриття необхідний контроль витримки (полімеризації) з локальним прогріванням панелей, під час якої полімери зв'язуються в захисному шарі. У цей період поверхня є вразливою до пилу, вологи та механічного контакту. У сервісній практиці такі склади часто позиціонують як довготривалі, з показовим багатомісячним або багаторічним ресурсом без повторного нанесення, за умов правильного догляду.

З точки зору дослідження Покриття А демонструє високу мікротвердість і добру бар'єрність до вологи та солі, але може бути тільки в крихких термоциклах. Це означає ризик мікротріщин при багаторазових нагріваннях/охолодженнях, особливо на елементах із вираженою деформацією або високим тепловим градієнтом (капот у зоні двигуна).

Покриття Б (фторполімерне покриття) представляє групу фторполімерних складів, у яких головним функціональним ефектом є формування низькоенергетичної поверхні з високою гідрофобністю та олеофобністю. Такі покриття часто позиціонують як антибрудові або самоочисні, акцентуючи увагу не на стільки на твердість, скільки на змочуваність (рисунок 2.3) [6; 11;14].



Рисунок 2.3 – Приклад фторполімерного покриття

Покриття Б мають наступні характеристики [2; 3]:

- високий контактний кут змочування, вода збирається у стійкі краплі, а не розтікається тонкою плівкою;
- низький кут скочування, крапля легко сходить з поверхні, механічно забираючи бруд;
- спрощення догляду, менше налипання дорожнього пилу, соляного нальоту, плівок від мийних засобів;
- збереження блиску за рахунок зменшення частоти жорсткого миття і меншої кількості абразивних мікроподряпин.

Механізм дії в основному поверхнево-енергетичний: фторовані фрагменти орієнтуються назовні і знижують поверхневу енергію шару. Це передбачає стабільне змочування кузова водно-сольовими аерозолями і мастильними забруднювачами. Внаслідок цього агресивні розчини контактують із лаком менше, а отже потрібно менше часу, щоб проникнути в мікротріщину або сколи та запустити корозію.

Технологічно Покриття Б є простішим в нанесенні, ніж Покриття А. Часто воно допускає формат розпилити - розподілити - витерти надлишок, без жорсткої вимоги до контрольованої полімеризації. Час введення автомобіля в експлуатацію після нанесення є коротшим. Однак типово заявлений термін стабільної дії такого покриття є меншим: фторполімерний шар схильний до поступового механічного стирання та втрати гідрофобності, особливо в зонах інтенсивного пошкодження (пори, арки коліс, нижні частини дверей) та на елементах, які часто миють із контактом.

Покриття Б важливе як покриття, яке легко наноситься, відразу дає функціональний ефект самоочищення. Воно надає велику гідрофобність і скорочення часу контакту з агресивними середовищами, які реально впливають на уповільнення корозійних процесів і збереження блиску, навіть за зниженої невисокої мікротвердості.

Покриття В (гібридне нанополімерне покриття) є гібридною системою, у якій поєднані принципи обох попередніх підходів. Як правило, такі системи утворюють

силоксаново-зшитий або інший неорганічно-органічний каркас, що відповідає механічній стійкості та бар'єрності, а також фторвмісні або інші низькоенергетичні сегменти, відповідні гідрофобності/олеофобності та спрощеному догляду (рисунок 2.4) [2; 14].



Рисунок 2.4 – Приклад покриття з гібридним складом

Властивості гібридних складів Покриття В включають [3; 36-38]:

- помірно високу мікротвердість і стійкість до мікроподряпин;
- збереження блиску та глибини кольору за рахунок зменшення абразивного матування;
- підвищену гідрофобність і антиадгезію бруду;
- підвищену стійкість до УФ-старіння прозорого лаку, знижену пошкодженість до мікротріщин при термоциклах. Тобто намагання уникнути крихкості, типової для надто жорстких керамічних покриттів.

Технологічно такі склади зазвичай вимагають обробки поверхні (як у випадку Покриття А), але декларують дещо меншу чутливість до жорстких режимів полімеризації та кращу еластичність готового шару. Тобто Покриття В позиціонують як компроміс: забезпечення достатньої жорсткості і бар'єрності, не будучи надто крихким, і при цьому зберігають стійку гідрофобність.

Дослідження Покриття В є ключовим, оскільки саме такі багатокомпонентні системи зараз позиціонують як преміальний, збалансований захист кузова.

Методично важливо перевірити, чи дійсно поєднання функцій (мікротвердість, самоочищення, оптична стабільність) спрацьовує одночасно, чи певні заяви є компромісними й одночасно ослаблюють одну. Наприклад, зменшення крихкості за рахунок зниження твердості, або навпаки.

## 2.2 Зразки матеріалів для випробування

Для забезпечення відтворюваності та коректного порівняння досліджуваних закритих форм була розроблена серія стандартизованих зразків, що моделюють реальні умови використання елементів кузова автомобіля. В роботі застосовано плоскі зразки-панелі на основі типових кузовних матеріалів з нанесеною заводською багатошаровою лакофарбовою системою, а також підготовлені контрольні зони зі штучно відтвореними пошкодженнями. Такий підхід дає можливість оцінити захисну дію покриття як на інтактній поверхні, так і в умовах локального дефекту, де ризик корозії є найбільшим.

В якості основного матеріалу підкладки використовують два типи металевих пластин, що відповідають розширеним конструкційним матеріалам кузова (рисунок 2.5):

- холоднокатана листовая автомобільного призначення (низьковуглецева, товщина 0,8-1,0 мм), що є типовою для зовнішніх панелей та зон, пошкоджених до абразивного впливу (передні крила, нижні частини дверей, пороги);
- алюмінієвий сплав (товщина 0,8-1,0 мм), що відповідає практиці застосування алюмінію для капотів, кришок багажника та окремих елементів із застосуванням зменшення маси автомобіля.

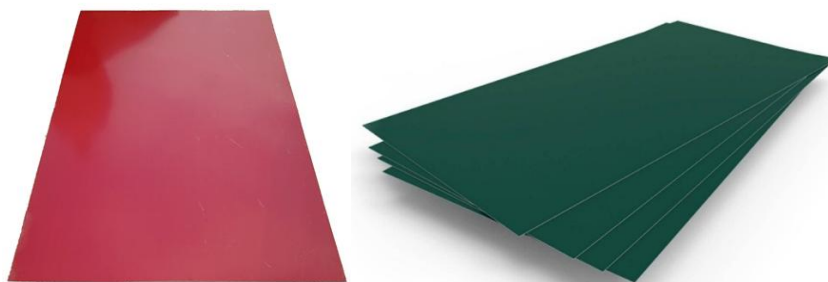


Рисунок 2.5 – Зразки матеріалів для випробування

Застосування двох підкладок є принциповим. Габарити панелей приймають в межах 100×150 мм з відхиленням не більше  $\pm 2$  мм за довжину та ширину. Такий формат сумісний з основними випробувальними установками: камерами сольового туману (рисунок 2.6), кліматичними камерами прискореного старіння, стендами абразивного стирання. Крім того, площа близько 150 см<sup>2</sup> є достатньою для проведення кількох незалежних вимірювань (змочення, блиск, мікроструктурний огляд) без зовнішнього впливу вимірювальних ділянок.



Рисунок 2.6 – Камера сольового туману

Перед початком дослідження на обидва типи металевих підкладок наносили репрезентативну автомобільну багатошарову ЛФС, яка моделює серійне заводське фарбування кузовних елементів [3; 23]:

- антикорозійний шар/основа, призначений для адгезії до металу та первинного бар'єрного захисту;
- базовий кольоровий шар, що відповідає пігментованій фарбі кузова.
- прозорий захисний шар лаку (прозоре покриття), який покращує блиск, глибину кольору та первинну стійкість до подряпин.

Саме прозорий лак виступає субстратом для нанесення нанополімерних покриттів у сервісній практиці. Тобто у реальному автомобілі додатковий захисний шар наносять не на метал, а на вже сформований заводський лак. Саме тому в даній

роботі оцінюють не взаємодія покриття з металом, а ефективність системи типу лак – захисне покриття, що відповідає дійсним умовам експлуатації кузова.

Для випробувань було сформовано чотири групи зразків на кожному матеріалі підкладки (сталь та алюміній):

- G0 (контрольна група): зразки з лакофарбовою системою без додаткового захисного нанополімерного шару;
- GA: зразки з нанесеним Покриттям А (силоксаново-керамічним);
- GB: зразки з нанесеним Покриттям Б (фторполімерним);
- GV: зразки з нанесеним Покриттям В (гібридним).

Таке групування дозволяє порівняти захисні властивості необробленої поверхні (G0), та різні концепції захисту.

Кожна група включала не менше п'яти ( $n \geq 5$ ) незалежних зразків для кожного типу підкладки. Це зроблено з двох причин. По-перше, наявність статистично релевантної вибірки дозволяє усереднювати результати кількісних вимірювань (наприклад, блиску, контактного кута змочування, площі корозійного пошкодження) та оцінювати дисперсію. По-друге, це дозволяє виявити вихідні технологічні похибки нанесення покриття (локальні неоднорідності шару, недоочищені зони) як відхилення, а не сприймати їх як типову поведінку всього класу покриття.

Перед нанесенням захисних покриттів, перед будь-якими випробуваннями кожен зразок пройшов фіксацію стану поверхні у вихідній точці ( $T_0$ ). На цьому етапі зареєстрували:

- блиск при стандартній геометрії вимірювання (наприклад,  $60^\circ$ ) у глянцеvih одиницях для оцінки дзеркальної здатності відбиття;
- спектрофотометричні характеристики (колірні координати в просторі CIE76  $L^*a^*b$ ), з подальшим визначенням зміни кольору ( $\Delta E_{ab}^*$ ) після впливу УФ і термоциклів;
- контактний кут змочування води на поверхні лаку (до нанесення покриття) для визначення початкової гідрофобності системи лак без додаткового шару;
- оптичну мікроструктуру (мікроподряпини, сліди абразивного контакту,

голограмні дефекти) при контрольному збільшенні, що дозволяє відрізнити вже наявні дефекти лаку від тих, які формуються внаслідок навантаження;

– видиму якість лаку та крайових зон, задокументовану у вигляді фотопротоколу для сталої схеми освітлення.

Слід звернути увагу, що оскільки реальний кузов не є ідеально непошкодженим, у частині зразків навмисно створювали контрольовані дефекти – дрібні сколи лаку (штучне точкове руйнування прозорого шару до базового шару або до обґрунтування), а також мікроподряпини, які імітують механічний вплив абразиву. Це дозволяє проаналізувати поведінку покриття не лише на звичайній поверхні, а саме в зоні, де починається корозія.

