

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Удосконалення технологічного процесу контролю лакофарбового покриття з дослідженням алгоритму роботи системи контролю

Виконав: студент 6 курсу, групи МАМ-63
спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

Маріо СКОЛІО

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Андрій ТАЙЖАНОВ

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Олег ЛЯШУК

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Роман ХОРОШУН

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Зав. кафедри

Олег ЦЬОНЬ

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олег ЦЬОНЬ

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«11» листопада 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Сколіо Маріо Мікаел
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технологічного процесу контролю лакофарбового покриття з дослідженням алгоритму роботи системи контролю

Керівник роботи Ляшук Олег Леонтійович., д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 11 » листопада 2024 року № 4/7-1080

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2024

3. Вихідні дані до роботи Базовий технологічний процес контролю лакофарбового покриття

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ.
4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Причини виникнення та попередження появи дефектів при нанесенні ЛФП – 1А1.
Класифікація лакофарбових покриттів – 1А1.

Гідроабразивна установка – 1А1.

Фіксуєчий пристрій – 1А1.

Пневматичний циліндр – 1А1.

Підйомник маніпулятор – 2А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 11.11.2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	22.11.24р	
2	Технологічний розділ	29.11.24р	
3	Конструкторський розділ	04.12.24р	
4	Науково-дослідний розділ	13.12.24р	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.12.24р	
6	Оформлення графічної частини	20.12.24р	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	28.12.24р	

Студент _____
(підпис)

Сколіо Маріо Мікаел _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ляшук Олег Леонтійович _____
(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Олег ЦЬОНЬ
(підпис) (прізвище та ініціали)
«11» листопада 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Тайжанову Андрію Валентиновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технологічного процесу контролю лакофарбового покриття з дослідженням алгоритму роботи системи контролю

Керівник роботи Ляшук Олег Леонтійович., д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 11 » листопада 2024 року № 4/7-1080

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2024

3. Вихідні дані до роботи Базовий технологічний процес контролю лакофарбового покриття

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ.
4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Методи електричного зарядження фарбувальних крапель – 2А1.

Підвищення якості зображень – 1А1.

Бінаризація зображення – 1А1.

Оцінка геометричних характеристик дефектів – 1А1.

Алгоритми роботи системи контролю – 2А1.

Концепція структури системи контролю – 1А1.

Дільниця ЛФП автомобілів – 1А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 11.11.2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	22.11.24р	
2	Технологічний розділ	29.11.24р	
3	Конструкторський розділ	04.12.24р	
4	Науково-дослідний розділ	13.12.24р	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.12.24р	
6	Оформлення графічної частини	20.12.24р	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	28.12.24р	

Студент _____
(підпис)

Тайжанов Андрій Валентинович _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ляшук Олег Леонтійович _____
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Удосконалення технологічного процесу контролю лакофарбового покриття з дослідженням алгоритму роботи системи контролю».

Робота виконана на кафедрі автомобілів ТНТУ ім. І. Пулюя. Керівник кваліфікаційної роботи магістра д.т.н. Ляшук Олег Леонтійович.

Пояснювальна записка складається з п'яти розділів і 117 сторінки формату А4 та 12 аркушів формату А1 графічної частини сторінок додатків.

Ключові слова: алгоритм роботи, система контролю, якість покриття, автоматизація контролю, лакофарбові матеріали.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	10
1.1 Дослідження дефектів лакофарбових покриттів.....	10
1.2 Огляд методів ідентифікації дефектів лакофарбових покриттів.....	20
1.3 Дослідження систем виявлення дефектів лакофарбових покриттів.....	21
1.4 Огляд літератури щодо електростатичного нанесення покриттів роторними розпилювачами.....	25
1.5 Висновки та постановка завдання на кваліфікаційну роботу магістра.....	30
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	32
2.1 Аналіз структури шарів фарбового покриття автомобілів.....	32
2.1.1 Технологія нанесення конверсійного покриття.....	33
2.1.2 Технологічний процес електроосадження.....	34
2.1.3 Захисне покриття нижньої частини автомобіля.....	35
2.1.4 Кінцеві шари покриття базовий шар та прозорий лак.....	35
2.2 Електростатичний метод розпилення.....	36
2.3 Структура ВОНТ та опис фарбувальної камери.....	38
2.4 Взаємодія сил, рух фарби та повітря в ВОНТ.....	40
2.5 Розподіл розмірів крапель, створених ВОНТ.....	43
2.6 Утворення, транспортування та осадження крапель у ВОНТ.....	44
2.7 Практичні підходи до визначення розмірів крапель розпилення.....	47
2.8 Розпад і випаровування крапель.....	49
2.9 Методи електричного зарядження фарбувальних крапель.....	51
2.10 Оновлений опис конвекційної печі для автомобільної промисловості.....	53
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	57
3.1 Застосування звичайних повітряних розпилювачів.....	57
3.2 Двокомпонентні атомайзерні повітряні розпилювачі.....	58
3.3 Пристрої з великим об'ємом і низьким тиском.....	59
3.4 Розпилювачі без повітря під високим тиском.....	60
3.5 Індекс ефективності передачі фарби розпилювачами.....	62

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ.....	64
4.1 Підвищення якості зображень.....	64
4.2 Бінаризація зображень.....	73
4.3 Аналіз текстур у зображеннях.....	80
4.4 Оцінка геометричних характеристик дефектів.....	82
4.5 Алгоритми роботи системи контролю.....	89
4.6 Концепція структури системи контролю.....	97
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	102
5.1 Структурно-функціональний аналіз виникнення небезпечних ситуацій..	102
5.2 Обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці на дільниці для кузовних робіт.....	104
5.3 Оцінка потенційної аварії в цеху малярно-кузовного ремонту за попереднім аналізом небезпек.....	107
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	112
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	114
ДОДАТКИ	

ВСТУП

В умовах сучасного виробництва зростає значення забезпечення високої якості продукції, що є важливим фактором конкурентоспроможності підприємств. Одним із ключових аспектів цього процесу є контроль лакофарбових покриттів, які не лише виконують декоративну функцію, але й забезпечують захист поверхонь від корозії, механічних пошкоджень та інших негативних впливів.

Ефективність процесу контролю лакофарбових покриттів значною мірою визначається використанням сучасних технологій і методів, які дозволяють виявляти дефекти на ранніх етапах виробництва, знижувати витрати ресурсів та мінімізувати вплив людського фактору. Автоматизація та удосконалення систем контролю, зокрема впровадження алгоритмічного забезпечення, відкривають нові можливості для підвищення точності, швидкості та об'єктивності перевірок.

Актуальність цієї теми обумовлена потребою в розробці нових технологічних підходів, які сприятимуть оптимізації виробничих процесів та підвищенню якості готової продукції. Дослідження алгоритмів роботи системи контролю, їх адаптація до конкретних виробничих умов та вдосконалення технологічного процесу контролю лакофарбових покриттів дозволяють розв'язати актуальні завдання галузі.

Метою даної кваліфікаційної роботи є удосконалення технологічного процесу контролю лакофарбового покриття шляхом дослідження і впровадження сучасних алгоритмів роботи системи контролю. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати аналіз існуючих методів контролю, визначити їхні переваги та недоліки, провести моделювання та тестування алгоритмів, а також розробити рекомендації щодо їх впровадження у виробничий процес.

Результати цієї роботи сприятимуть підвищенню якості продукції, забезпеченню економічної ефективності виробництва та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Дослідження дефектів лакофарбових покриттів

На сучасному етапі розвитку технологій нанесення лакофарбових матеріалів виникнення дефектів залишається поширеною проблемою, яка може проявлятися на різних стадіях технологічного процесу. Види та особливості таких дефектів визначаються нормами, встановленими чинними стандартами. Для детального вивчення цих дефектів їх класифікація представлена у вигляді таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Основні дефекти лакофарбових покриттів

Назва	Визначення
Поглинання лакофарбового покриття	Процес, за якого фарбована поверхня частково абсорбує лакофарбовий матеріал. Цей дефект найчастіше виражається у вигляді нерівномірного розподілу блиску чи текстури, що проявляється на окремих ділянках покриття.
Проявлення рідких компонентів лакофарбового покриття	це явище, за якого окремі рідкі складники лакофарбового матеріалу піднімаються на поверхню покриття, створюючи нерівномірність його структури та властивостей.
Помутніння лакофарбового покриття	виникнення молочно-білого відтінку в прозорому лакофарбовому шарі, що спричинене процесом конденсації вологи з навколишнього середовища під час етапу сушіння.
Помутніння лакофарбового шару	процес, під час якого на поверхні покриття з'являється наліт, спричинений переміщенням окремих речовин до зовнішнього шару.
Пухирі в лакофарбовому покритті	порожнини сферичної форми, що можуть бути як закритими, так і відкритими. Їх виникнення зазвичай пов'язане з випаровуванням розчинника, яке порушує

		цілісність покриття.
Смуги лакофарбовій поверхні	на	видимі сліди, залишені пензлем або інструментом, що з'являються внаслідок недостатньої текучості матеріалу, поганої підготовки основи або дефектів у попередніх шарах покриття.
Напливи лакофарбовому шарі	в	нерівності у товщині покриття, які формуються через стікання матеріалу вниз під час сушіння, особливо якщо оброблювана поверхня розташована під нахилом чи вертикально.
Потьоки покритті	на	дрібні локальні напливи, що виникають через неконтрольоване стікання лакофарбового матеріалу, зазвичай утворюючи смуги чи краплеподібні дефекти, схожі на "сльози".
Зморшки поверхні покриття	на	деформації у вигляді складок, які з'являються під час процесу сушіння або затвердіння покриття через внутрішнє напруження матеріалу.
Кратери лакофарбовому покритті	на	невеликі округлі заглиблення, що утворюються на поверхні і зберігаються після висихання. Такі дефекти можуть бути спричинені неоднорідністю складу або умовами нанесення.
Риб'яче око лакофарбовому шарі	в	дефекти, що проявляються у вигляді невеликих кратерів, у центрі яких знаходяться сторонні частинки, що порушують однорідність покриття.
Включення сторонніх частинок у лакофарбовий шар		наявність у структурі покриття сторонніх елементів, які порушують його однорідність та знижують якість поверхні.
Переміщення барвника матеріалами	між	процес, під час якого барвник проникає з одного матеріалу в інший при їхньому контакті, що призводить до небажаних змін кольору або утворення плям на лакофарбовій поверхні.