Захисні покриття в реальній експлуатації мають завдання насамперед не з ідеально рівним лаком, а з лаком, у якому вже є:

- сліди миття з частинами піску;
- незначні удари гравію;
- локальні відшарування на кромках панелей.

Тому додавання в серію зразків зі штучно створеними дефектами є класом для оцінки саме здатності покривати подальший розвиток пошкодження (підрив лаку по краю сколу, розповзання підплівкової корозії, збільшення площі матування від абразиву) (рисунок 2.7).

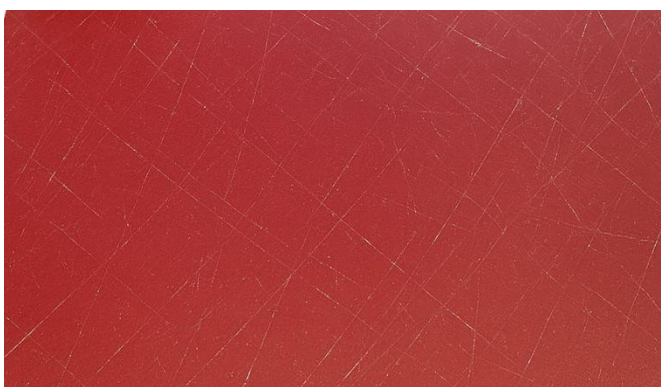


Рисунок 2.7 – Зразки з штучними дефектами

Усі зразки з дослідних груп після фіксації вихідного стану проходили попередню підготовку поверхні за уніфікованим регламентом (деактивація,

коригувальне полірування, знежирення). Це виконували для того, щоб імітувати реальну сервісну процедуру перед нанесенням нанополімерного покриття.

Окремо формувалася додаткова підсерія (умовно-некоректне нанесення), для якої навмисно допускали типи порушення технології (скорочена дезактивація, неповне знежирення, підвищена вологість повітря при нанесенні). Такі зразки використовують для оцінки технологічної толерантності покриття: сильно забезпечують захист, якщо властивості нанесення виконані не в ідеальних умовах. Для сервісної практики це важливий параметр, оскільки не кожен споживач має доступ до умов професійної камери з контрольованою вологою та пиловим режимом.

### 2.3 Технологічні карти для нанесення покриттів

Усі операції з підготовки поверхні та нанесення здійснюють в контрольованому середовищі:

- температура повітря:  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- відносна вологість:  $45 \pm 5 \%$ ;
- впуск інтенсивного пилового навантаження (закрите приміщення без протягів);
- елементи прямого контакту з джерелами аерозолів, мастильних випарів тощо.

Покриття, допоміжні засоби (знежирювачі, полірувальні пасти, аплікатори) та самі зразки витримують в цих умовах не менше 12 годин до початку робіт, щоб уникнути конденсації вологи на поверхні та різниці температури між матеріалом і повітрям.

Усі контактні матеріали (серветки, аплікатори) застосовують одноразово або розділяють за стадіями (окрема мікрофібра для знежирення, окрема – для розполірування покриття), щоб уникнути зворотного переносу абразиву чи залишків полірувальної пасти на вже очищену поверхню.

Підготовка поверхні є важливою, після чого нанополімерні покриття не

маскують дефекти лаку, а фіксують їх у тому стані, в якому вони були нанесені. Тому процес підготовки стандартизовано у ряді операцій [11; 23]:

- первинне миття та дезактивація;
- зразок обробляють нейтральним мінімальним засобом для видалення пилу й органічних забруднень, після чого промивають водою;
- проводять точкову дезактивацію бітумних речовин і важких дорожніх нашарувань (типові для нижніх зон кузова) із застосуванням відповідних дегуманторів бітуму/смоли;
- обробка реагентом для вилучення залізовмісних частинок, які можуть бути вкраплені в лак від гальмівного пилу та абразивної дороги;
- використовують безконтактне сушіння теплим повітрям;
- заборонено витирати поверхню грубою тканиною на цьому етапі, щоб не внести додаткових абразивних дефектів.
- для коригувального полірування застосовують дрібнозернисту полірувальну пасту (фінішна або антигіолограмна) і мінімальний тиск інструмента.
- фінішне знежирення / очищення. Використовують розчин на основі ізопропілового спирту у воді (типова масова частка ізопропанолу 60–70 %) або спеціалізований очищувач поверхні без силіконових залишків.

Результатом етапу попередньої підготовки є максимально чиста, суха, знежирена поверхня прозорого лаку без видимого мікроабразивного пилу, плям полірувальних паст, слідів мастила і без конденсованої вологи.

Саме на таку поверхню наносять покриття А, Б або В.

### 2.3.1 Технологічна карта нанесення Покриття А (силоксаново-керамічне покриття)

Покриття А є системою зі здатністю формувати умовно керамічний шар на поверхні лаку. Воно характеризується підвищеною мікротвердістю та високою бар'єрністю, але водночас вимогливе до умов нанесення та витримки [2; 3].

Для аплікації використовують аплікатор (мікрофібра або замшевий блок),

зміщений невеликою дозою складу [6; 11].

Покриття наносять рівномірними рухами за схемою хрест-хрест: спочатку паралельно довгій осі зразка, потім перпендикулярно.

Рекомендований локальний сектор обробки не перевищує 10×10 см одночасно. Це дає можливість тимчасово контролювати утворення тонкої плівки без пересихання.

Після нанесення покриття на поверхні короткий регламентований проміжок часу (десятки секунд), поки не з'являться перші ознаки часткової плівки.

Ця стадія є критичною: надто раннє видалення не дає формування початкового шару; надто пізнє – причини до надлишкового підсихання і ризику плями [6; 11].

Надлишок матеріалу акуратно знімають безворсовою мікрофіброю (первинне розтирання), після чого другу чисту серветку використовують для остаточного доведення до оптичної прозорості [3; 4].

Заборонено прикладати тиск, щоб не зірвати свіжоформований шар.

Після нанесення зразки залишають при контрольованій температурі без контакту з водою і пилом. Типово приймають період не менше 24 годин при  $T \approx 20^\circ\text{C}$  для первинного набору твердості.

При наявності обладнання допускають локальний інфрачервоний прогрів (орієнтовно до 50-60 °C протягом 20-30 хв для малої панелі) для прискорення зшивання силоксанової сітки.

На цьому етапі поверхня заборонена до механічного контакту (дотик руками, протирання) та до змочування.

У перші 48-72 годин після нанесення не допускають контакт із агресивною мийною хімією, тиском води чи абразивом.

Це пояснюють тим, що хоч поверхневий шар уже сформований, завершальне доформування просторових зв'язків триває.

Функціональна карта нанесення Покриття А створює тип сервісної процедури керамічного покриття, для якого головний ризик пов'язаний не зі складом як таким, а з відхиленнями від регламенту (неправильний час витримки

перед розполіруванням, нанесення пилю на свіжий шар, конденсація вологи під час полімеризації).

### 2.3.2 Технологічна карта нанесення Покриття Б (фторполімерне покриття)

Покриття Б на відміну від Покриття А, як правило, не потребує вираженої тривалої полімеризації в присутності суворо контрольованого середовища [6].

Склад наносять або замінюють на поверхню зразка тонким аерозольним чи крапельним способом, або на чисту мікрофіброву серветку з подальшим рознесенням поверхнею рівномірним тонким шаром. Рухи – лінійні або легкі коло без агресивного натиску.

На відміну від Покриття А, немає стадії вираженого підхоплення з наступним поняттям надлишку після десятків секунд очікування. Етап розтягування й легкого розполірування відбувається практично відразу.

Завдання – забезпечити однорідне покриття без локальних зон перенасичення, яке потім може давати оптичні плями.

Для остаточної фторполімерної системи допускається нанесення другого шару через короткий інтервал (близько десятків хвилин) після стабілізації першого шару.

Це робиться для підвищення довготривалості гідрофобного ефекту й зниження ризику протертих зон у місцях, які зазнають частого механічного контакту (краї панелі, умови імітації порогів/дуг коліс).

Як правило, досягнення стану умовної готовності до дотику досягають протягом 1-2 годин при кімнатній температурі, після чого поверхня не липка, й не має видимого залишкового мазка.

Повну стабілізацію гідрофобного шару доцільно оцінюють протягом 24 годин.

Автомобільні панелі з таким покриттям теоретично можуть бути повернені в експлуатацію (миття низьким тиском, обмежений вплив навколишнього середовища) швидше, ніж у випадку Покриття А.

Це одна з причин масового поширення таких систем у сервісах швидкого захисту, але вона є причиною меншої механічної стійкості шару.

Фактично карта нанесення Покриття Б демонструє, що технологія є більш адаптованою до побутових умов, але ціною нижчого потенціалу до створення жорсткого бар'єрного шару.

### 2.3.3 Технологічна карта нанесення Покриття В (гібридне покриття)

Покриття В орієнтоване на досягнення компромісу між довговічністю і технологічною толерантністю.

Аналогічно Покриттю А, використовують локальну подачу матеріалу на аплікатор і нанесення на схему хрест-хрест з контролем секцій.

При цьому час початкової експозиції до розполірування досить короткий, ніж у Покриття А: орієнтовно від кількох десятків секунд до хвилини. Це зменшує ризик утворення пересушених плям.

Надлишок матеріалу знімають м'якою безворсовою серветкою, після чого завершують другою серветкою для досягнення оптичної прозорості без ореолів.

Важливо уникати надлишкового тиску, щоб не порушити сформований гібридний шар.

У багатьох гібридних системах допускають повторне нанесення через короткий інтервал для підвищення довговічності. Другий шар покликаний стабілізувати гідрофобність і зміцнити бар'єрну поведінку.

Витримка традиційна становить 24–48 годин при кімнатній температурі.

За наявності ПЧ-прогріву допускають прискорену стабілізацію при температурі біля 50–60 °С протягом десятка хвилин для окремого зразка.

На відміну від Покриття А, шар покриття залишається стійким до утворення крихкої сітки мікротріщин під час подальших термоциклів, нагрівання/охолодження.

Необхідно уникати контакту з водою, агресивним ПАР та абразивним впливом у перші доби, поки не завершиться стабілізація шару.

Проте регламентовані вимоги щодо вологості та чистоти повітря дещо менш жорсткі, ніж у випадку Покриття А, що підтверджує вищу технологічну толерантність гібридної системи.

### 2.3.4 Моделювання порушення регламенту

Для оцінки чутливості покриттів до відмови від технології було сформовано додаткову серію зразків, які покривали з навмисними спрощеннями. Було введено такі керовані відхилення:

- неповна дезактивація (пропуск етапу обробки глиною або скорочений етап знежирення);
- випуск коригувального полірування перед нанесенням (тобто дрібні мікроподряпини лаку залишаються відкритими під покриттям);
- підвищена вологість повітря (умовно понад 60–65 %) і явного контролю температури;
- скорочена або відсутня витримка перед умовним введенням в експлуатацію.

Головне завдання цієї підсерії – застосувати толерантність кожного типу до типових польових помилок. У практиці сервісного обслуговування кузова саме людський фактор часто є причиною швидкої втрати виявлених властивостей покриття (передчасне відшарування, плями блиску, нестабільна гідрофобність, локальна втрата бар'єрності в зоні сколу).

### 2.4 Методики вимірювання показників ефективності

Методики спрямовані на перевірку аспектів захисту кузова: адгезії, стійкості до подряпин і зносу, корозійної стійкості, гідрофобності, оптичної стабільності, термостійкості та довговічності в умовах догляду. Важливо, що випробування виконують на зразках, підготовлених і полімеризованих згідно з технологічними картами нанесення, при стабілізованому стані шару (24-48 годин після нанесення).

Для кожної дослідної групи (Покриття А, Б, В та контроль без покриття) використовують не менше п'яти незалежних зразків, що дає змогу забезпечити репрезентативність і статистичну обробку результатів.

Перед початком випробування для всіх зразків реєструють базовий стан (умовно  $T_0$ ) – блиск, колір, контактний кут змочування, мікрорельєф, наявність або наявність мікрodefektів. Після цих зразків вибірки надають регламентовані навантаження (сольовий туман, абразивне стирання, УФ-старіння, термоцикли, імітоване миття), з подальшими вимірюваннями після кожного етапу ( $T_1$ ,  $T_2$ , тощо). Усі вимірювання здійснюють при температурі повітря  $20 \pm 2$  °C і відносної вологості  $45 \pm 5\%$ , щоб виключити вплив умов середовища на вимірювальну процедуру, а не на саме покриття.

Адгезійна стійкість є базовим критерієм для будь-якого покриття, яке позиціонують як довготривалий захисний бар'єр. Адгезійна стійкість при недостатньо надійно захисний шар використовують на прозорому лаку ЛФС після дії агресивних чинників (соляний туман, циклічні зміни температури, абразивний вплив, вплив вологи). Втрата адгезії пошкодження до локального відшарування шару, утворення пластівців і оголення лаку, що різко закінчується ризиком корозії в зоні дефекту.

Для якісної оцінки використовують метод типу решітчастий надріз з відривом клейкої стрічки (аналог методів ASTM D3359). На поверхні зразка формують сітку надрізів (наприклад,  $6 \times 6$  перехресних надсічок із кроком 1 мм), яка прорізає захисний шар до рівня прозорого лаку. Потім на цю зону наносять стандартну стрічку з регламентованою адгезією, притискають із постійним зусиллям і відривають під кутом  $180^\circ$ . Інтенсивність відшарування оцінюють за бальною шкалою (0B...5B), де 5B відповідає практично повному відриву покриття від основи, а нижчі бали вказують на зоні, де покриття відривається фрагментами або разом із фрагментами лаку. Цей тест проводять як для зразків одразу після полімеризації, так і після завершення основного комплексу впливів (соляний туман, абразив, УФ).

Як додатковий критерій застосовують метод відриву зі штифтами. До поверхні приклеюють стандартизований сталю або алюмінієву стрічку (доллі) певного діаметра, після чого навантажують його відривним зусиллям перпендикулярно до поверхні. Вимірювана величина – гранична напруга відриву (МПа). Крім числового значення фіксують також характер руйнування: адгезійний (відрив на межі лак-покриття), когезійний (розрив у середині самого покриття) або змішаний. Когезійний або змішаний характер ефекту про сильне зчеплення із субстратом.

Одна з головних експлуатаційних проблем лакофарбового покриття кузова – утворення дрібних подряпин, голограм, матування внаслідок абразивного контакту (пісок, пил, частинки бруду, миття з натиранням). Нанополімерне покриття наносять при пошкодженні, діючи як зовнішній шар із вищою твердістю, ніж заводський лак.

Для якісної оцінки стійкості до подряпин необхідно виконати випробування олівцевої твердості (аналог ASTM D3363). Набір графітних стрижнів із градацією твердості від м'яких (6В) до дуже твердих (9Н) притискають до поверхні під визначеним кутом (45°) і натягом (7,5 Н). Стрижень наносять на поверхні на відстань кількох сантиметрів. Фіксують найнижчу твердість стрижня, яка залишає чітку постійну риску. Чим твердіший олівець потрібен для утворення ураження, тим вища мікротвердість шару.

Для наближеної до реальних умов оцінки зносостійкості використовують абразивне випробування типу Taber (ASTM D4060). Поверхня зразка контактує із парою абразивних коліс стандартних характеристик для сталого навантаження (типово 500 г на шкірне колесо) протягом заданого числа циклів (наприклад, 1000). Після тесту вимірюють зміну маси (у міліграмах) та зміну блиску в глянцевиx одиницях (GU) при стандартному куті 60°. Втрата блиску, поява концентричних кругових рисок і локальне матування після Табер-тесту є об'єктивними показниками механічної стійкості шару до дрібного абразиву.

Іноді додатково виконують скретч-тест зі змінним навантаженням: зі сферичною вершиною голка рухається поверхнею, а нормальне навантаження

збільшується лінійно. Визначають критичне навантаження, для якого подряпина стає безперервною і проходить через шар покриття до лаку. Цей показник важливий для оцінки ризику утворення глибоких подряпин у зонах інтенсивного контакту (ручки дверей, край капота).

Корозійна стійкість є ключовим параметром довговічності кузова. Найбільш агресивним чинником у реальних умовах є дія дорожніх реагентів на основі хлоридів у поєднанні з циклами волога – висихання – повторне зволоження.

Для моделювання цього чинника використовується випробування в камері нейтрального сольового туману (наприклад, ISO 9227, NSS). Зразки розміщують у камері, де їх безперервно обдуває аерозолем 5%-го водного розчину NaCl за температуру близько 35 °C, з контрольованим рН навколишнього до нейтрального. Експозиція розроблена, наприклад, протягом 24 годин і 48 годин.

Важливо, оцінка в двох варіантах: на інтактній поверхні, і в зоні контрольовано нанесеного дефекту (штучного сколу або «надрізу», який проникає крізь покриття і прозорий лак до шару підложки або металу). Це імітує реальний скол від камінця. Після експозиції в сольовому тумані інструментально аналізують:

- наявність і площу точкової корозії типу «жучків» (для сталі – руді підплівкові осередки; для алюмінію – підйом і побіління лаку);
- довжину підплівкового відшарування лаку від краю дефекту (у мм);
- появу крайової крихкості або деламінації захисного шару.

Ці параметри фіксують за допомогою макрофотографування та аналізу зображення (планіметрія площі утворення в мм<sup>2</sup>), а також бального опису характеру відшарування. Висока якість покриття проявляється як обмежена зона утворення навколо сколу, без значного розширення підлакованої корозії під шаром лаку.

Гідрофобність і олеофобність відображає як поверхня відштовхує воду, сольові розчини та мастильні забруднювачі. На практиці ці властивості зменшують час контакту агресивної рідини з лаком, спрощують очищення кузова без інтенсивного механічного тертя.

Головним кількісним показником є статичний контактний кут змочування.

На поверхню обережно накладають краплі води малого об'єму (порядку 5 мкл) і за допомогою оптичної системи (камера з відомою геометричною формою) фіксують профіль краплі збоку. Далі автоматично або напівручним методом визначають кут між дотичною поверхнею рідини і поверхнею твердого шару. Чим більший кут, тим гідрофобніша поверхня. Вимірювання виконують в кількох точках за сіткою, щоб оцінити однорідність.

Для більшої повної характеристики змочування застосовують також динамічні кути змочування – кут просування (коли до краплі додають воду) і кут відступу (коли з краплі воду відбирають). Різниця між цими розмірами (гістерезис змочування) пов'язана з мікрошорсткістю та хімічною однорідністю поверхні. Низький гістерезис показує, що крапля легко рухається і поверхня самоочищається.

Ще один важливий параметр – кут скочування краплі. Зразок дуже нахилиють, доки крапля не почне самостійно ковзати. Невелике значення цього кута означає здатність шару до самоочищення. Вода збирає із собою бруд і сольові частинки замість того, щоб висихати на місці та залишити відкладення.

Ці параметри вимірюють у кількох часових проміжках: до будь-яких випробувань ( $T_0$ ); після циклу імітованих мітів; після 24–48 годин сольового туману; після УФ-старіння та після термоциклів. Таким чином оцінюють не тільки початкову гідрофобність, а і її стабільність у часі.

Для імітації УФ-прискореного старіння та циклічних навантажень тепла зразки використовують у кліматичній камері прискореного старіння за циклічного режиму УФ-випромінювання з конденсацією. Один тип циклу складається з восьми годин промінювання лампами області близького до природного сонячного УФ (наприклад, UVA-340) при підвищеній температурі (близько  $60^{\circ}\text{C}$ ), після чого чотири рази виконують в режимі конденсації при нижній температурі (близько  $50^{\circ}\text{C}$ ) і підвищеної вологості. Сукупно такі цикли можуть тривати 500 годин і 1000 годин, що використовують як прискорену модель тривалого впливу сонячного випромінювання та нічної конденсації в експлуатації.

Окремо протягом термоциклів зразків між умовно низькою температурою ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) і високою температурою ( $+60^{\circ}\text{C}$ ), з витримкою на кожному рівні та

коротким переходом. Такі цикли відтворюють реальні умови експлуатації в кліматі з морозами й подальшим нагріванням кузова на сонці або при роботі двигуна. Важливий ризик – накопичення термічних напружень між лаком і покриттям, що може призвести до мікротріщин і початку розшаровування.

Після завершення кожної термосерії (УФ циклу) виконують таке вимірювання:

- зміни блиску (у глянцеvih одиницях при куті  $60^\circ$ ), яка відрізняється помутнінням або втратою здатності до дзеркального відбиття;
- зміни кольору ( $\Delta E^*$ , наприклад у просторі CIE76:  $L^*a^*b$ ) що демонструє вицвітання або пожовтіння;
- наявності мікротріщин, помутніння, оптичних ореолів, які фіксують видно та за допомогою мікроскопії з помірним збільшенням ( $50\times$ ).