Формування нерівностей на поверхні покриття	виникнення на лакофарбовій поверхні ділянок неоднорідної товщини, які характеризуються різними розмірами та випадковим розташуванням.
Зморшкування покриття	дефект, який проявляється у вигляді глибоких зморшок чи складок на поверхні, що зазвичай виникає як результат попереднього утворення нерівностей.
Вздування лакофарбового шару	процес, за якого покриття набухає, розм'якшується або відшаровується від основної поверхні. Це може статися під час нанесення наступного шару або через вплив агресивних розчинників.
Формування дрібних пор на покритті	наявність у лакофарбовому шарі крихітних порожнин, які нагадують проколи, зроблені гострим предметом, і створюють відчуття шорсткості.
Тріщини у лакофарбовому шарі	розриви, що з'являються у висохлому покритті, зазвичай через внутрішні напруження чи зовнішні механічні впливи.
Текстура "апельсинової шкірки"	поверхнева структура покриття, яка своєю формою нагадує текстуру шкірки апельсина, що є наслідком порушення рівномірності нанесення матеріалу.
Плямистість покриття	візуальний дефект, що характеризується нерівномірним відбиттям світла на окремих ділянках поверхні, через що вони контрастують із навколишніми зонами.
Неоднорідність забарвлення	хаотичний розподіл кольору або блиску на поверхні покриття, що викликає нерівномірність його зовнішнього вигляду.
Механічні подряпини на покритті	лінійні пошкодження або заглиблення, які виникають внаслідок контакту поверхні з гострими предметами або абразивами.

Виявлені дефекти мають різноманітне походження і можуть виникати на різних стадіях технологічного процесу нанесення лакофарбового покриття. Їх

поява також можлива під час транспортування кузовів або на етапах складання автомобіля. Для більш детального розуміння розглянемо основні причини виникнення найпоширеніших дефектів, які становлять до 97% від загальної кількості вад лакофарбових покриттів.

На рисунку 1.1 представлений дефект, відомий як «білявість». Головними чинниками, що спричиняють його появу, є неправильний вибір технології розпилення, недотримання оптимальних умов нанесення покриття та некоректне налаштування обладнання для фарбування.



Рис.1.1. Дефект білість

На рисунку 1.2 представлено дефект, відомий як Включення. Його виникнення може бути спричинене такими чинниками: невдалий вибір способу розпилення, недотримання технологічних параметрів під час нанесення, некоректне налаштування обладнання, а також технічні несправності фарбувальних установок, викликані їхнім незадовільним станом або поломками.



Рис. 1.2. Дефект Включення.

На рисунку 1.3 представлено дефект Вздування. Причини його виникнення пов'язані з такими факторами: несумісність хімічних компонентів покриття, що не відповідають встановленим технічним нормам, а також

помилки у виборі способу розпилення, порушення параметрів нанесення покриття та неточні налаштування обладнання для фарбування.



Рис. 1.3. Дефект, відомий як взбухання.

На рисунку 1.4 зображено дефект під назвою кратери. Виникнення цього дефекту зазвичай обумовлене кількома факторами, серед яких: невідповідний підхід до вибору методу нанесення фарби, недотримання технологічних параметрів процесу, некоректне налаштування обладнання. Крім того, причиною можуть бути збої у функціонуванні фарбувального устаткування, що виникають через його незадовільний технічний стан або механічні несправності.



Рис. 1.4. Дефект під назвою кратери.

На рисунку 1.5 відображений дефект міграція. Цей дефект зазвичай виникає через ряд технологічних порушень. Зокрема, проблеми можуть виникнути через неправильне знежирення поверхонь, коли використовуються знежирювальні засоби нижчої якості. Також помилки в процесі шпатлювання, як-от використання матеріалів, що не задовольняють технічні специфікації, можуть спричинити такий дефект. Невідповідність технічним стандартам затверджувачів, розчинників і добавок також сприяє появі цієї проблеми.



Рис. 1.5. Дефект міграція.

На рисунку 1.6 представлений дефект, який називається "наплив". Цей дефект може виникати з кількох причин: застосування затверджувачів, розчинників та добавок, які не відповідають встановленим технічним критеріям, вибір непідходящих матеріалів та умов їх застосування; неправильний метод розпилення, недотримання правил нанесення покриття, неправильна настройка обладнання. Ці фактори спричиняють виникнення нерівностей та перепадів на поверхні, що значно знижує якість фінішного покриття.



Рис. 1.6. дефект наплив.

На рисунку 1.7 зображено дефект неоднорідне забарвлення. Цей дефект з'являється через ряд технічних недоліків у процесі фарбування, включаючи використання хімічних засобів, таких як затверджувачі, розчинники та добавки, які не відповідають встановленим стандартам. Неправильний вибір хімічних складів та умов їхнього використання, а також помилковий метод розпилення фарби і порушення умов її нанесення є додатковими чинниками, які спричиняють цей дефект. Некоректно налаштоване обладнання та його технічні несправності також можуть призвести до неоднорідного забарвлення.



Рис. 1.7. Дефект неоднорідне забарвлення.

На рисунку 1.8 представлено дефект, який називається оспини. Цей дефект виникає внаслідок кількох основних факторів: хімічна несумісність компонентів покриття, які також не відповідають технічним нормам; вибір невідповідного методу розпилення, порушення процедури нанесення, а також неправильне налаштування обладнання, що використовується для нанесення покриття.



Рис. 1.8. дефект оспини.

На рисунку 1.9 представлений дефект помутніння. Причини цього дефекту багатогранні: використання затверджувачів, розчинників та добавок, які не відповідають стандартам якості, неправильний підбір хімічних складів та умов їх використання. Також до виникнення дефекту може призвести неправильний метод розпилення, порушення процедур нанесення матеріалу, а також неправильне налаштування та обслуговування обладнання.



Рис. 1.9. Дефект з назвою помутніння.

На рисунку 1.10 зображено дефект пористість. Цей дефект зазвичай виникає через кілька причин: недотримання правильної технології при шпатлюванні, використання шпаклювальних матеріалів, які не відповідають стандартам; застосування затверджувачів, розчинників та добавок, що також порушують технічні норми, невідповідність обраних складів та умов їх застосування; невдале вибрання методу розпилення, порушення процесу нанесення, а також помилки у налаштуванні обладнання.

Рисунок 1.11 демонструє дефект під назвою пузир. Основні причини його формування пов'язані з недотриманням процедур знежирення та використанням недостатньо якісних знежирювачів. Додатково, проблеми в техніці шліфування через невідповідні абразивні матеріали, а також використання невідповідних затверджувачів, розчинників та добавок сприяють появі цього дефекту. Порушення у виборі методів розпилення, некоректне налаштування обладнання та його технічні несправності також вносять свій вклад у формування "пузирів".



Рис. 1.10. Дефект пористість.



Рис. 1.11. дефект під назвою пузир.

Рисунок 1.12 відображає дефект розтріскування. Цей дефект виникає через порушення у технології знежирення та використання некваліфікованих знежирювальних засобів. Несприятливий вибір хімічних компонентів, таких як затверджувачі, розчинники та добавки, що не відповідають технічним нормам,

також може призвести до розтріскування. Неправильний метод розпилення та недотримання необхідних умов нанесення фарби, а також помилки в налаштуванні обладнання посилюють ризик виникнення цього дефекту.



Рис.1.12. Дефект розтріскування.

Рисунок 1.13 демонструє дефект зморшкування. Цей дефект може виникати через кілька основних факторів: хімічна несумісність між компонентами покриття, яка порушує їхню взаємодію і веде до недотримання технічних вимог; порушення процедур знежирення поверхні, що впливає на адгезію покриття; використання затверджувачів, розчинників та інших хімічних добавок, які не відповідають встановленим стандартам. Додаткові фактори включають неправильний вибір методу розпилення, недотримання технічних умов нанесення, а також некоректне налаштування фарбувального обладнання, що може спричинити дефекти на поверхні.



Рис.1.13. Дефект зморшкування.

Рисунок 1.14 демонструє дефект подряпина. Цей дефект з'являється через кілька ключових факторів: несумісність хімічних компонентів покриття, що не відповідають стандартам якості; невідповідний вибір техніки розпилення, порушення технічних процедур при нанесенні покриття та неправильне налаштування обладнання. Додатково, пошкодження можуть виникати під час транспортування або в процесі збірки, що також сприяє формуванню подряпин.

Ці чинники не тільки погіршують зовнішній вигляд продукту, але й можуть впливати на його довговічність та функціональність.



Рис.1.14. Дефект подряпина.

Рисунок 1.15 демонструє дефект під назвою шагрень. Такий дефект часто виникає через застосування хімічних компонентів, зокрема затверджувачів, розчинників та добавок, які не відповідають встановленим стандартам якості. Неправильний вибір матеріалів та умов їхнього використання також може спричинити виникнення цього типу дефекту. Крім того, помилки в методі розпилення, порушення процесу нанесення та некоректне налаштування обладнання є значними факторами, що призводять до появи шагреневої текстури на поверхні.



Рис.1.15. Дефект шагрень.

Після аналізу доступних даних щодо потенційних дефектів лакофарбових покриттів були зроблені наступні висновки. Розроблювана система має уникати будь-якого механічного, хімічного чи іншого впливу на покриття, який міг би спричинити його пошкодження. Система повинна автоматизувати процес ідентифікації дефектів на поверхні. Вона також має бути здатною точно визначати геометричні параметри дефектів з мінімальним розміром 0,1 мм, незалежно від кута перегляду. Для ефективного раннього виявлення причин появи дефектів необхідно інтегрувати функцію їх класифікації. У цьому розділі

були розглянуті типові дефекти лакофарбового покриття та виявлені найбільш часті серед них. На цій основі були сформульовані технічні специфікації для системи контролю.

1.2 Огляд методів ідентифікації дефектів лакофарбових покриттів

Сучасні підходи до контролю дефектів лакофарбових покриттів включають візуальні, інструментальні та оптичні методи. Виробнича практика найчастіше вдається до візуального контролю через його простоту у виконанні та відсутність потреби у складному обладнанні. Процес полягає в огляді поверхні візуально та за допомогою дотику, якщо це потрібно, здійснюваний кваліфікованим інспектором. Такий підхід дозволяє не тільки виявити дефекти, але й, за необхідності, класифікувати їх. Втім, метод має значні недоліки, зумовлені людським фактором: він належить до категорії робіт з високими вимогами до зорового навантаження, що може спричиняти втому, напруження сенсорних систем та емоційне перевантаження. Це, у свою чергу, знижує продуктивність робочого процесу та об'єктивність результатів. До того ж, для точного визначення та класифікації дефектів від інспектора вимагається високий рівень кваліфікації.

Сучасні підходи до виявлення дефектів у лакофарбових покриттях включають застосування інструментальних методів, які розширюють можливості традиційного візуального контролю. В якості інструментів використовуються різноманітні технічні засоби, головною метою яких є спрощення процесу пошуку та ідентифікації дефектів. Серед таких інструментів можна виділити інспекційні дзеркала, цифрові USB-мікроскопи, мікроскопи поверхонь, стрічки для визначення запиленості, набір Бресле, ультрафіолетові ліхтарики, тестери амідної випаровуваності, а також різноманітні еталони. Цей підхід дозволяє здійснювати як якісну, так і кількісну оцінку стану покриття і характеризується вищою об'єктивністю результатів. Проте, методика має недоліки: низька продуктивність процесів контролю, необхідність залучення висококваліфікованих фахівців та зростання вартості

контрольних процедур. У виробничих умовах цей метод часто застосовують як доповнення до візуального контролю при аналізі складних випадків.

Метод оптичного контролю базується на використанні оптичних властивостей лакофарбового покриття. Оптичні прилади, які використовуються в цьому методі, засновані на фізичних ефектах, таких як інтерференція, тіньова проекція, рефлектومتрія, муарові смуги та інші. Ці технології забезпечують високу точність виявлення різних видів дефектів. Тим не менш, складність технічної реалізації та висока вартість обладнання є значними недоліками методу. Зазвичай, за допомогою одного оптичного приладу неможливо визначити весь спектр можливих дефектів. Більшість приладів також мають обмеження за площею контролю, що значно уповільнює та ускладнює процес перевірки.

Сучасний розвиток технологій активно спрямований на удосконалення засобів контролю на основі оптико-електронних систем. Основою для цих систем служать цифрові камери та техніки цифрової обробки зображень. Застосування цього методу контролю характеризується технічною простотою впровадження, однак вимагає вирішення комплексних наукових та технічних проблем, зокрема у сфері обробки даних зображень. Такий підхід демонструє значний потенціал і динамічно розвивається, що зумовлено його здатністю ефективно поєднувати ефективність і адаптивність візуальних методів з точністю та неупередженістю, які характерні для інструментальних та оптичних методів перевірки.

1.3 Дослідження систем виявлення дефектів лакофарбових покриттів

Оглянемо перспективні системи для виявлення дефектів лакофарбових покриттів, використання яких є доцільним у промислових умовах. Серед найбільш вживаних приладів варто виділити глосметри. Схематичне зображення цього устрою представлено на рисунку 1.16.

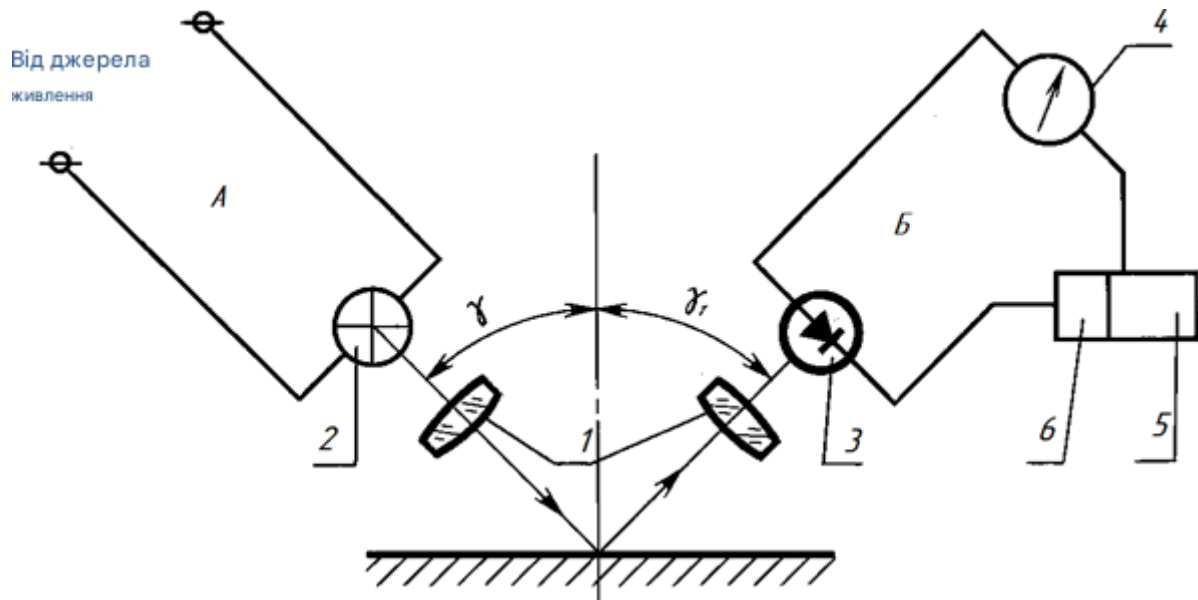


Рис. 1.16. Схема фотоелектричного глос метра.

Розглядаючи передові системи контролю дефектів лакофарбового покриття, придатні для застосування у виробничих умовах, важливо відзначити широке використання глосметрів, зображення одного з таких пристроїв представлено на рисунку 1.16.

Цей прилад сконструйовано з двох тубусів, А та Б, в яких розташовані ключові елементи: оптична система 1, освітлювач 2, фотоприймач 3, вимірювальний прилад 4, підсилювач 5 та пристрій для налаштування електричної схеми 6. Принцип роботи базується на фотоелектричному ефекті: світло від освітлювача проходить через оптичну систему в тубусі А під заданим кутом γ , відбивається від контрольованої поверхні під кутом γ_1 , і далі потрапляє в фотоприймач через оптичну систему тубуса А. Сигнал, отриманий від фотоприймача, обробляється за допомогою вимірювального приладу та підсилювача. Регулювання системи здійснюється через спеціалізоване пристосування для налаштування електричної схеми. Результатом є вимірювання кількості відбитого світла, на основі якого роблять висновок про стан покриття. Хоча прилад і простий у використанні, його основні недоліки полягають у неможливості кількісного аналізу виявлених дефектів та обмеженості у виявленні дефектів через особливості фізичного принципу роботи.

На рисунку 1.17 представлено діагностичний комплекс для автоматизованого контролю лакофарбового покриття, який спеціалізується на виявленні дефектів таких як білість, розтріскування, взбухання, пузир. Цей комплекс є важливим інструментом у забезпеченні якості покриттів завдяки своїм розширеним діагностичним можливостям.



Рис. 1.17. Схема діагностичного комплексу для автоматизованого контролю лакофарбового покриття.

Цей діагностичний комплекс сконструйовано з елементів, які включають пристрій з антенами 1 і вібраторами 2, пов'язаними через підсилювачі 4 з узгоджувальним пристроєм 6. Це узгоджувальне пристрій пересилає сигнал до пристрою введення, виведення параметрів та внутрішнього діагностування 8, яке забезпечує подальшу обробку сигналу на персональному комп'ютері зі спеціалізованим програмним забезпеченням 9. Електромагнітне поле генерується за допомогою системи, що складається з пристрою збудження електромагнітних хвиль 7, генератора СВЧ енергії 5 та керуючого пристрою 3. Робота цього устрою заснована на створенні генератором 5 електромагнітного поля уздовж покриття, де приймальні вібратори 2 фіксують напруженість хвиль поля. Приймальний вібратор послідовно переміщується вздовж контрольованої поверхні, здійснюючи виміри напруженості поля в кожній новій точці, що дозволяє формувати загальний розподіл напруженості поля. Будь-яке відхилення від нормального закону розподілу у конкретній точці вказує на наявність дефектів. Однак комплекс має обмеження: він не дозволяє отримати кількісні характеристики всіх типів дефектів і має обмежену швидкодію. Пристрій заснований на магнітооптичному методі контролю, представлений на рисунку 1.18, призначений для виявлення дефектів лакофарбового покриття.

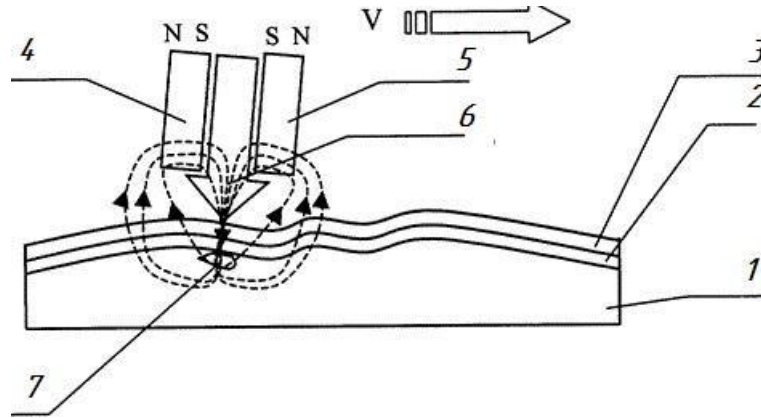


Рис. 1.18. Схема апарату на основі магнітооптичного методу контролю.

Методика роботи цього пристрою базується на наступному принципі: на поверхню деталі 1 із нанесеним лакофарбовим покриттям 2 монтується магнітний елемент 3. За допомогою сталевих магнітів 4, 5 і концентратора 6 формується магнітне поле в області перевірки. Коли це джерело переміщується вздовж контрольованої поверхні, зміни у розподілі магнітного поля в разі виявлення дефекту фіксуються за допомогою вимірювального обладнання. Головна проблема цього пристрою полягає у відсутності інформації про кількісні характеристики виявлених дефектів та складності їх класифікації.

Окрім того, цей апарат використовує контактний метод контролю, що обмежує його застосування на деяких поверхнях кузова автомобіля. З урахуванням здійсненого аналізу можна дійти висновку, що існуючі методи та системи контролю мають значні недоліки: низьку достовірність отриманих даних, обмежену швидкість роботи, складність класифікації дефектів та відсутність кількісних показників виявлених дефектів. Враховуючи це, найбільш обіцяючим є розробка оптико-електронної системи, заснованої на використанні цифрових камер та методів цифрового аналізу зображень. Така система є безконтактною і забезпечить високу продуктивність, точність і об'єктивність контролю. [3]

У цьому розділі, на основі аналізу існуючих методів і систем контролю дефектів лакофарбового покриття, виявлено найперспективніші підходи, враховано їх недоліки і запропоновано застосування схеми безконтактною системи контролю на основі цифрової обробки зображень.

1.4 Огляд літератури щодо електростатичного нанесення покриттів роторними розпилювачами

Дослідження, спрямовані на аналіз процесів нанесення покриттів із використанням електростатичних розпилювачів із обертовим дзвоном, відіграють важливу роль у підвищенні ефективності передачі фарби та зменшенні витрат матеріалів. Упродовж останніх років застосування у сфері автомобільного та аерокосмічного виробництва набуло значного розвитку завдяки високій продуктивності атомізації та досягненню до 90% за ідеальних умов. Сучасні вдосконалені конструкції ERBS, які забезпечують рівномірність нанесення плівки та оптимальні характеристики просторової атомізації, активно впроваджуються в автомобільній промисловості. Їхнє використання дозволяє суттєво скоротити витрати фарби та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище (Akafoah та ін., 2016). У той же час, у порошковій індустрії та процесах сушіння розпилення ВОНТ залишаються маловикористовуваними (Kuhnhenh та ін., 2018).

Цей підрозділ зосереджений на теоретичних, числових і експериментальних дослідженнях, присвячених електростатичним розпилювачам із обертовим дзвоном. Основні аспекти, які розглядаються:

Формування, розпад і транспортування крапель (Ellwood і Braslaw, 2020).

Процес електричного зарядження (O'Rourke і Amsden, 2000; Viti та ін., 2010; Godeke та ін., 2021).

Розподіл розмірів крапель у струмені (Frost, 1981; Liu та ін., 1998; Wilson та ін., 2018; Darwish Ahmad та ін., 2018; 2019; Oswald та ін., 2019).

Hines (1966) здійснив вимірювання розмірів та специфічних зарядів крапель, які утворюються під час розпилення, використовуючи обертові чашки з одним струменем у рамках експериментів на підприємстві Ford. Його дослідження стали фундаментом для розуміння впливу робочих параметрів на якість фарбувального шару.