Візуальний стан кузова має значення з точки зору економічного вигляду. Оптичні показники (блиск, чіткість відбиття, стабільність кольору). Автомобіль із втраченим блиском, локальним помутнінням або збитою кольоровою оцінкою стає нижче на вторинному ринку, навіть якщо структурно кузов у задовільному стані. Тому оптичні властивості аналізують окремо і систематично.

По-перше, вимірюють блиск за допомогою глянцемира. Використовують стандартні геометрії  $60^\circ$  (базовий випадок), а для дуже глянцеvih поверхонь можна додатково фіксувати значення при  $20^\circ$ , для матових – при  $85^\circ$ . Порівнюють абсолютний показник блиску та його зміна  $\Delta GU$  після абразивних впливів і після УФ-старіння.

По-друге, за можливості оцінюють чіткість відбитого зображення і параметр мутності. Зниження чіткості і зростання мутності провокує збільшення мікрорельєфу поверхні, появу мікроподряпин, голограмних структур після полірувальних або абразивних дій, а також локальне помутніння шару.

По-третє, оцінюють колір за допомогою спектрофотометрії. Вимірюють кольорові координати в системі CIE76:  $L^*a^*b$ , а потім обчислюють  $\Delta E^*$  (або  $\Delta E_{00}$ , якщо використовується сучасніший критерій). Високе значення  $\Delta E^*$  після УФ-експозиції циклів означає вицвітання або потемніння, що помітно незброєним

оком. Оптична стабільність є особливо важливою для гібридних покриттів, які позиціонують як такі, що зберігають вигляд нового автомобіля.

Товщина та однорідність захисного шару є субмікронною, а іноді – нанометровою. Тобто прямий контроль товщини на складній криволінійній кузовній поверхні стандартними механічними товщиномірами може бути неможливим або неточним. З цієї причини використовують комбінований підхід.

Паралельно основним зразкам готують зразки плоскі пластини скла або полірованого металу, на які в тій самій послідовності нанесені лаки та досліджуване покриття. Такі зразки допускають застосування високоточних методів (еліпсометрія, атомно-силова мікроскопія (АСМ), профілометрія), які дають прямо значення товщини шару в нанометровому/субмікронному просторі, а також дозволяють оцінити однорідність шару за площею.

Для тих самих зразків оцінюють просторову однорідність функціональних властивостей на реальній панелі. Для цієї поверхні панелі вибирають матрицю точок (наприклад, 3×3) і в кожній точці вимірюють блиск та контактний кут змочування. Висока варіабельність цих параметрів між точками одного зразка продуктів свідчить про нерівномірне нанесення, локальні надлишки чи недостатню кількість матеріалу, що може призвести до прискореної деградації в слабких зонах.

Додатково можна використовувати FTIR-спектроскопію з атенуванням повним відбитком (ATR-FTIR) для виявлення характерних хімічних груп (наприклад, Si–O–Si для силоксанових покриттів або C–F для фторполімерних систем). Це дозволяє якісно підтвердити наявність шару і його збереження після випробувань.

Імітація експлуатаційного миття. Підтримання автомобіля в чистому стані неминуче передбачає миття, часто з механічним контактом мікрофібри або щітки з поверхнею. Крім того, якщо вибрати шампунь з нейтральним рН, таке тертя є джерелом абразивного навантаження. Це особливо актуально для покриттів типу гідрофобний швидкий захист, які позиціонують як такі, що полегшають догляд. Їх реальна ціна залежить від того, наскільки вони довго зберігають гідрофобність після десятків циклів миття.

Щоб відтворити ці умови, зразки багаторазово обробляють у стандартизованому режимі. Поверхню зволожують слабким нейтральним мінімальним розчином. Далі на поверхні використовують чисту мікрофібру із контрольованим зусиллям притискання (1 Н), кілька разів у прямому та зворотному напрямках. Один повний набір таких проходів утворює умовний цикл миття, а далі цикл повторюють, наприклад, 20 разів. Після кожного циклу поверхню споліскують демінералізованою водою, щоб уникнути сольових залишків, і сушать безконтактно.

Після завершення серії вимірюють контактний кут змочування, блиск і візуально аналізують виявлення характерних концентричних мікропідрипин.

#### 2.4.1 Статистична обробка експериментальних результатів

Для кожного типу покриття (А, Б, В, контроль) та кожного вимірювання (блиск, контактний кут, площа корозії тощо) обчислюються середні значення та стандартні відхилення. Вибірка з  $n \geq 5$  на групу дає можливість порівнювати не тільки середні значення, але й розкид, точну стабільність поведінки покриття.

Перевіряють нормальність розподілу (наприклад, тест Шапіро - Вілька) та порівнюваність дисперсій між групами (тест Левена). У випадку нормальності й близьких дисперсій може застосовуватися дисперсійний аналіз (ANOVA), з подальшим пост-хоком порівнянням групи (критерій Тьюкі). Якщо дані відхиляються від нормального розподілу або дисперсії суттєво різняться, використовують непараметричні тести (наприклад, Краскела-Уолліса з подальшими порівняльними порівняннями з даним із помилкою Бонферроні). Для повторних вимірювань тих самих зразків у різні моменти часу використовують повторний дисперсійний аналіз (RM-ANOVA) або змішані моделі з випадковими ефектами (випадкове перехоплення вибіркою). Окремо доцільно обчислювати показники розміру ефекту (наприклад,  $\eta^2$  або коефіцієнт Коена d), щоб оцінити не тільки факт відмінності, але й її масштаб.

Таким чином забезпечується не лише якісне, але й кількісно обґрунтоване

порівняння покриттів.

#### 2.4.2 Підготовка експериментальних даних до інтегральної оцінки

Результати, отримані описаними вище методами, мають різну фізичну природу та окремі різні вимірювання. Для порівняння покриттів за єдиним критерієм доцільно привести їх до безрозмірної масштабу [0; 1], де 1 означає найкращу поведінку серед досліджених варіантів, а 0 – найгіршу.

Нормування створення за такими правилами:

Якщо показник є чим більше, тим краще (наприклад, кут змочування, блиск після випробування, адгезійний клас 5B), використовують лінійну нормалізацію:

$$C_a = \frac{x_a - x_a^{min}}{x_a^{max} - x_a^{min}} \quad (2.1)$$

де  $x_a$  – значення показника для конкретного покриття;

$x_{max}$  – найбільше значення серед усіх покриттів;

$x_{min}$  – найменше значення серед усіх покриттів.

Якщо показник є чим менше, тим краще (наприклад, площа корозійного пошкодження після соляного туману, внутрішнього блиску)  $\Delta GU$ , втрата гідрофобності після миття,  $\Delta E^*$  колір, умовна вартість експлуатації на місяць, використання інверсії зміни:

$$C_a = \frac{x_a^{max} - x_a}{x_a^{max} - x_a^{min}} \quad (2.2)$$

Після цього бали  $C_a$  групують за блоками (корозійна стійкість, механічна стійкість, оптична стабільність, гідрофобність, технологічність/економічність). Для кожного блоку обчислюють середньогруповий показник  $C_{группак}$ . Далі будують інтегральний індекс ефективності покриття як зважена сума групових показників, де найбільшу вагу мають корозійний захист і механічну стійкість, дещо менші –

оптичну стабільність і гідрофобність, а ще нижче – технологічність і економічність. Сума ваг дорівнює 1, інтегральний індекс також лежить у межах [0; 1].

Таким чином сформовано цілісну й відтворювану експериментальну платформу для оцінки ефективності нанополімерних покриттів на кузовних панелях із типовою багатошаровою ЛФС. Обґрунтовано вибір зразків (сталь і алюмінієвий сплав), що забезпечують коректну екстраполяцію результатів на реальні елементи кузова. Формування чотирьох груп (контроль без покриття та Покриття А, Б, В) із достатньою кількістю незалежних зразків і базовою фото- та приладовою фіксацією стану  $T_0$  гарантує статистичну надійність подальших порівнянь.

Стандартизовані технологічні карти нанесення (деактивація, коригувальне полірування, знежирення, регламент аплікації, витримка/полімеризація) мінімізують вплив людського фактора та дозволяють пов'язати отримання експлуатаційних властивостей з контрольованими технологічними умовами. Водночас спеціально змодельований сценарій неякісного нанесення дає можливість оцінити технологічну толерантність системи та повну зовнішню валідність висновків для сервісної практики.

Запропонований комплекс методик вимірювання охоплює ключові механізми деградації кузова: адгезію (решітчастість надрізу), механічну стійкість (олівцева твердість, Taber), корозійну поведінку (нейтральний сольовий туман на інтактних і дефектних зонах), гідро-/олеофобність (статичні й динамічні кути, кут скочування), оптичну стабільність (блиск, DOI/туманка,  $\Delta E^*$ ) та термостійкість (УФ-експозиція, термоцикли). Введення проміжних точок контролю дає можливість оцінити не лише початковий ефект, а й збереження в часі. Додатковий контроль однорідності шару забезпечує інтерпретованість результатів у разі локальних відхилень.

Методична частина доповнена коректним планом статистичної обробки, що унеможливорює підміну ефектів випадковими флуктуаціями даних. Запропоновано техніко-економічний індикатор умовної вартості на один захист ресурсу часу  $S_{\text{суміш}}$ , який інтегрує витрати на нанесення/догляд із реальним терміном служби та

переводить лабораторні показники в площину практичної доцільності.

Ключовим результатом розділу є підготовка даних до багатокритеріального порівняння результатів через нормування показників у шкалі  $[0;1]$  і побудова зваженого інтегрального індексу ефективності (з пріоритетами: корозійний і механічний захист, оптична стабільність, гідрофобність, технологічність/економічність). Така архітектура забезпечує прозорий перехід від різномірних вимірювань до загального рейтингу.

Отже, даний розділ створює методологічно стійку основу для інтерпретації експериментальних досліджень, результати, отримані за цим протоколом, є відтворюваними, релевантними практиками сервісного нанесення й достатніми для формування обґрунтованих рекомендацій щодо вибору типу покриття залежно від сценарію експлуатації автомобіля.

### 3 АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИПРОБУВАНЬ НАНОПОКРИТТІВ РІЗНИХ ТИПІВ

На підставі визначених в попередніх розділах експериментальних методик та у відповідності до критеріїв було узагальнено результати експериментальних випробувань трьох досліджуваних покриттів (А – силоксаново-керамічне, Б – фторполімерне, В – гібридне), відповідно з еталонним зразком без додаткового захисного шару (контроль).

Для зручності інтерпретації в експериментальних дослідженнях використовуються такі умовні позначення щодо достатньої якості:

- високий рівень / найкраще значення – коли показник за критерієм є найкращим серед усіх груп;
- середній рівень – коли значення краще для контролю, але не є максимальним;
- низький рівень/найгірше значення – коли результат близький до контрольного або гірший за інше покриття.

#### 3.1 Результати випробувань покриттів А, Б, В

Адгезія до лакофарбового покриття. Після повного циклу навантаження (сольовий туман, абразивне стирання, УФ- і термоцикли) було виконано тест адгезії типу решітчастого надрізу з відривною стрічкою (таблиця 3.1) [16; 18].

Таблиця 3.1– Результати тесту адгезії та механічної стійкості

Покриття	Адгезія T <sub>0</sub> (бал 0–5B)	Адгезія після NSS48 (бал 0B–5B)	Міцність відриву T <sub>0</sub> (МПа, ±SD)	Відрив після NSS48 (МПа, ±SD)	Оліцева твердість (ASTM D3363)	ΔGU (60°) після 1000 циклів (GU, ±SD)	Втрата маси (мг, середнє±SD)
G0 (контроль)	4B	3B	4.5±0.3	3.9±0.4	2H	-25±2	28±3
A (силоксан)	5B	4B	6.5±0.4	5.5±0.5	7H	-6±1	8±1
Б(фторполімер)	4B	3B	4.8±0.4	3.8±0.5	3H	-18±2	20±2
В (гібрид)	5B	4-5B	6.0±0.3	5.6±0.4	5H	-9±1	12±2

Результати досліджень показали Покриття А має високу адгезійну міцність і стабільно оцінювалося на рівні класу, який відповідає мінімальному або відсутньому відшаруванню у полі надрізу. Це означає, що силоксаново-зшитий шар добре зв'язується з очищеним і знежиреним лаком і не має тенденції зніматися фрагментами після дії солі та перепадів температури.

Покриття В показало практично аналогічну адгезію до лаку. Відшарування носило лише локальний характер у зонах навмисно створених глибоких мікрорисок, причому краї відриву були досить гладкими, без рваного зриву плівки. Це означає, що гібридна матриця має достатню здатність до зчеплення і водночас невелику залишкову еластичність.

Покриття Б (фторполімерне) показало вищий рівень адгезії щодо А і В. У частині зразків після абразивного навантаження і багаторазового імітованого матеріалу спостерігалось часткове плямисте відривання шару, переважно на краях панелей або в місцях інтенсивного контакту. Такий результат узгоджується з тим, що фторполімерні системи орієнтовані на поверхневу змочуваність і не формують настільки жорсткого хімічного зв'язку з лаком, як силоксанові.

Контрольний зразок (без покриття) не розглядають в термінах адгезії

додаткового шару, однак важливо відзначити: на контролі після впливу солі й термоциклів з'являється зона підриву самого лаку по краях штучних сколів. У зразках з Покриттям А та Покриттям В такому крайовому підриванні лаку було менше.

За критерієм збереження цілісного шару після циклу навантаження Покриття А і Покриття В можна вважати придатними до тривалого бар'єрного захисту, Покриття Б є більш чутливим до механічного зносу і краєвих навантажень.

Щодо оцінки механічної стійкості і випробування на абразивне зношування виявлено чіткі відмінності між покриттям.

Покриття А отримало найвищі значення стійкості до подряпин. Межа, за якою починають з'являтися видимі сліди від контрольованого навантаженого грифеля, була зміщена у бік твердіших індексів. Після циклу стирання спостерігалось менше матування поверхні, а зростання площі сіткових мікрорисок було найнижчим серед усіх досліджуваних складів.

Покриття В показало проміжний рівень. Мікротвердість була нижчою, ніж у Покриття А, але вища, ніж у Покриття Б. З точки зору зносу була помірна втрата блиску, однак без різких протертих до основи зони. Це означає, що гібридна система справді працює як компроміс: вона не настільки жорстка, як класичний «керамічний» підхід, але здатна поглинути частину абразивного навантаження.

Покриття Б виявилось найменш стійким до механічних впливів. Уже після регламентованого абразивного циклу поверхня втратила яскравість, а кількість дрібних концентричних мікрорисок (типів для миття) була значно більшою. Це узгоджується з природою фторполімерних шарів: вони, як правило, тонші й еластичні, створюють поверхню слизькою і гідрофобною, але не дуже твердого зовнішнього захисного щита проти подряпин, як силоксаново-зшиті покриття.

На контрольних зразках без додаткового захисту абразивний тест дає втрату блиску та щільну мережу мікроподряпин, що підтверджує важливість будь-якого додаткового шару.

Отже за механічною стійкістю лідирує Покриття А, Покриття В демонструє прийнятний захист, Покриття Б дає мінімальний механічний бар'єр.

Змочуваність (гідро-/олеофобність і самоочищення) поверхні оцінювали через статичний контактний кут і кут скочування краплі, до і після циклу впливів (миття, сольовий туман, УФ/термоцикли). Результат експерименту наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати тесту на гідро-/олеофобність і самоочищення

Покриття	$\theta$ статичний $T_0$ (°)	Гістерезис $\Delta\theta$ $T_0$ (°)	Кут скочування $T_0$ (°)	$\theta$ після 20 миттів (°)	Гістерезис після 20 миттів (°)	Кут скочування після 20 миттів (°)	$\theta$ після UV1000 (°)
G0 (контроль)	88	20	28	82	24	32	80
A (силоксан)	108	12	15	102	18	20	98
Б (фторполімер)	118	9	8	105	14	12	96
В (гібрид)	112	10	10	107	12	12	101

За результатами експерименту Покриття Б дало найвищий початковий контактний кут і найменший кут скочування. Це означає виражений самоочисний ефект: крапля не розтікається поверхнею, а легко сходить, збираючи дрібні частинки бруду. Така поведінка зберігалася навіть після багаторазової імітації миття, хоча і спостерігалось певне поступове зниження контактного кута. Покриття Б є найкращим, для антиприлипання бруду та соляного нальоту.

Покриття В демонструвало стабільно високу гідрофобність на старті та помірно її падіння протягом експерименту. Контактні кути були трохи нижчими, ніж у Покриття Б, але залишилися в зоні, притаманній гідрофобним поверхням. Це вказує, що гібридна система не тільки механічно захищає, а й суттєво зменшує змочуваність.

Покриття А забезпечувало гідрофобний ефект, але слабший, ніж у Покриття Б і В. На старті контактний кут був вищий, ніж при контролі, однак після абразивних навантажень, після сольового туману спостерігалось помітне падіння

гідрофобності. Тобто силоксаново-керамічне покриття добре працює як твердий бар'єр, але не завжди гарантує тривалу самоочисну поведінку краплі.

Контроль мав найнижчу гідрофобність: вода і сольові розчини утворювали розливу плівку та не самоусувались із поверхні. Це означає довший контакт агресивного електроліту з лаком і металом.

Таким чином за параметром гідрофобності першим є Покриття Б, другим – Покриття В, третім – Покриття А. Це важливо для реальної експлуатації в умовах соляних реагентів: чим менше утримується соляний розчин на поверхні, тим менша ймовірність локального корозійного осередку.

Після витримки в сольовому тумані було оцінено площу корозійного ураження та характер підплівкового руйнування навколо контрольної плівки. Результат експерименту наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати корозійної поведінки у сольовому туман

Покриття	Площа корозії NSS240 (мм <sup>2</sup> , середнє±SD)	Площа корозія NSS480 (мм <sup>2</sup> , середнє±SD)	Крайова підкорозія від сколу NSS480 (мм, середнє±SD)
G0 (контроль)	45±6	90±10	3.0±0.4
А (силоксан)	6±2	12±3	0.8±0.2
Б (фторполімер)	25±4	55±7	2.1±0.3
В (гібрид)	10±3	18±4	0.9±0.2

За результатними проведених експериментів Покриття А показало найкращий результат за площею корозії. Зони корозії були невеликі, крайова підкорозія (підрив лаку від краю сколу) залишилася обмеженою. Це підтверджує, що жорсткий силоксаний шар діє як бар'єр для проникнення соляного електроліту в мікродефекти лаку.

Покриття В показало подібний за масштабом бар'єрний ефект. Хоча локально спостерігалися початкові зміни блиску межі сколу (вірогідно, через часткову

еластичну деформацію шару), глибокої крайової корозії та підриву лаку вглиб не відзначено. Для практики це означає, що гібридний шар може досить ефективно гальмувати запуск корозії навіть за механічно пошкодженій поверхні.

Покриття Б показало гіршу крайову стабільність сколу: у деяких зразків спостерігається підривання лаку на контурі дефекту і локальне потемніння. Це узгоджується з тим, що фторполімерний шар сам по собі не настільки жорсткий і не утворює мікрогерметик на краях дефекту. Однак важливо, що там, де шар Б зберігався неперервним (без попереднього нанесеного сколу), корозійних осередків майже не виникало саме через короткий контакт соляного розчину з поверхнею (ефект гідрофобності).

На контрольних зразках корозія на краю сколу була найагресивнішою: відзначено розповзання підплівкової іржі від дефекту в глиб шару лаку та локального здуття.

При моделюванні пошкодження у сценарії скол до основи краще працюють Покриття А і Покриття В (бар'єр, утримання краю). При моделюванні немає явного сколу, але є соляна експлуатація Покриття Б усунуло проблему завдяки гідрофобності, хоча і гірше захищає вже зруйновану ділянку.

Стійкість до УФ-випромінювання і термоциклів передбачає експеримент прискореного старіння (УФ, конденсація вологи, теплові коливання). Оцінювали зміну блиску, появу помутніння, мікротріщини, результат наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати перевірки стійкості до УФ-випромінювання і термоциклів

Покриття	$\Delta GU$ після УФ500 (GU, середнє $\pm$ SD)	$\Delta GU$ після УФ1000 (GU, середнє $\pm$ SD)	$\Delta E^*$ після УФ1000 (середнє $\pm$ SD)	Мікротріщини після термоциклів
G0 (контроль)	-12 $\pm$ 2	-22 $\pm$ 3	2.8 $\pm$ 0.4	Локально
А (силоксан)	-5 $\pm$ 1	-11 $\pm$ 2	1.3 $\pm$ 0.2	локально
Б (фторполімер)	-9 $\pm$ 2	-16 $\pm$ 2	1.9 $\pm$ 0.3	Немає
В (гібрид)	-6 $\pm$ 1	-10 $\pm$ 2	1.1 $\pm$ 0.2	Немає

Покриття В показало найкращу загальну стабільність вигляду. Виявлення блиску було помірним, відхилення кольору ( $\Delta E^*$ ) залишилося в межах незначних змін, а мікротріщина сітчастого типу не відсутня. Це показує, що гібридна формула забезпечує не лише гідрофобність, а й достатню еластичність, щоб не розтріскуватися при повторних термоколюваннях.