Bell і Hochberg (1981) провели перший масштабний аналіз процесу металевого електростатичного нанесення покриттів. Вони вивели залежність

середнього розміру крапель від швидкості обертання дзвона, напруги на чашці, в'язкості рідини та швидкості її подачі.

Ellwood і Braslaw (1998) застосували двофазну модель потоку для моделювання зовнішнього електростатичного розпилення. Їхні дослідження показали, що електричне поле та співвідношення заряду до маси мають вирішальне значення у формуванні крапель, визначенні їхніх траєкторій і рівня осадження на поверхні. [26]

Ім (1999; 2001; 2004) досліджував технічні особливості функціонування електростатичних розпилювачів із обертовим дзвоном (ERBS). Він вивчав характеристики розмірів і швидкості крапель водорозчинної фарби, утворених під час розпилення, за різних робочих умов. Дослідження охоплювали такі параметри, як обсяг подачі рідини, швидкість формувального повітря, частота обертання дзвона та рівень прикладеної високої напруги. Результати показали, що частота обертання дзвона є ключовим фактором: її збільшення сприяє утворенню менших за розміром крапель і зменшенню діаметра конуса розпилення.

Також було виявлено, що малюнок розпилення значною мірою залежить від швидкості подачі фарби та рівня прикладеної напруги. Вищі значення напруги забезпечували щільніший і рівномірний розподіл крапель у центральній зоні конуса розпилення. Збільшення швидкості подачі рідини розширювало форму конуса, тоді як підвищення швидкості формувального повітря спричиняло його звуження.

На рисунку 1.19 показано, як основні параметри роботи ВОНТ впливають на загальну форму малюнка розпилення. Для демонстрації використано модель Behr Eso-bell із дзвоном діаметром 55 мм, оснащеним зубчастим краєм (марка 55S). Зображення було отримано за допомогою дзеркальної камери з витримкою 33,3 мс (Im et al., 2001). У рамках досліджень Ім та його колег (2001; 2004) значна увага була приділена процесу електричного зарядження крапель, зокрема застосуванню зовнішніх електродів для створення стабільного електричного поля (див. Рис. 1.19). Однак механізми розпаду крапель, їх коалесценція та взаємодія з потоком повітря залишаються недостатньо вивченими. [1]

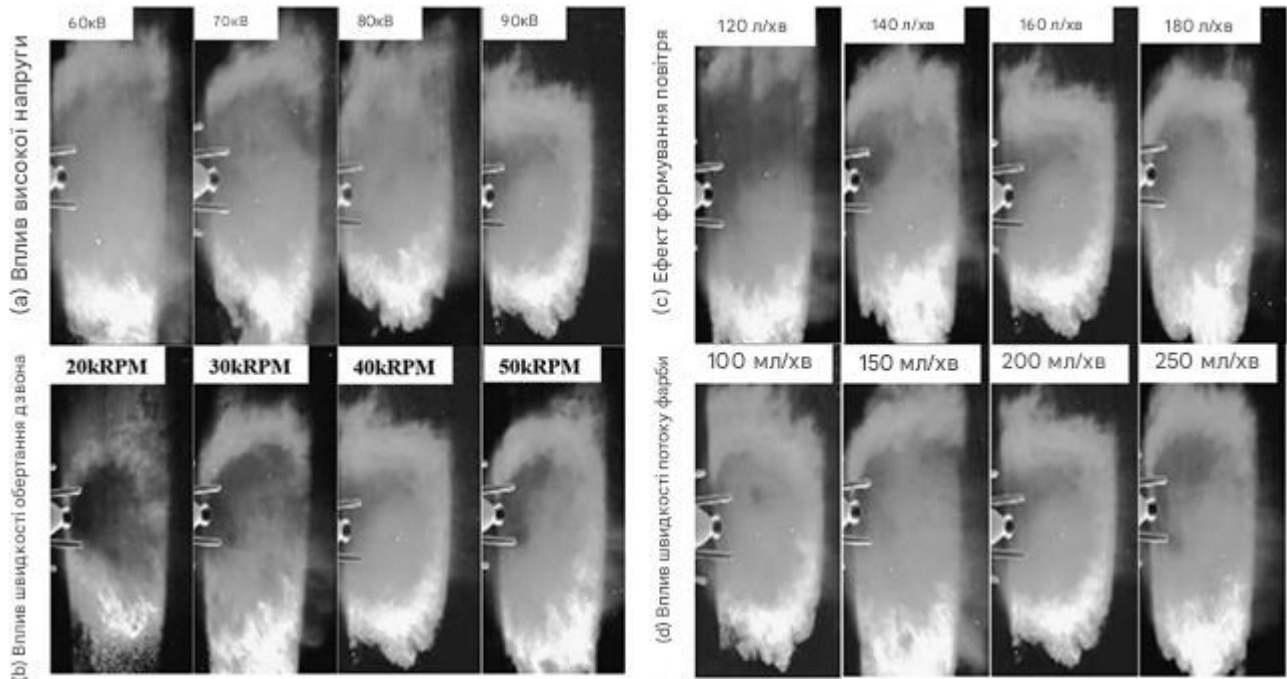


Рис. 1.19. Аналіз впливу чотирьох основних робочих параметрів на формування малюнка розпилення, отриманого за допомогою ERBS (Behr Eco-bell, діаметр дзвона 55 мм, зубчастий край, модель 55S):

(а) рівень високої напруги (60–90 кВ), (б) частота обертання дзвона (20–50 тисяч обертів за хвилину), (с) швидкість потоку формувального повітря (120–180 літрів на хвилину), (д) обсяг подачі рідини (100–250 мілілітрів на хвилину).

Белл і Хохберг (1981) запропонували емпіричну модель, яка встановлює залежність між основними робочими параметрами та середнім розміром крапель ($\bar{D}_p$), утворених під час розпилення за допомогою ERBS. Ця модель дозволяє передбачити середній діаметр крапель залежно від умов роботи.

$$\bar{D}_p = f(V_{\text{Cup}}, \omega, \dot{V}_L, \mu_L) = C V_{\text{Cup}}^{-0.2} \omega^{-0.7} \dot{V}_L^{0.4} \mu_L^{-0.2}. \quad (1.1)$$

Ця емпірична формула базується на таких ключових параметрах, як напруга на дзвоні (V_{Cup}), частота обертання чаші дзвона (ω), обсяг подачі рідини ($\dot{V}_L$) та в'язкість розпилюваного матеріалу (μ_L), які розглядаються як основні фактори, представлені на Рис. 17. Константа (C) визначається конструкцією та геометрією використовуваної чаші дзвона (Colbert, 2007).

У роботі Ahmed і Youssef (2012) наведено детальний перелік емпіричних залежностей, що враховують вплив цих параметрів на середній розмір крапель, сформованих ротаційними дисковими атомайзерами. Ці дані мають велике

значення для більш глибокого розуміння процесів розпилення та вдосконалення існуючих конструкцій. Наприклад, Каяно та Камія (1978) запропонували формулу для визначення середнього розміру крапель, утворених ротаційним диском, яка має такий вигляд:

$$d_{32} = 2.0D^{-0.69}\omega^{-0.79}\dot{V}_L^{0.32}\mu_L^{0.65}\sigma^{0.26}\rho^{-0.2}. \quad (1.2)$$

Застосували метод скінченних елементів у поєднанні з лагранжевим підходом для аналізу траєкторії крапель фарби під впливом електричних полів. Їхні результати показали, що наявність просторового заряду впливає на ефективність передачі та товщину фарбувальної плівки. Пізніше Тольїч (2010) виконав тривимірне моделювання електростатичного розпилення та встановив, що збільшення середнього співвідношення заряду до маси підвищує ТЕ. У розпиленні з ширшим розподілом розмірів більші краплі несли більше заряду, що призводило до вищої ефективності передачі.

Вони здійснили аналіз точності моделювання процесу розпилення для плоскої рідинної поверхні та складної динаміки розпилення дизельного палива. Рей та ін. (2019) запропонували універсальну модель, яка дозволяє прогнозувати швидкість випаровування крапель, діаметр рідинних зв'язків і розмір крапель води та прозорого лаку, застосовуючи розпилювач із ротаційним дзвоном. Завдяки цій моделі стало можливим вдосконалити параметри сопел і скоротити кількість випарованої рідини, що сприяє зменшенню забруднення повітря - важливого екологічного завдання.

На рисунку 1.20 представлено карту основних факторів, що впливають на процес атомізації та швидкість осадження під час електростатичного нанесення покриттів за допомогою високошвидкісного розпилювача з ротаційним дзвоном. Для успішної реалізації цього процесу слід враховувати п'ять ключових аспектів: геометрію установки, фізико-хімічні характеристики рідкої фарби, структуру електричного поля, швидкість обертання дзвона та властивості потоку формувального повітря.

Аналіз літератури підтверджує, що швидкість обертання дзвона, інтенсивність потоку формувального повітря, рівень високої напруги та

швидкість подачі рідини є основними робочими параметрами, які суттєво впливають на структуру струменя розпилення при використанні ВОНТ (див. рис. 1.19). Разом з тим, ефективна експлуатація ВОНТ вимагає оптимального поєднання параметрів, таких як геометрія фарбувальної камери, форма та розміри об'єкта, конструктивні особливості ВОНТ (зокрема, діаметр чаші дзвона, кут і форма краю, структура електродів) (див. рис. 1.20), а також умов навколишнього середовища. Всі ці фактори визначають ефективність передачі, рівномірність і якість фарбувальної плівки, її товщину та розподіл.

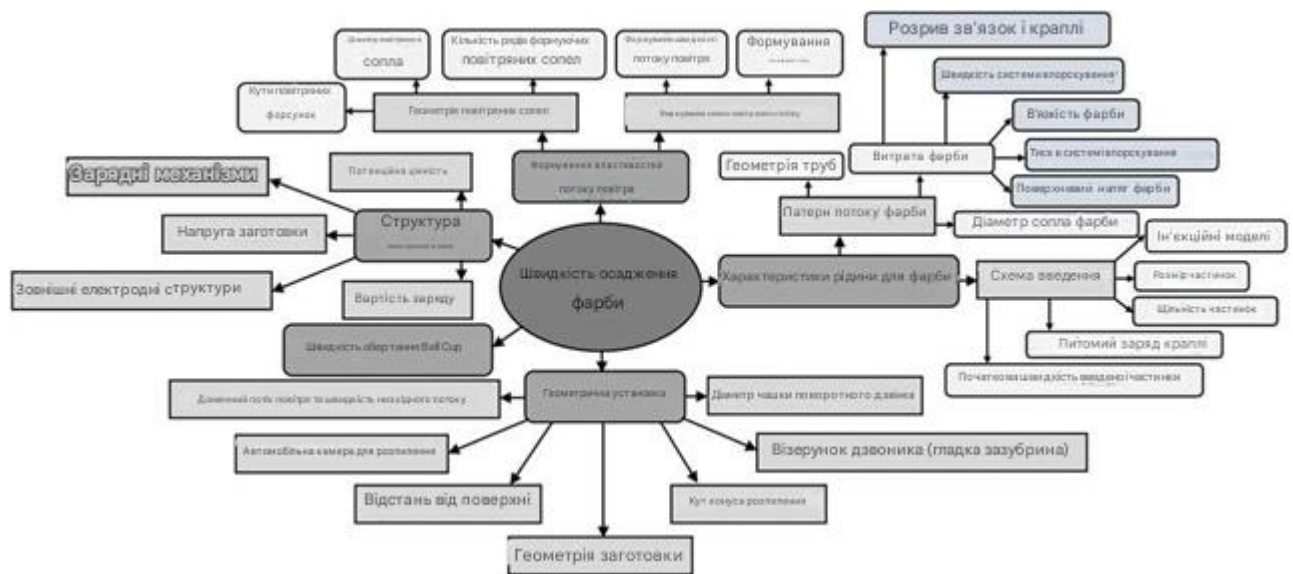


Рис. 1.20. Карта ключових факторів, що впливають на ефективність процесу електростатичного нанесення покриття із використанням високошвидкісних ВОНТ.