Покриття А утримало блиск на прийнятому рівні, але на окремих зразках (особливо на ділянках, моделюючих капот/зони локального нагріву) фіксували початкові мікротріщини у верхньому шарі. Вони не завжди супроводжують значну втрату блиску, але є сигналом виявленої крихкості при тривалому виконанні в умовах значних теплових градієнтів.

Покриття Б не показало розгалуженої сітки тріщин (воно еластичне), однак стабільність блиску після УФ-експозиції була гіршою. Спостерігалось помутніння і локальне матове плямування. Це означає, що фторполімерний шар добре переносить деформації, але менш стійкий до фотоокиснення і втрати оптичної прозорості згодом.

Контрольні зразки дали найбільш виражене вицвітання та матування, що імітує типову картину старіння незахищеного лаку. Втрата глибини кольору і поява знебарвлених зон після інтенсивного УФ та нагрівання.

Таким чином довготривалою оптичною стабільністю і стійкістю до поєднання УФ, температура, волога відзначається Покриття В. Покриття А має постійно блиск, але ризикує стати крихким. Покриття Б зберігає цілісність, але втрачає блиск швидше.

За результатами оцінки однорідності шару (вигляд рівномірності блиску і контактного кута по сітці вимірювань, мікроскопічний огляд) виявлено суттєву залежність якості від дотримання технологічних карт нанесення.

Для Покриття А при типовому нанесенні товщини й ефект був доволі рівномірним. Проте в умовах навмисно спрощеної підготовки одразу фіксувались плями зі зниженою гідрофобністю та вищою властивістю до локального відшарування. Це підтверджує чутливість силкоксанових систем до чистоти, знежирення і витримки.

Покриття Б виявилось менш критичним до порушення регламенту нанесення. При спрощеній підготовці поверхні одержано гідрофобний ефект. Водночас саме Покриття Б показало найменший ресурс збереження однорідності після інтенсивного миття: гідрофобність «плямами» швидше зменшувалася в зоні механічного контакту.

Покриття В виявилось як компромісне і в цьому аспекті: у типовому режимі нанесення воно давало рівномірний блиск і стабільні кути змочування. При спрощеній підготовці дефекти були меншими, ніж у Покриття А, але більшими, ніж у Покриття Б. Тобто гібридна система потребує точності, але не настільки аналітичної, як класичні керамічні композиції.

З цього випливає важливий прикладний висновок: реальна ефективність покриття залежить не лише від його формули, а й від якості сервісної процедури. Одне й те саме покриття може показувати рівень захисту преміум у регламентованих умовах і практично пересічний результат при побутовому нанесенні.

Також важливим параметром, є економічна оцінка використання покриттів відповідно до формули 1.1. В якості валюти для обрахунку використовують гривню округлено до 0,01 грн. Результати обрахунків наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати економічного обрахунку

Покриття	C_нанесення, грн	C_догляд за ресурс (оцінка), грн	T_ресурсу, міс	C_міс, грн/міс
А (силоксан)	8000	1200	24	383,33с
Б (фторполімер)	3000	1500	9	500
В (гібрид)	6000	1200	18	400

Слід звернути увагу, що при вищій початковій вартості Покриття А має нижчу вартість захисту/місяць, ніж Покриття Б, завдяки довгому ресурсу. Покриття В є компромісом між початковою ціною та довговічністю.

### 3.2 Інтегральна оцінка ефективності покриттів

З метою порівняння покриттів між собою та сформулювати практичну рекомендацію щодо вибору технології захисту кузова виникає необхідність перейти від окремих, різнорідних за природою показників (адгезія, гідрофобність, стійкість до подряпин тощо) до єдиного кількісного індексу.

Окремі критерії, отримані в розділі 3.1, мають різну фізичну природу різних, одиниці вимірювання й різну вагу з точки зору експлуатаційної важливості. наприклад:

- корозійна стійкість описують площею пошкодження,  $\text{мм}^2$ , та довжиною крайової підкорозії, мм;
- гідрофобність описують кутом змочування, градуси;
- оптичну стабільність описують зміною блиску, умовні глянцевої одиниці;
- економічну доцільність – грошовими витратами в умовах грошових одиниць за місячний ресурс.

Ці величини не можна віднести до напряму інтерпретувати. Тому кожен критерій потрібно нормувати до шкали  $[0; 1]$ , де 1 відповідає найкращому результату серед усіх покриттів, а 0 – найгіршому.

Після нормування критерії агрегують в групи за вмістом, кожній групі задається вага, а далі для кожного покриття обчислюють інтегральний індекс ефективності.

Для практичної оцінки захисного покриття кузова прийнято п'ять загальних груп критеріїв:

- Критерій антикорозійна і хімічна стійкість ( $K_1$ ). Включає стійкість у сольовому тумані/крайова підкорозія після сколу, стабільність адгезії після корозійного навантаження, збереження бар'єрної цілісності шару.

Корозія є головним фактором незворотного руйнування кузова і найбільших прямих витрат на ремонт.

- Критерій механічна стійкість ( $K_2$ ). Включає мікротвердість/опір подряпинам (тест олівцевої твердості), абразивну стійкість (Taber), блиск

збереження після абразиву.

Подряпини та матування – це початкові точки подальшої деградації, а також фактор візуального зношення автомобіля.

– Критерій оптична стабільність ( $K_3$ ). Включає зміну блиску після УФ- і термоциклів, появу/відсутність мікротріщин, зміну кольору ( $\Delta E^*$ ).

Вигляд лакофарбового покриття напряму впливає на ринкову вартість автомобіля та оцінку видимої новизни.

– Критерій гідрофобно-олеофобні властивості ( $K_4$ ). Включає контактний кут змочування, кут скочування краплі, збереження показників після миття/солі/УФ.

Гідрофобність зменшує час контакту вологи й соляних розчинів із лаком, спрощує догляд і знижує агресивність мийки.

– Критерій технологічність та економічна доцільність ( $K_5$ ). Включає чутливість до дотримання регламенту нанесення (чи «прощає» помилки), час і складність полімеризації, умовну вартість захисту на одиницю часу ресурсу  $C_{\text{суміш}}$ .

Покриття, яке працює лише в лабораторних умовах і є надто дорогим у перерахунку на місячний реальний ресурс, має меншу прикладну цінність.

Для кожної групи критеріїв задають ваговий коефіцієнт  $w_i$ , який показує відносну важливість з погляду довготривалого захисту кузова. Прийнято такі вагові коефіцієнти:

- $w_1=0,30$  для  $K_1$ , антикорозійна і хімічна стійкість;
- $w_2=0,25$  для  $K_2$ , механічна стійкість;
- $w_3=0,20$  для  $K_3$ , оптична стабільність;
- $w_4=0,15$  для  $K_4$ , гідрофобність;
- $w_5=0,10$  для  $K_5$ , технологічність та економіка.

Таким чином ваговий коефіцієнт  $w_i$  нормовано до 1.

Для кожного одиничного показника  $x_i$  (наприклад, площа корозійного пошкодження або контактний кут) обчислюють безрозмірну оцінку якості  $C_i$  в діапазоні  $0 \dots 1$ .

У кожній групі критеріїв ( $K_1 \dots K_5$ ) параметрів може бути декілька, тому для

кожної групи обчислюється середнє нормоване значення:

$$C_{\text{група}k} = \frac{1}{H_k} \sum_{i \in k} C_i \quad (3.1)$$

де  $H_k$  – кількість часткових показників в групі  $k$ .

У результаті для кожного покриття  $j$  отримують п'ять групових оцінок.

$C_{1,j}$ ,  $C_{2,j}$ ,  $C_{3,j}$ ,  $C_{4,j}$ ,  $C_{5,j}$ . Ці п'ять безрозмірних числа відображають якісне покриття для кожного з ключових напрямків.

Інтегральний показник ефективності покриття  $K_i$  для покриття  $i$  обчислюють як зважену суму групових оцінок:

$$K_i = w_1 C_{1,j} + w_2 C_{2,j} + w_3 C_{3,j} + w_4 C_{4,j} + w_5 C_{5,j} \quad (3.2)$$

Оскільки всі  $C_{k,j}$  знаходяться у межах  $[0; 1]$ , а сума  $w_i=1,00$ , то  $K_i$  також лежить у межах  $[0; 1]$ . Чим ближче  $K_i$  до 1, тим більш збалансованим і стійким є покриття з точки зору практичної довговічності, збереження зовнішнього вигляду та економічної доцільності.

Нижче наведено якісну інтерпретацію на підставі проведених в попередньому розділі експериментів та обчислень за визначеними формулами.

Покриття А :

- висока механічна стійкість,  $C_{2,A}=0,903$ ;
- добра корозійна бар'єрність у зоні сколу,  $C_{1,A} = 1$ ;
- помірна гідрофобність і зниження гідрофобності з часом,  $C_{4,A}=0,234$ ;
- ризик мікротріщин після термоциклів,  $C_{3,A}=0,792$ ;
- висока чутливість до якості нанесення і тривалої полімеризації у співвідношенні витрат до терміну служби,  $C_{5,A}=0,928$ .

У сумі вагових коефіцієнтів отримано, що Покриття А має високі складові від  $w_1$ ,  $w_2$  та  $w_5$ , але частково втрачає бал за  $w_3$  та  $w_4$ . Тобто  $K_A$  очікувано буде високим саме у моделюванні жорсткий експлуатаційний захист з контрольованим

нанесенням.

$$K_A = 0,3 \cdot 1 + 0,25 \cdot 0,903 + 0,20 \cdot 0,792 + 0,15 \cdot 0,234 + 0,10 \cdot 0,928 = 0,8121.$$

Покриття Б:

- відмінна гідрофобність і самоочищення,  $C_{4,B} = 0,900$ ;
- технологічна простота нанесення та швидке введення в експлуатацію та економічна доцільність,  $C_{5,B} = 0,511$ ;
- нижча механічна стійкість,  $C_{2,B} = 0,321$ ;
- гірша оптична стабільність після УФ/термоциклів (зниження блиску, плямування),  $C_{3,B} = 0,278$ ;
- надійна бар'єрність у випадку локальної подряпин до металу,  $C_{1,B} = 0,212$ .

Враховуючи вище зазначене Покриття Б чудово полегшує догляд і відштовхує воду, але не забезпечує максимального структурного захисту в довгостроковому сенсі.

$$K_B = 0,3 \cdot 0,212 + 0,25 \cdot 0,321 + 0,20 \cdot 0,278 + 0,15 \cdot 0,900 + 0,10 \cdot 0,511 = 0,3856.$$

Покриття В показало:

- високу стабільність зовнішнього вигляду після УФ та термоциклів, без масового утворення мікротріщин,  $C_{3,B} = 1,000$ ;
- добру адгезію та утримання бар'єрних властивостей у сольовому середовищі, включно з краями сколів,  $C_{1,B} = 0,892$ ;
- прийнятну механічну стійкість,  $C_{2,B} = 0,854$ ;
- стабільно високу, хоча й не абсолютну, гідрофобність,  $C_{4,B} = 1,000$ ;
- економічність,  $C_{5,B} = 0,857$ .

У підсумку Покриття В отримує високі значення в усіх п'яти групах одночасно, без явних недоліків, що означає, що  $K_B$  теоретично може бути найбільшим або близьким до найбільшого серед трьох покриттів.

$$K_B = 0,3 \cdot 0,892 + 0,25 \cdot 0,854 + 0,20 \cdot 1,000 + 0,15 \cdot 1,000 + 0,10 \cdot 0,857 = 0,9168.$$

В таблиці 3.6 узагальнено розглянуті показники.

Таблиця 3.6 – Узагальнені результати

Покриття	$w_1$ (0,30)	$w_2$ (0,25)	$w_3$ (0,20)	$w_4$ (0,15)	$w_5$ (0,10)	$K_i$ Інтегральний бал
А (силоксан)	1,000	0,903	0,792	0,234	0,928	0,8121
Б (фторполімер)	0,212	0,321	0,278	0,900	0,511	0,3856
В (гібрид)	0,892	0,854	1,000	1,000	0,857	0,9168

Інтегральний показник  $K_i$  не замінює окремі критерії, але дає загальну картину для прийняття рішення.

### 3.3 Практичні рекомендації щодо вибору та застосування нанополімерних покриттів

За результатами проведених експериментальних досліджень та розрахунків розроблено конкретні рішення для сервісів та споживачів щодо застосування нанополімерних покриттів. Структуровано алгоритм вибору, критерії прийняття робіт, режим експлуатації та моніторингу ресурсу, а також типові сценарії застосування з урахуванням переваг: антикорозійний захист, механічна витривалість, оптична стабільність, гідрофобність та економіка володіння.

Алгоритм вибору за умовами використання і перевагами:

– В жорстких зимових умовах, реагенти, траси, частковий абразив необхідна антикорозійна й механічна витривалість. За інтегральними балами доцільно віддати перевагу силоксаново-керамічним системам (Покриття А) або гібридним (Покриття В). Якщо мета максимальна бар'єрність і зносостійкість то Покриття А є раціональним вибором, якщо додати вимогу кращої оптичної стабільності – Покриття В забезпечує компроміс.

– Міська експлуатація, акцент на вигляд як новий, дітейлінг-догляд в якому пріоритетом є стабільний блиск і мінімальне помутніння з гідрофобністю, що не зникає після миттів. За профілем властивостей перевага у гібридного покриття

(Покриття В). Воно краще зберігає оптичні властивості і гідрофобність при збереженні достатньої корозійної стійкості.

– Швидка підготовка до продажу, бюджет швидко і помітно. Доцільно використовувати фторполімерні склади (Покриття Б), як швидкий гідрофобний/глянцевий шар з невеликими початковими витратами, приймаючи їх короткий ресурс і нижчу корозійно-механічну витривалість.

– Автопарк/службові авто з регламентним доглядом. Розумний компроміс Покриття В: чіткий баланс захист/вигляд/вартість. Для автомобілів із важкими маршрутами – частковий перехід на покриття А для критичних зон (пороги, арки, передній край капота), а Покриття В – на видимій панелі.

Об’єктивні початкові вимоги для прийняття робіт. Для виділення маркетингових рішень від фактичної якості пропонують фіксувати мінімальні показники після полімеризації та короткого прогріву ресурсу (48-72 годин):

– Адгезія (решітчастий надріз): не нижче 4В; після першого інтенсивного миття – без деградації класу.

– Гідрофобність, статичний кут  $\theta \geq 105^\circ$  для А/В і  $\geq 115^\circ$  для В на  $T_0$ ; після 20 регламентних миттів –  $\theta \geq 100^\circ$   $\theta = 100^\circ$   $\theta \geq 100^\circ$  (А/В)  $i \geq 95^\circ$  (В). Кут скочування після 20 хвилин –  $\leq 15^\circ$  (А/В) та  $\leq 20^\circ$  (В).

– Оптичні властивості, втрата блиску  $|\Delta GU_{60}|$  після 1000 циклів легкого абразиву –  $\leq 10$  GU для А/В;  $\leq 18$  GU для покриття Б. Зміна кольору після прискореного УФ ( $\Delta E^*$ ) –  $\leq 1,5$  для В/А,  $\leq 2,0$  для В.

– Економічність, умовна вартість захисту на місяць  $C_{\text{суміш}} \leq 400$  грн/міс для рішення на рік+ (Покриття А/В).

Ці пороги початкових значень дають данні, якщо основа значень для акту прийому нижчі – роботу не приймають або вимагають корекцію/перенанесення.

Принцип зонального застосування на кузові. Досвід використання показує, що різні зони кузова мають різні ризики. Доцільно застосування диференційованого підходу:

– Високоризикові ділянки (крила, пороги, передня кромка капота/даху) – рішення з максимальною бар’єрністю та зносостійкістю (Покриття А або локально

Покриття В у 2 шари).

- Видимі площини (капот, крила, двері, дах) – акцент на оптиці та збереженні гідрофобності ( Покриття В як базовий вибір).

- Пластики/сяючі молдинги – частіше використовують фторполімерне Покриття Б поверх базового захисту, щоб легше відмивати ПАР-плівки без сірої поверхні.

Таке зональне поєднання в межах одного автомобіля дає кращий баланс «захист/вигляд/вартість», ніж однорідне покриття всього кузова одним складом.

Сумісність та стратифікація шарів. На практиці розширене нашарування: базовий силоксановий чи гібридний шар (Покриття А/В)+тонкий фторполімерний шар Покриття Б як гідрофобна плівка, яку відновлюють кожні 3–6 місяців. Важливо досягти двох правил:

- Хімічна сумісність – фінішний шар повинен бути хімічно сумісним із уже полімеризованим силоксаново-керамічним покриттям: не розчиняти, не набухати і не зменшувати його твердість/адгезію.

- Алгоритми сервісу: відновлюють тільки верхній шар, базові Покриття А/В не чіпають, доки оптичні/адгезійні показники в нормі. Це дає низьку  $C_{\text{суміш}}$  при якісному вигляді.

План моніторингу ресурсу й тригери обслуговування. Рекомендований кварталний огляд з простою інструменталізацією:

- Блиск GU (60°). При зниженні від базового значення  $> 10$  GU – виконати м'яке коригувальне полірування топ-шару або реплікацію верхнього шару .

- Гідрофобність, якщо статичний контактний кут  $\theta < 100^\circ$  або кут скочування  $> 15-18^\circ$  – нанести верхнє покриття Б поверх базового шару Покриття А/В.

- Візуальний огляд. Поява локальної плям з іржі, пляма від ПАР чи легкої плівки плями накопичення плівок – потрібна дезактивація.

- Після зими необхідно обов'язково виконати знесолення підкрилків і арок, а також відновлення верхнього покриття .

Оптимальний режим догляду складається з трьох елементів:

- Миття нейтральним шампунем ( $\text{pH} \approx 7$ ), низький тиск, мікрофібра з малою

силою притискання, безконтакт, лише попереднє змочування.

– Квартальна дезактивація (залізо/бітум) на поверхнях, де видно крапкові вклучення, що знімає осередки майбутніх місць для іржі.

– Піврічний доповняють гідрофобним шаром на видимих площах та на зонах ризику – за станом.

Прийняття робіт і документообіг. Для усунення суб'єктивності при здачі/прийманні:

– Фото-карта зон до/після з однаковим світлом. Таблиця первинних величин  $GU_{60}$  (середнє з 9 точок),  $\theta$  (5 точок), вологість/температура в момент нанесення.

– Гарантійна карта з переліком тригерів обслуговування і виключення автоматичних щіток і лугів  $10pH > 10$ , розчинників.

– QR-посилання на протокол сервісу: дані, партія матеріалу, шари, час полімеризації.

Такий підхід забезпечує відповідальність між сервісом і клієнтом та полегшує планування повторних робіт.

Проведені випробування показали, як три типи покриттів поведуть при впливі на них реальних ризиків для кузова: корозія (сольовий туман і сколи), механічний знос (подряпини, абразив), зовнішній вигляд (блиск/колір після УФ і термоциклів) та збереження гідрофобності після миття. Дані зведено в інтегральний показник, який дозволяє об'єктивно порівняти різні властивості в одній шкалі.

За підсумком гібридне Покриття В показало найкращі властивості воно найменше втрачає блиск і колір, більше тримає гідрофобність, водночас дає високий рівень корозійного й механічного захисту та адекватну економіку. Силоксанове Покриття А - це жорсткий захист із найкращими показниками проти корозії та зносу і найнижчою вартістю на місяць, але гідрофобність зберігається гірше. Фторполімерне Покриття Б дає швидкий виражений водовідштовхувальний ефект, але має обмеження щодо продовження довговічності, корозійну та механічну стійкість і потребує частішого оновлення.

Практично це означає, що для споживачів логічно вибрати Покриття В (баланс вигляд/ресурс), для важких умов експлуатації – Покриття А (реагенти, траси, абразив), і за потреби додати тонкий топ-шар, для коротких задач або підготовки до продажу оптимальним є вибір Покриття Б. Щоб не втрачати захист завчасно, достатньо раз на квартал здійснювати гідроблиск і гідрофобність, своєчасно виконати перевірку легкого відновлення верхнього шару.

## ВИСНОВКИ

У роботі досліджено, як нанополімерні покриття захищають кузов автомобіля від основних чинників деградації – корозійного середовища (волога й хлориди), механічного зносу (абразив, мікроподряпини, миття) та світлотермічного старіння (УФ-вплив і термоцикли). Предметом порівняння були три типи покриттів: силоксаново-керамічне (Покриття А), фторполімерна (Покриття Б) та гібридне (Покриття В), а також контроль без захисту. Завданням було не лише показати різницю, а кількісно довести її за стандартизованими показниками та звести різномірні властивості в узагальнений індекс ефективності, придатний для практичного вибору.