Математична модель електростатичного розпилення поєднує в собі методи Ейлера (для моделювання повітряного потоку та електричного поля) і Лагранжа (для моделювання крапель фарби). Для розрахунків параметрів повітряного потоку використовуються стисливі рівняння Нав'є–Стокса. У цьому розділі описано числове моделювання основних етапів процесу: руху крапель, випаровування, розпаду, а також формування електричного поля та створення фарбувальної плівки. [33]

1.5 Висновки та постановка завдання на кваліфікаційну роботу магістра

Провести дослідження послідовності шарів фарбового покриття та їхніх властивостей. Оцінити характеристики кожного шару: конверсійного, електроосадження, захисного, базового та прозорого. Визначити взаємозв'язок між технологіями нанесення та довговічністю покриття.

Розробити рекомендації для використання електростатичного методу розпилення в умовах виробництва. Оцінити ефективність електростатичного нанесення для зменшення втрат фарбувального матеріалу. Розробити схему фарбувальної камери з урахуванням розташування обладнання.

Визначити основні параметри функціонування фарбувальної камери. Проаналізувати вплив аеродинамічних сил на процес розпилення. Дослідити динаміку руху фарбувальних крапель у камері.

Оцінити вплив параметрів розпилення на розмір крапель і рівномірність покриття. Провести розрахунки розподілу розмірів крапель у реальних умовах виробництва.

Застосувати методи тіньової фотографії або інфрачервоної термографії для аналізу крапель. Визначити оптимальні умови для отримання однорідного розподілу крапель.

Моделювати процеси розпаду та випаровування крапель для визначення оптимальної температури сушіння.

Проаналізувати ефективність внутрішнього та зовнішнього методів зарядження для різних типів фарб.

Розробити модель конвекційної печі з детальним описом зон нагрівання, витримки та охолодження. Визначити оптимальні температурні режими для різних фарбувальних покриттів.

Порівняти конструктивні особливості повітряних, двокомпонентних та безповітряних розпилювачів. Оцінити їх продуктивність і доцільність застосування для різних типів фарб.

Визначити переваги та недоліки кожного типу розпилювачів. Надати рекомендації щодо вибору обладнання для конкретних умов роботи.

Покращити якість зображень дефектів фарбування для подальшого аналізу. Розробити алгоритми бінаризації та текстурного аналізу.

Визначити геометричні характеристики дефектів фарбування. Створити систему оцінки якості фарбування на основі аналізу зображень.

Розробити концепцію автоматизованої системи контролю дефектів. Запропонувати алгоритми, які забезпечують швидке та точне виявлення проблем.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз структури шарів фарбового покриття автомобілів

Процес формування шарів фарбового покриття є важливим етапом у виробництві автомобілів, адже на нього припадає близько 10% загальних витрат, з яких половина пов'язана із споживанням енергії. Цей процес базується на хімічних реакціях, що протікають безпосередньо на поверхні матеріалу. Фарба наноситься у вигляді шарів, що знаходяться між основним металом кузова та зовнішнім покриттям.

Як відображено на рисунку 2.1, структура фарбового покриття сучасного автомобіля складається з п'яти ключових шарів: конверсійного покриття, основу якого переважно формують фосфатні сполуки; шару електрохімічного осадження (ED); захисного шару для днища автомобіля (UBC); ґрунтового шару і верхнього покриття, що об'єднує базовий шар та прозорий лак. Кожен із цих елементів характеризується певною товщиною, фізико-хімічними властивостями та виконує специфічні функції, пов'язані із забезпеченням захисту та естетики.

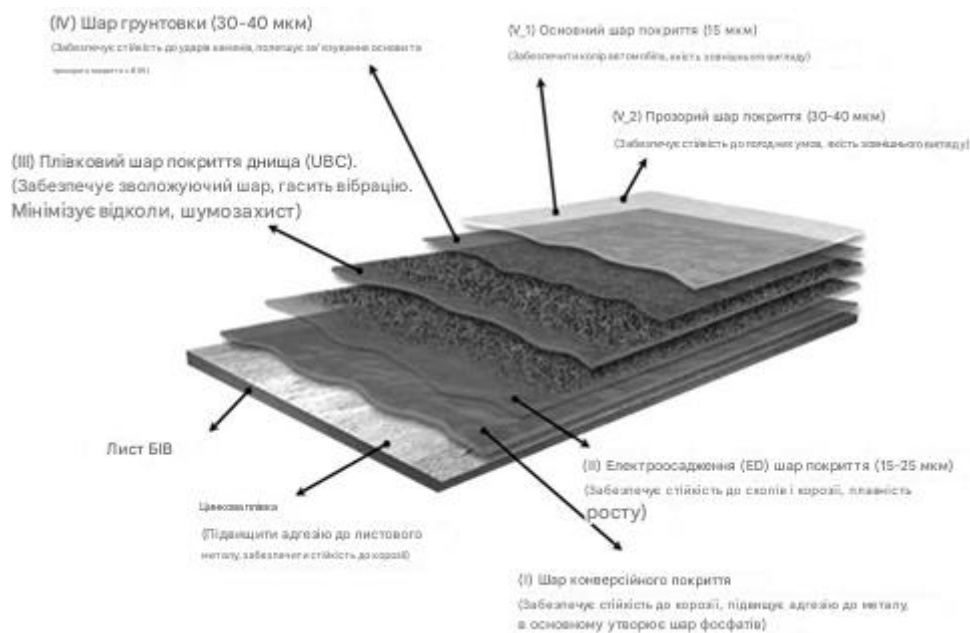


Рис. 2.1. Деталізована схема шарів фарби та їх товщини у рамках процедури автомобільного фарбування.

Перед початком фарбувального процесу кузов автомобіля вкривається шаром цинку, який сприяє покращенню адгезії покриття до металевої поверхні, а також забезпечує захист від корозії.

2.1.1 Технологія нанесення конверсійного покриття

На початкових етапах фарбувального процесу кузов автомобіля проходить серію підготовчих процедур, що включають очищення та промивання. На цьому етапі кузов послідовно занурюють у знежирювальні та кондиціонуючі розчини, після чого обробляють у розчині, який містить фосфатні солі та розведену фосфорну кислоту. Цей процес сприяє формуванню шару нерозчинних кристалічних фосфатів на поверхні металу. Усі ці етапи об'єднуються в технологічний ланцюг, відомий як процес попередньої обробки, схематично представлений на рисунку 2.2.

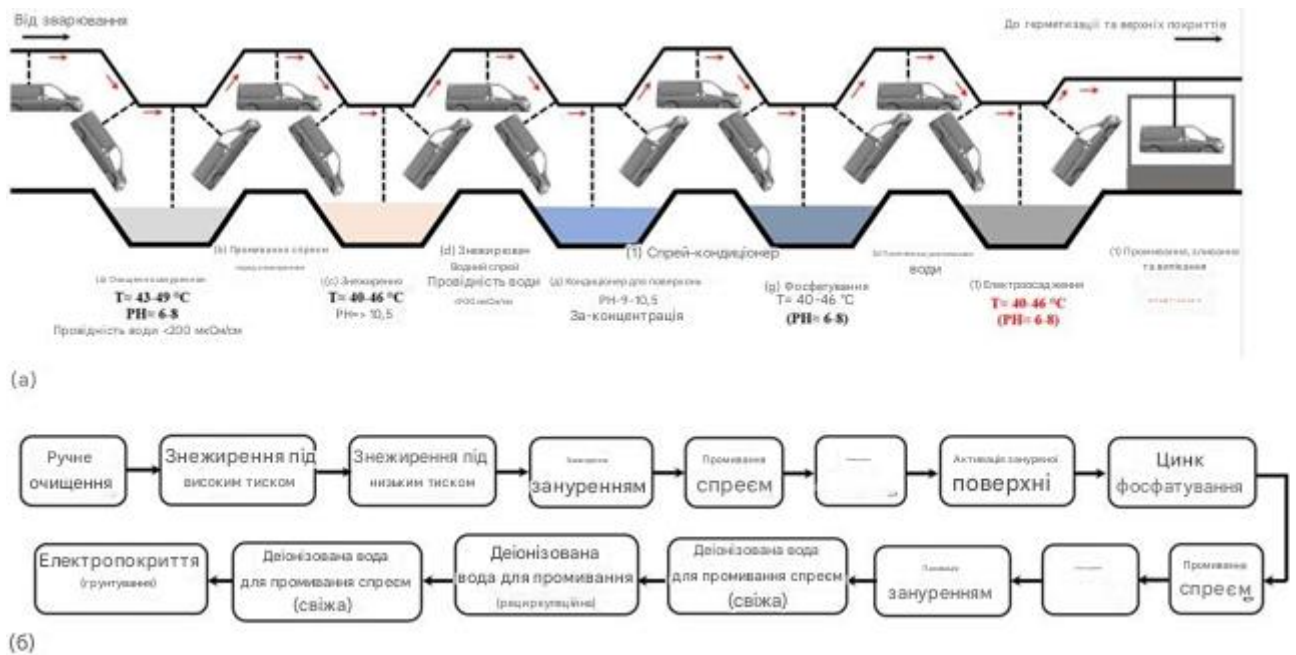


Рис. 2.2. Графічне представлення етапів попередньої підготовки та електроосадження кузова автомобіля у (а) стандартних та (б) новітніх автомобільних фарбувальних заводах. [29]

Ефективність фосфатування залежить від точного налаштування технологічних параметрів таких етапів, як глибоке очищення, видалення жирів, обробка від іржі та активація поверхні. Від цих параметрів залежать структура,

рівномірність, якісні характеристики та маса утвореного фосфатного шару. Знежирювальні засоби, що використовуються на цьому етапі, зазвичай включають тринатрійфосфат, їдкий натр та натрієвий карбонат. Ці компоненти застосовуються під час механічного очищення поверхні та занурення.

Формований фосфатний шар на металі слугує основним бар'єром для захисту від корозії. Його ефективність тісно пов'язана з підтриманням параметрів ванни в межах рекомендованих норм.

2.1.2 Технологічний процес електроосадження

Електроосадження є ключовим етапом фарбувального процесу, під час якого заряджені частки фарби осідають на поверхню автомобільного кузова, зануреного у ванну з фарбувальним розчином. У сучасному виробництві цей метод реалізується з використанням катодної конфігурації, яка забезпечує відмінну стійкість покриття. У такій системі кузов заземлюється, а через електроди у ванні пропускається позитивний постійний струм, що дозволяє регулювати товщину нанесеного шару. Частки фарби, заряджені позитивно, спрямовуються до заземленого кузова, виконуючи функцію катода.

На практиці у виробництві автомобілів часто застосовують розчин SCGA, що складається з 90% цинку та 10% заліза. Отриманий електроосадний шар вирізняється високою адгезією до металу та значним вмістом твердих речовин, а його товщина у більшості випадків становить близько 20 мікрометрів, що відповідає стандартам сучасних автомобільних підприємств.

Особливістю процесу є його екологічна безпечність, оскільки для електроосадження потрібно лише 0,5% розчинника. Скорочення вмісту води у розчині сприяє утворенню гідроксильних іонів, які нейтралізують заряджені фарбові частки, осаджуючи їх на металеву поверхню кузова. Завершивши етапи попередньої обробки та електроосадження, кузов направляють у піч для термічного затвердіння нанесеного шару. Загальна послідовність операцій подана на рисунку 2.2.

2.1.3 Захисне покриття нижньої частини автомобіля

Останнім часом у стадії підготовки до лакування для зниження вібрацій, обмеження пошкоджень від каміння та забезпечення звукоізоляції використовуються акрил-уретанові та полівінілхлоридні ущільнювачі. Такі ущільнювачі наносяться зокрема на капот, усередині та зовні дверей, багажному відділенні, на металевих стиках та в районі задніх коліс. Захисне покриття нижньої частини, що наноситься за допомогою автоматизованих роботів, забезпечує захист від ударів камінням та корозії. [2]

До трьох наступних шарів фарбування ґрунтовки, базового шару та прозорого лаку вдаються, використовуючи електростатичні розпилювачі з обертовими дзвонами чи пневматичні атомізатори. Шар ґрунтовки не лише покращує візуальні якості фарби, але й збільшує її стійкість до атмосферних впливів та захищає від сколів. Він може бути на основі розчинника, води або порошку. Цей шар сприяє кращій адгезії між основою та кузовом автомобіля. Останні покращення у формулах водорозчинних ґрунтовок зумовили їх поширене використання. Вони знижують викиди летючих органічних сполук, підвищують термопластичні властивості, збільшують довговічність та жорсткість покриття. Жорсткість, еластичність та адгезійні характеристики шару ґрунтовки зазвичай регулюються на етапі між нижнім шаром електроосадження та базовим шаром. Ґрунтувальні процедури включають внутрішнє та зовнішнє покриття, які здійснюються вручну операторами та роботами відповідно. Товщина внутрішнього та зовнішнього шару ґрунтовки складає 20 та 25–40 мікрметрів відповідно. Процес зазвичай відбувається при температурі 140°C протягом близько 30 хвилин.

2.1.4 Кінцеві шари покриття базовий шар та прозорий лак

Фінальне завершення покриття автомобіля включає два основних шари: базовий та прозорий лак. Прозорий лак забезпечує захист кузова від корозії, бліднення під впливом ультрафіолету та зовнішніх умов, одночасно надаючи поверхні гладкість і естетичний вигляд. Ці шари можна наносити двома

методами: "мокре на мокре" з короткою фазою просушування або через окремі процеси з проміжним етапом випалювання. Зазвичай цей етап триває 30-40 хвилин і вимагає температуру близько 125 °С. Варіанти базового шару включають розчини середньої щільності, високої щільності на основі розчинника, та водні розчини. З екологічних міркувань у виробництві в США віддають перевагу водорозчинним типам. Наразі відомо 40 000 кольорів базового шару, щороку додаються приблизно тисячу нових варіантів. Здатність прозорого лаку поглинати УФ-випромінювання та його стійкість до подряпин визначають тривалий зовнішній вигляд автомобіля. Випромінювання з довжиною хвилі 290-400 нм ефективно поглинається. У промисловості часто використовується прозорий лак на основі ІК-акрилового меламіну завдяки його економічності, підвищеній стійкості, відсутності необхідності у додатковому затвердінні та збалансованих характеристиках.

2.2 Електростатичний метод розпилення

Під час роботи електростатичного розпилювача заряджені частинки фарби виходять із сопла. Електричне поле між розпилювачем і мішенню спрямовує ці частинки до поверхні, що дозволяє формувати рівномірний шар покриття. Цей метод відзначається високою ефективністю передачі та значною економією фарби, знижуючи кількість відходів.

За останні роки застосування цієї технології суттєво розширилося, охопивши такі галузі, як автомобільна та аерокосмічна промисловість, сільське господарство, санітарна дезінфекція та фармацевтичне виробництво. Наприклад, електростатичне розпилення використовується для нанесення покриттів на обладнання, обприскування пестицидів, усунення крапель, що переносять захворювання, а також покриття таблеток спеціальними захисними шарами (див. рис. 2.3).

Сучасні підходи до аналізу системних параметрів, що впливають на зарядження крапель, спрямоване на підвищення ефективності пестицидів при їх нанесенні на поверхні.

Подальший розгляд буде зосереджено на використанні електростатичного розпилення як ключового інструменту в автомобільній галузі.

Для кращого розуміння викладеного матеріалу цей розділ структуровано таким чином, щоб підкреслити основні концепції кожного підрозділу. На початку детально розглядаються основна ідея, переваги, механізми роботи та можливості застосування методу електростатичного розпилення в різних галузях.

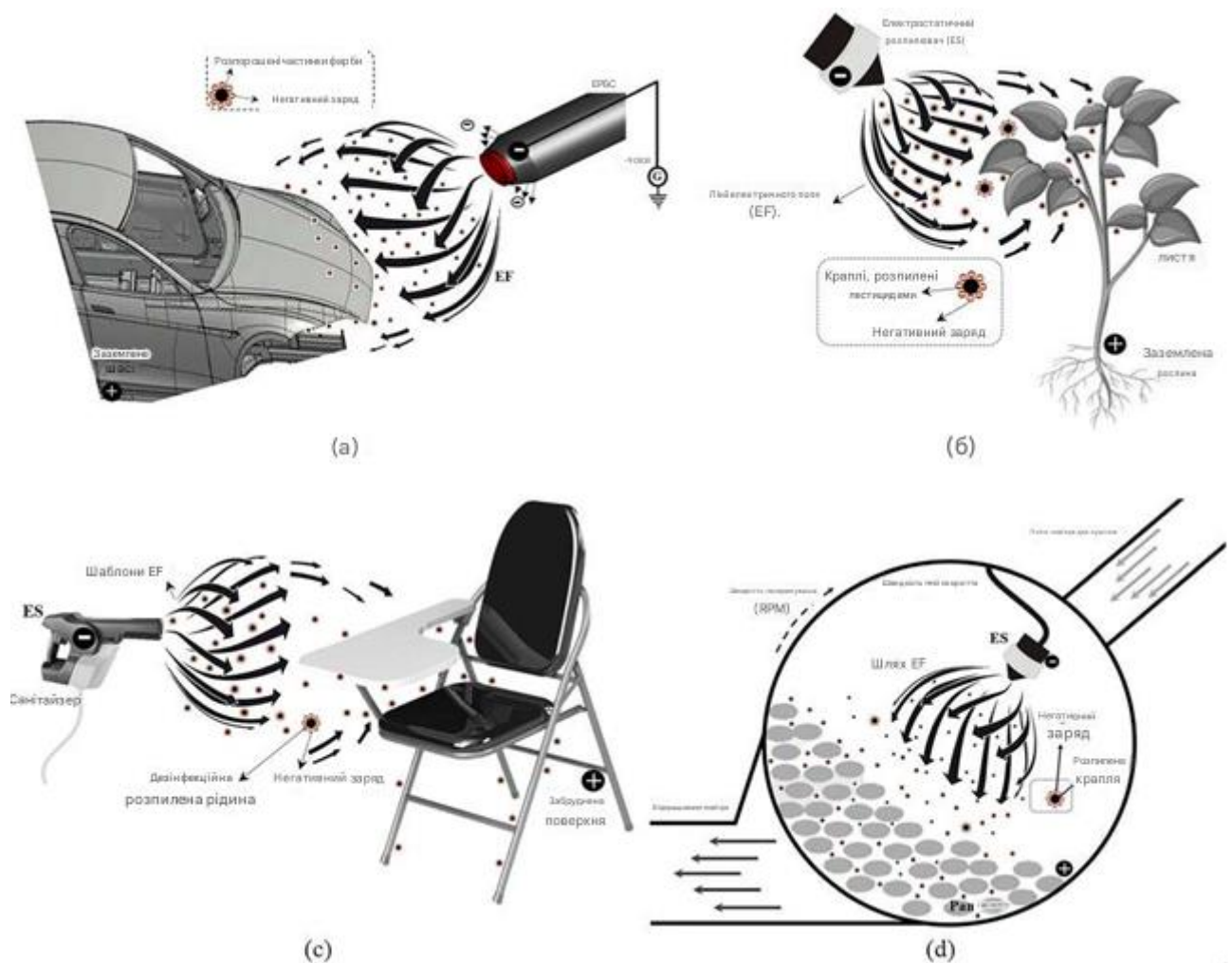


Рис.2.3. Різноманітні напрями використання технології електростатичного розпилення:

(a) Автомобільна галузь: заряджені частинки фарби рівномірно наносяться на поверхню кузова, утворюючи високоякісний однорідний шар покриття. (b) Сільське господарство: електростатично заряджені краплі прилипають до поверхні листя, забезпечуючи оптимальне покриття. (c) Дезінфекція: рівномірне розподілення дезінфікуючих розчинів на забруднених поверхнях для забезпечення ефективної обробки. (d) Фармацевтична промисловість:

нанесення захисних покриттів на таблетки для поліпшення їхніх властивостей та довговічності.

2.3 Структура ВОНТ та опис фарбувальної камери

Конструкція електростатичних розпилювачів із ротаційним дзвоном (ВОНТ), представлена компанією SAMES (SAMES Technology, 2019) (див. рис. 2.4), зазнала значних змін протягом останніх десятиліть. Дослідники визначають дизайн ВОНТ як критичний фактор, що впливає на якість нанесеного покриття та рівень ефективності передачі.