Методичне дослідження базувалось на зразках зі стандартною автомобільною багатопшаровою ЛФС, підготовлених за єдиними картами технології: дезактивація, знежирення, коригувальне полірування, регламент нанесення й підтримки до повного твердіння. Далі використовували вимірювання адгезії (решітчастий надріз із бальною оцінкою та відрив у МПа), механічної витривалості (олівцева твердість, стирання із фіксацією втрати блиску в глянцевиx одиницях на геометрії 60° та втрати маси), корозійної поведінки в нейтральному сольовому тумані з наколом/сколом (динаміка поширення і крайового підриву), гідро- та самоочисних властивостей (статичний і динамічний кути змочування, кут скочування після серії регламентного миття), а також оптичної стабільності (зміна блиску  $\Delta GU$  та кольору  $\Delta E^*$  після УФ-експозиції і термоциклів).

Для коректності порівняння було витримано однакові умови, геометрію вимірювань, кількість повторів, а дані обробляли статистично. Результати нормувались у шкалі 0...1 і з вагами груп показників. Додатково було враховано простий економічний індикатор умов захисту вартості на місяць, щоб перевести ефект у площину витрат користувача.

Слід звернути увагу, що критичною для достовірності висновків була технологічна дисципліна чистота та однаковість підготовки поверхні, стабільність температури й вологості під час нанесення, повне затвердіння перед будь-яким топ-

шаром, а також хімічна сумісність верхніх топперів із базою (носії без агресивних розчинників, що не розпушують силоксанову сітку). Вимірювання оптичних властивостей проводили на одній геометрії ( $60^\circ$ ) та з фіксованою сіткою, щоб уникнути артефактів від локальної текстури. Кутові показники гідрофобності оцінювали до й після циклів миття, бо саме стабільність у часі виявляється значимою за одноразову ефективність при нанесенні. На етапі корозійних тестів ключовою була наявність контрольованого дефекту, інакше різниця між системами недооцінюється.

Отримані результати дозволили зробити обґрунтовані висновки. Гібридна система Покриття В продемонструвала найкращий баланс властивостей: мінімальні втрати блиску й кольору після УФ та термоциклів, стійку гідрофобність після серії миття, високі, хоч і не абсолютні показники адгезійно-механічної витривалості та прийняту економічну вартість. Силоксаново-керамічна система (Покриття А) виявилася найсильнішим захистом проти корозії та абразиву і водночас найвигіднішою за умовною вартістю на місяць, але гідрофобний ефект в ній спадає швидше, а локально на вразливих зонах можливе підвищення крихкості після термоциклів. Фторполімерна система (Покриття Б) дає швидкий та яскравий водовідштовхувальний ефект, легкість миття, однак програє у довговічності, оптичній стабільності та протикорозійній дії. Її доцільно розглядати як оновлений верхній шар поверх базових А/В або як короткострокове рішення, коли пріоритетний – миттєвий вигляд.

Практичний висновок полягає в тому, що для використання доцільний буде вибір Покриття В, як універсального балансу вигляд - ресурс - витрати, для важких зимових умов з реагентами та інтенсивним абразивом – Покриття А (за потреби зонально на порогах, арках і передніх кромках), а для швидких завдань або передпродажної підготовки – Покриття Б як верхній шар, який послідовно відновлюють, не торкаючись базового шару.

Основні рекомендації використання нанополімерних покриттів – квартално перевіряти блиск і поведінку краплі, успішно виконувати легке полірування верхнього шару або його реплікацію, обов'язково провести знесолення після зими.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бик М. В., Букет О. І., Васильєв Г. С. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування: навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 318 с.
2. Джурка В. В., Беляк Л. С. Полімерні композиційні матеріали: навч. посібник. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2008. – 58 с.
3. Дмитрів І., Гутаревич С., Гайдей О. Оцінка якості лакофарбових матеріалів // Вісник КРНУ. – 2023. – №3. – С. 95-103.
4. Іванов С. В., Тітова С. В., Трачевський В. В., Грушак З. В. Контроль якості лакофарбових матеріалів: підручник. – Київ : НАУ, 2017. – 452 с.
5. Іванов С. В., Самарська Т. Г. Лакофарбові матеріали цільового призначення: лабораторний практикум. – Київ : НАУ-друк, 2009. – 52 с.
6. Ластівка О. В., Гоц Л. В. Формування довговічних лакофарбових покриттів будівельних конструкцій: монографія. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2022. – 185 с.
7. Микульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів: навч. посібник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 297 с.
8. Микульонок І. О., Сокольський Я. І. Полімерні матеріали і вироби з них: термінологічний словник. – Київ : КНУТД, 2015. – 208 с.
9. Стадник Ю. Вступ до хімії полімерів: навч. посібник. – Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2010. – 80 с.
10. Стоєв О. С., Литовченко О. С., Гірка О. А., Грицина В. В. Хімічна корозія та захист металів: навч. посібник. – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2020. – 216 с.
11. Хімія лакофарбових матеріалів: конспект лекцій. – Івано-Франківськ : ПНУ ім. В. Стефаника, 2021. – 198 с.
12. Острожинський В. Є. Використання технології нанесення нанопокриття для підвищення захисних властивостей тканин: бакалавр. робота. – Київ : КНУТД, 2023. – 76 с.
13. Мяковський В. А., Велешук П. І. Удосконалення технологічного процесу

ремонту кузовних елементів автомобіля: магістер. робота. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2023. – 85 с.

14. Сучасні полімерні матеріали та їх застосування: метод. вказівки. – Одеса : НУ «ОМА», 2021. – 44 с.

15. ДСТУ EN ISO 9227:2022. Фарби та лаки. Випробування в камері сольового туману (EN ISO 9227:2017, IDT; ISO 9227:2017, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

16. ДСТУ EN ISO 2409:2022. Фарби та лаки. Випробування методом решітчастого надрізу (EN ISO 2409:2020, IDT; ISO 2409:2020, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

17. ДСТУ ISO 2813:2015. Фарби та лаки. Визначення глянцею при 20°, 60° та 85°. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.

18. ДСТУ ISO 4624:2019. Фарби та лаки. Визначення адгезії методом відриву. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.

19. ДСТУ ISO 6270-1:2022. Фарби та лаки. Випробування на дію вологості. Частина 1. Конденсація (випробування у водяному тумані). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

20. ДСТУ ISO 2808:2019. Фарби та лаки. Визначення товщини плівки. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.

21. ДСТУ ISO 2360:2017. Немагнітні покриття на немагнітних металевих основах. Визначення товщини методом вихрових струмів. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.

22. ДСТУ ISO 2178:2017. Немагнітні покриття на магнітних металевих основах. Визначення товщини магнітним методом. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.

23. ДСТУ EN ISO 8501-1:2022. Підготовка сталевих поверхонь перед нанесенням фарб і пов'язаних продуктів. Візуальна оцінка чистоти поверхні. Частина 1. Ступені іржі та ступені очищення. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

24. ДСТУ EN ISO 12944-7:2019. Фарби та лаки. Захист сталевих конструкцій від корозії за допомогою систем фарбових покриттів. Частина 7. Виконання та нагляд за фарбуванням на місці. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.

25. ДСТУ EN ISO 19403-1:2022. Фарби та лаки. Визначення змочуваності та поверхневої енергії твердих поверхонь. Частина 1. Загальні положення (EN ISO 19403-1:2020, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

26. ДСТУ ISO 1513:2014. Фарби та лаки. Дослідження та підготовка зразків. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014.

27. ДСТУ ISO 1514:2013. Фарби та лаки. Стандартні панелі для випробувань. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2013.

28. ДСТУ ISO 3251:2015. Фарби, лаки та сировина для фарб і лаків. Вміст нелетких речовин. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.

29. ДСТУ EN ISO 4628-1:2022. Фарби та лаки. Оцінювання руйнувань покриттів. Частина 1. Основні принципи та система оцінювання (EN ISO 4628-1:2016, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

30. ДСТУ ISO 4628-2:2022. Фарби та лаки. Оцінювання руйнувань покриттів. Частина 2. Оцінювання ступеня утворення пухирів (ISO 4628-2:2016, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

31. ДСТУ ISO 4628-4:2022. Фарби та лаки. Оцінювання руйнувань покриттів. Частина 4. Оцінювання ступеня розтріскування (ISO 4628-4:2016, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

32. ДСТУ EN ISO 11127-6:2024. Підготовка сталевих поверхонь перед нанесенням фарб і пов'язаних продуктів. Абразиви для струминного очищення. Частина 6. Визначення водорозчинних домішок – електропровідність екстракту. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.

33. ДСТУ EN ISO 11127-7:2024. ... Частина 7. Визначення вмісту хлоридів. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.

34. ДСТУ EN 13300:2024. Фарби та лаки. Водоемульсійні фарби для внутрішніх робіт. Класифікація. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.

35. ДСТУ EN 927-2:2024. Фарби та лаки. Покриття для деревини на відкритому повітрі. Частина 2. Вимоги до властивостей. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.

36. ДСТУ EN ISO 18314-3:2024. Фарби та лаки. Колориметрія. Частина 3. Обчислення колірних відмін. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.

37. ДСТУ EN ISO 23157:2024. Силіційорганічні сполуки. Визначення вмісту силанольних груп. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.

38. ДСТУ ISO 16474-2:2016. Фарби та лаки. Методи експонування в лабораторних джерелах світла. Частина 2. Ксенонові дугові лампи. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

39. Про стандартизацію: Закон України від 05.06.2014 № 1315-VII. – Офіц. вид. – Київ : Верховна Рада України, 2014. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1315-18> (дата звернення: 03.11.2025).

40. Про технічні регламенти та оцінку відповідності: Закон України від 15.01.2015 № 124-VIII. – Офіц. вид. – Київ : Верховна Рада України, 2015. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19> (дата звернення: 03.11.2025).

41. Про затвердження Технічного регламенту обмеження вмісту летких органічних сполук у фарбах і лаках та продукції для ремонту автомобілів: постанова КМУ від 28.04.2021 № 432. – Київ : КМУ, 2021. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/432-2021-%D0%BF> (дата звернення: 21.10.2025).

42. Мінекономіки України. Офіційні тексти національних стандартів: роз'яснення щодо публікацій. – Київ : Мінекономіки, 2024. – URL: <https://www.me.gov.ua> (дата звернення: 29.10.2025).

43. ДП «УкрНДНЦ». Інформація про втрату чинності окремих національних стандартів (ГОСТ) та заміну на ДСТУ/EN/ISO (накази 2019–2024 рр.). – Київ : ДП «УкрНДНЦ». – URL: <https://uas.org.ua> (дата звернення: 03.11.2025).