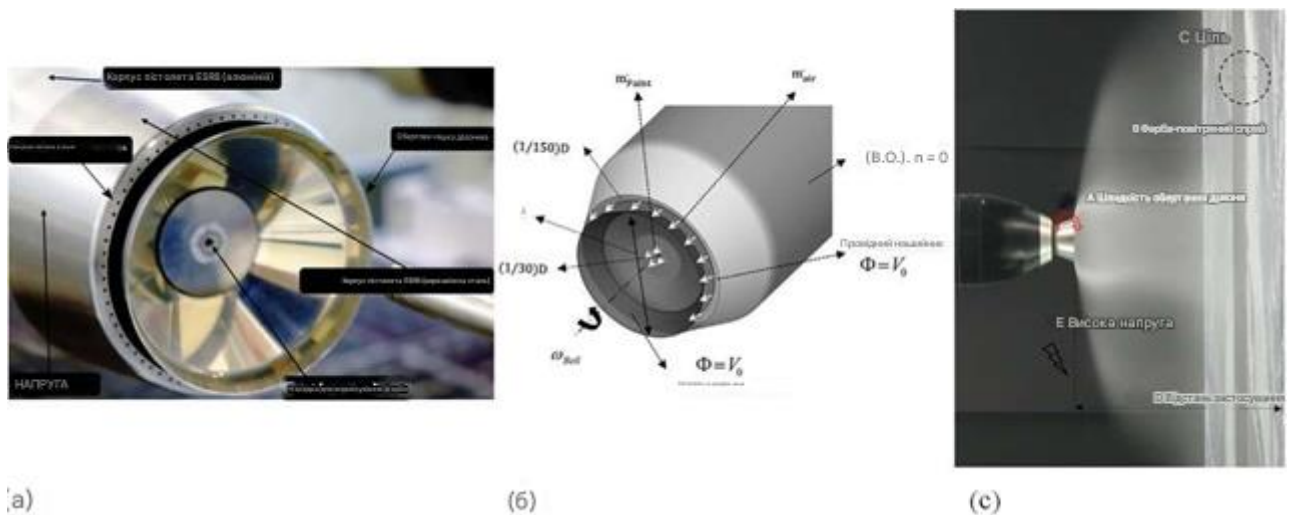


Рис. 2.4. (а) Фотографія моделі РРН 308 високошвидкісного ВОНТ, виготовленого компанією SAMES-KREMLIN, (б) детальна візуалізація розмірів ВОНТ та граничних умов, (с) умови роботи.

Розпилювачі ВОНТ мають широкий вибір діаметрів чаш дзвона - від 20 до 70 мм, а їхня швидкість обертання може досягати 70 тисяч обертів за хвилину. [31]

Вивчали вплив конструкції сопел для формувального повітря в ВОНТ, аналізуючи їх кількість і розміри, що впливають на траєкторію руху та швидкість крапель після розпаду. Половина цих сопел була орієнтована перпендикулярно до краю дзвона, а решта - під кутом 45°. Експериментальні та числові результати вказують на те, що сопла, розташовані під кутом 45°, суттєво змінюють повітряний потік у зоні навколо розпилювача.

Ці дослідження підкреслюють значення оптимізації конструкції ВОНТ для досягнення максимальної ефективності та якості нанесення покриттів.

Автомобільна фарбувальна камера є ізольованим простором, у якому створюються контрольовані екологічні умови, необхідні для оптимізації процесу нанесення покриття. Основною її функцією є підвищення ефективності передачі фінального шару фарби. Камера обладнана системами, що виконують такі завдання:

- (I) направлення та видалення фарбувальних частинок, які не осіли на поверхні, так званих перебризків;
- (II) поглинання летких органічних сполук (ЛОС);
- (III) підтримання оптимальних рівнів вологості, температури (контролюється в межах суворих робочих діапазонів) і чистоти (досягається завдяки використанню фільтрів для пилу та комах).

Як зображено на рисунку 2.5, типова фарбувальна камера для автомобілів має кілька основних компонентів. Верхня частина над ґратчастою підлогою включає роботизовані маніпулятори, розпилювачі (у цьому випадку застосовуються ВОНТ, систему подачі повітря та напрямні рейки. У нижній частині під ґратчастою підлогою розташовані водний резервуар, витяжний вентилятор, система повернення повітряного потоку та очищувальна трубка.

Щоб забезпечити ефективний робочий процес, у верхній секції камери підтримується мінімальна швидкість повітряного потоку вниз, яка зазвичай становить 0,5 м/с (100 футів/хв). У сучасних фарбувальних камерах покриття наноситься з використанням високошвидкісних електростатичних розпилювачів із ротаційним дзвоном (ВОНТ) або розпилювачів великого об'єму з низьким тиском переважно застосовуються в автоматизованих системах фарбування з роботизованим управлінням, тоді як електростатичних розпилювачів із ротаційним дзвоном найчастіше використовуються для виконання фарбувальних операцій вручну.

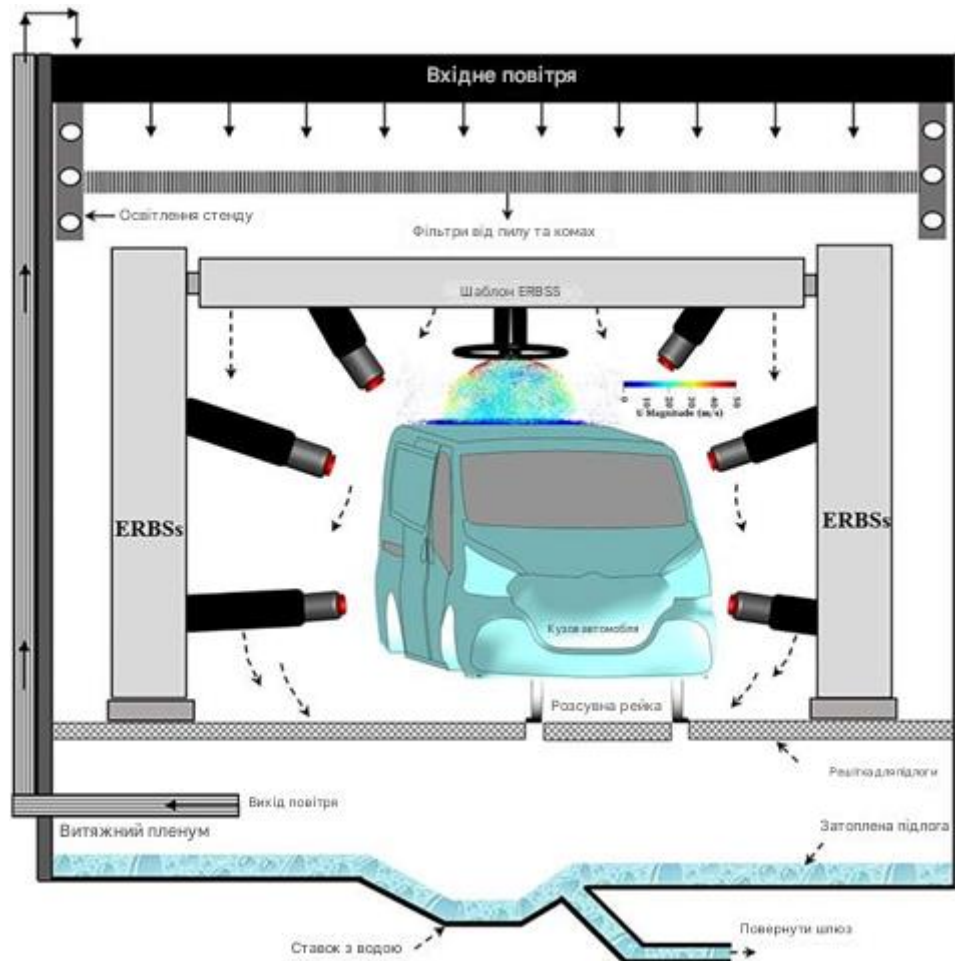


Рис. 2.5. Схематичне зображення компоновання фарбувальної камери для автомобілів.

2.4 Взаємодія сил, рух фарби та повітря в ВОНТ

Аналіз впливу взаємодії сил на краплі фарби, характер руху повітряного потоку та траєкторії фарбувальних крапель під час електростатичного розпилення за допомогою ВОНТ є ключовим для вдосконалення технології. На рисунку 2.6 подано схему взаємодії цих сил із краплями фарби.

Розглянемо основну стратегію, яка описує механізми взаємодії різних сил у процесі розпилення. Рідина, що рівномірно розподіляється по поверхні чаші дзвона, зазнає впливу значної відцентрової сили через високу швидкість обертання, що викликає розпад рідини на менші краплі після утворення зв'язок. Далі на краплі діє високошвидкісний потік формувального повітря, що вивільняється із сопел, та електричні сили, які разом з іншими факторами, такими як гравітація, сила опору за Стоксом і випаровування, керують рухом

крапель у хмарі розпилення навколо чаші дзвона, максимізуючи ефективність передачі.

Повітряні потоки, що формуються в ВОНТ (як показано на лівій частині рисунка 2.6), класифікуються на чотири основні типи:

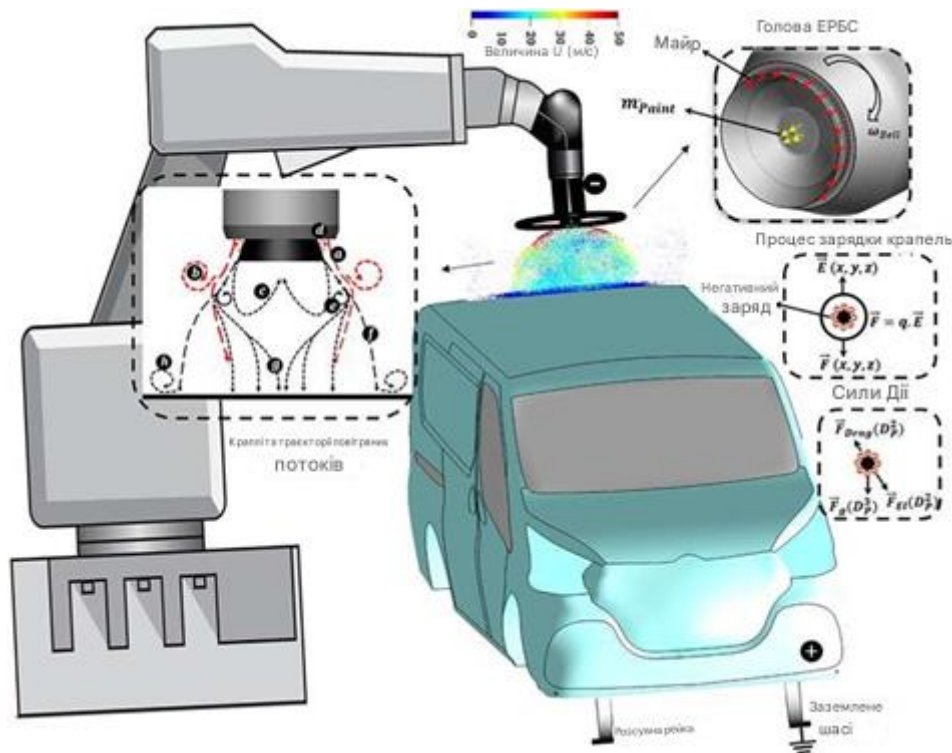


Рис. 2.6. Схематичне зображення процесу електростатичного нанесення покриття на автомобілі за допомогою системи ВОНТ. [5]

Потік формувального повітря.

Зовнішні тороїдальні вихори.

Внутрішні тороїдальні вихори.

Захоплені повітряні вихори.

Щодо траєкторій крапель фарби, їх також можна розділити на чотири основні категорії:

Тороїдальні вихори фарбувальних крапель.

Траєкторії великих фарбувальних крапель.

Траєкторії дрібних крапель фарби.

Відбиті краплі, які утворюють кругові малюнки.

Дослідження взаємодії сил і шаблонів руху повітря та фарби надає цінну інформацію для науковців і конструкторів, що дозволяє розробляти оптимізовані варіанти ВОНТ і підвищувати ефективність їхнього застосування.

У зв'язку з високошвидкісними режимами роботи ВОНТ та виникненням потоків із значним рівнем турбулентності, дослідження рециркуляційних вихрових структур, які суттєво впливають на траєкторії фарбувальних крапель, є критично важливим. У своїй числовій моделі досліджували рециркуляційний потік, що утворюється навколо ВОНТ. Їхні висновки продемонстрували, що внутрішня рециркуляція сприяє перенаправленню дрібніших крапель у радіальному напрямку, запобігаючи їх осадженню на поверхні кузова.

На рисунку 2.7 показано поперечні осьові траєкторії потоків, які формуються під час електростатичного розпилення з використанням різних провідників. Для покращення візуалізації використано метод інтеграції лінійних завихрень (LIC). Додаткові елементи, такі як регульоване кільце керування високою напругою рис. 2.7 (б) та втягувані лопаті рис. 2.7 (с), були впроваджені як провідники для ERBS. Вони суттєво змінюють і оптимізують рециркуляційний повітряний потік у зоні головки розпилювача, у порівнянні зі стандартними конструкціями. У результаті швидкість повітряного потоку значно знижується в заблокованій зоні всередині хмари розпилення, натомість поблизу чаші дзвона вона збільшується.

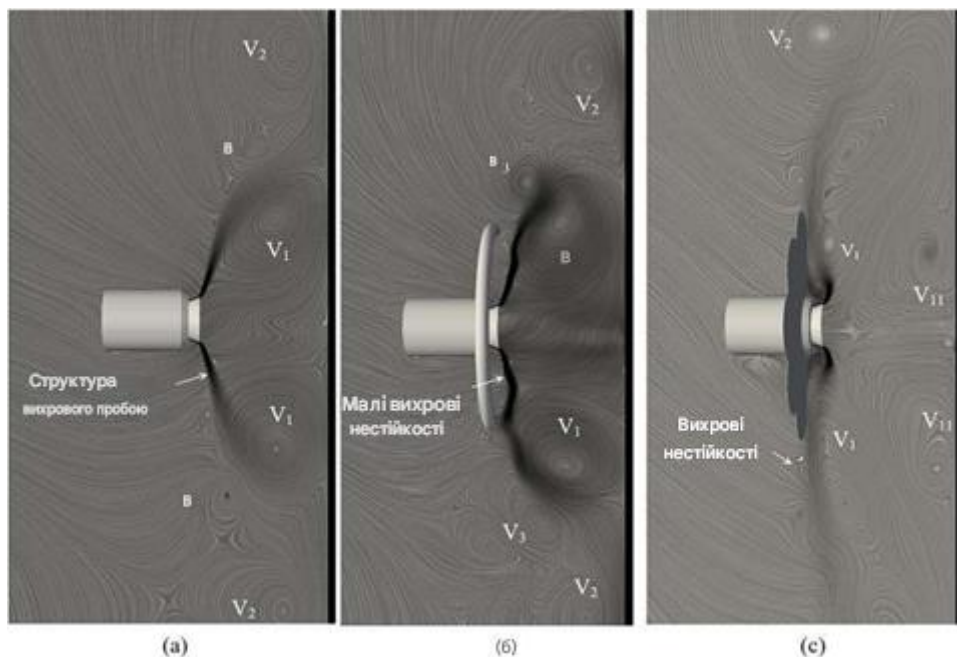


Рис. 2.7. Візуалізація потоків рециркуляції для різних типів систем ВОНТ, реалізована за допомогою методу інтеграції лінійних завихрень:

(а) стандартна система ВОНТ, (б) ВОНТ, обладнана регульованим кільцем для керування високою напругою, (с) ВОНТ із використанням втягуваних лопатей, що працюють під високою напругою.

На рисунку також представлені внутрішні (V1) і зовнішні (V2) зони рециркуляції та механізми руйнування вихорів. Зі збільшенням швидкості обертання чаші дзвона довжина зони рециркуляції зростає, а точка її прикріплення зміщується вгору за потоком. Отримані результати забезпечують цінну інформацію щодо повітряних потоків, що може бути використано для розробки більш ефективних версій ВОНТ наступного покоління. [24]

2.5 Розподіл розмірів крапель, створених ВОНТ

Розмір крапель, які утворюються під час роботи ВОНТ, суттєво впливає на ефективність передачі і якість нанесеної фарбувальної плівки на цільовій поверхні. Менші краплі, хоча й забезпечують більш якісне покриття, мають нижчий показник ТЕ через сильний вплив сил аеродинамічного опору, які порушують їхні траєкторії. Такі краплі, з часом, можуть призводити до утворення сухого розпилення. Крім того, надто дрібні краплі не дозволяють ефективно застосовувати добавки, такі як пластифікатори, які використовуються для покращення естетичного вигляду та оптичних ефектів покриття.

У свою чергу, великі краплі формують плівки нерівномірної товщини, але їхній показник вищий через більшу інерцію та менший вплив сил опору. Розподіл розмірів крапель визначається головним чином продуктивністю атомізації, яка одночасно впливає на якість покриття. Основними факторами, що впливають на розподіл розмірів крапель, є характеристики рідини, швидкість її подачі, швидкість формувального повітря, конструкція чаші дзвона або диска, а також швидкість обертання дзвона. Як показали дослідження, швидкість подачі рідини та швидкість обертання дзвона мають найбільший вплив на розподіл розмірів крапель під час процесу атомізації.

Наукові дослідження підтверджують, що збільшення швидкості обертання дзвона сприяє зменшенню розміру крапель, тоді як зростання швидкості подачі рідини збільшує їхній розмір, хоча цей ефект менш

виражений. Водночас збільшення в'язкості фарби зазвичай підвищує середній діаметр крапель, але знижує швидкість подачі рідини.

Електрична напруга суттєво впливає на середній розмір фарбувальних крапель (10–40 мкм), а потоки формувального повітря мають найбільший вплив на утворення малих (<10 мкм) і великих (>40 мкм) крапель. вплив безрозмірних параметрів, таких як числа, а також коефіцієнтів потоку, на розподіл розмірів крапель.

Експериментальні роботи досліджували розмір крапель, які утворюються під час розпаду рідини та переходу між плівкою, зв'язками та краплями. Порівняли динаміку крапель, сформованих різними типами атомайзерів, включаючи безповітряний пістолет, пневматичний розпилювач і високошвидкісний дзвоновий атомайзер. У ВОНТ було отримано значно дрібніші краплі (середній діаметр 15 мкм), які переважно осідали в центрі малюнка розпилення, порівняно з безповітряним пістолетом (середній діаметр 310 мкм).

Що при високих швидкостях обертання і розміри зв'язків зменшуються на чверть. Виявили, що збільшення бічної відстані сприяє розширенню розподілу розмірів крапель. Феномен розпаду нестисливої рідини, що розтягувальний опір суттєво впливає на розпад у чашах дзвона. Водночас прогнозування розмірів крапель у числових моделях все ще потребує подальшого вдосконалення.

2.6 Утворення, транспортування та осадження крапель у ВОНТ

Утворення, транспортування та осадження крапель у ВОНТ

Процес руху фарби під час електростатичного розпилення включає три основні етапи:

Утворення фарбувального матеріалу всередині чаші дзвона, що охоплює формування плівки, зв'язків і крапель (див. рис. 2.8).

Транспортування частинок фарби до цільової поверхні.

Осадження фарби на об'єкті.

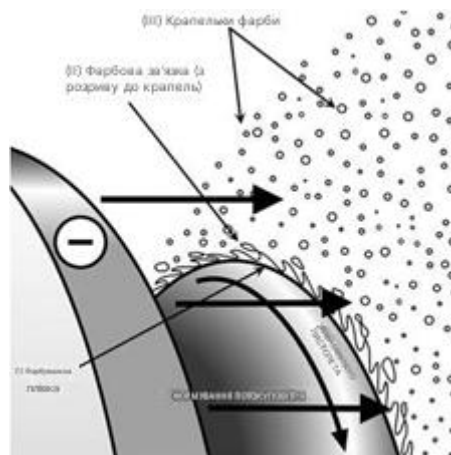


Рис. 2.8. Ілюстрація процесів утворення фарбувальної плівки, формування зв'язків і подальшого розпаду крапель на краю чаші дзвона.

У зоні навколо чаші дзвона відбуваються такі процеси, як атомізація фарби, її іонізація та електричне зарядження. Під час транспортування формувальне повітря взаємодіє з турбулентним потоком, електричне поле впливає на атомізовані краплі, а також відбуваються первинний і вторинний розпад крапель. Траєкторії заряджених частинок моделюються шляхом розв'язання диференціальних рівнянь, що дозволяє визначити їх швидкість і положення на кожному етапі. Завершальним етапом є формування рівномірної плівки на поверхні під впливом потоку повітря, спрямованого вниз.

Механізм утворення крапель. На першому етапі фарбувальна плівка, що утворюється на внутрішній поверхні чаші дзвона, розпадається на фрагменти через дію аеродинамічних хвиль. Під впливом поверхневого натягу ці фрагменти трансформуються у зв'язки, які згодом розпадаються на дрібні краплі. На наступному етапі рідина витікає у вигляді видовжених вигнутих структур із краю чаші, що на більшій відстані розпадаються на краплі різного розміру. Зрештою, краплі осідають на поверхні, формуючи рівномірний шар фарби. [28]

Особливості процесів. Було встановлено ключові критерії для формування плівки, зв'язків і крапель. Визначено залежності, які описують перехід між цими стадіями, максимальні розміри крапель під час розпаду плівки та вплив в'язкості рідини на розподіл розмірів крапель. Показано, що збільшення швидкості обертання чаші дзвона зменшує розміри крапель, тоді як

підвищення швидкості подачі фарби, навпаки, сприяє їх збільшенню. Висока в'язкість фарби зазвичай сприяє утворенню довших і стабільніших зв'язків.

Візуалізація процесів.

На основі експериментів було виявлено, що зубчасті чаші забезпечують більш рівномірний інтервал між зв'язками навіть при високій швидкості подачі фарби, тоді як незубчасті демонструють більш хаотичний розподіл рис. 2.9, 2.10. Крім того, високов'язкі фарби сприяють уповільненню процесу розпаду зв'язків на краплі, що затримує їх формування.



Рис. 2.9. Розповсюдження фарбувальної плівки по внутрішній поверхні чаші дзвона, представлено у вигляді серії експериментальних знімків (обертальна швидкість чаші $x=30k$, подача фарби $m=400\text{мл/хв}$).

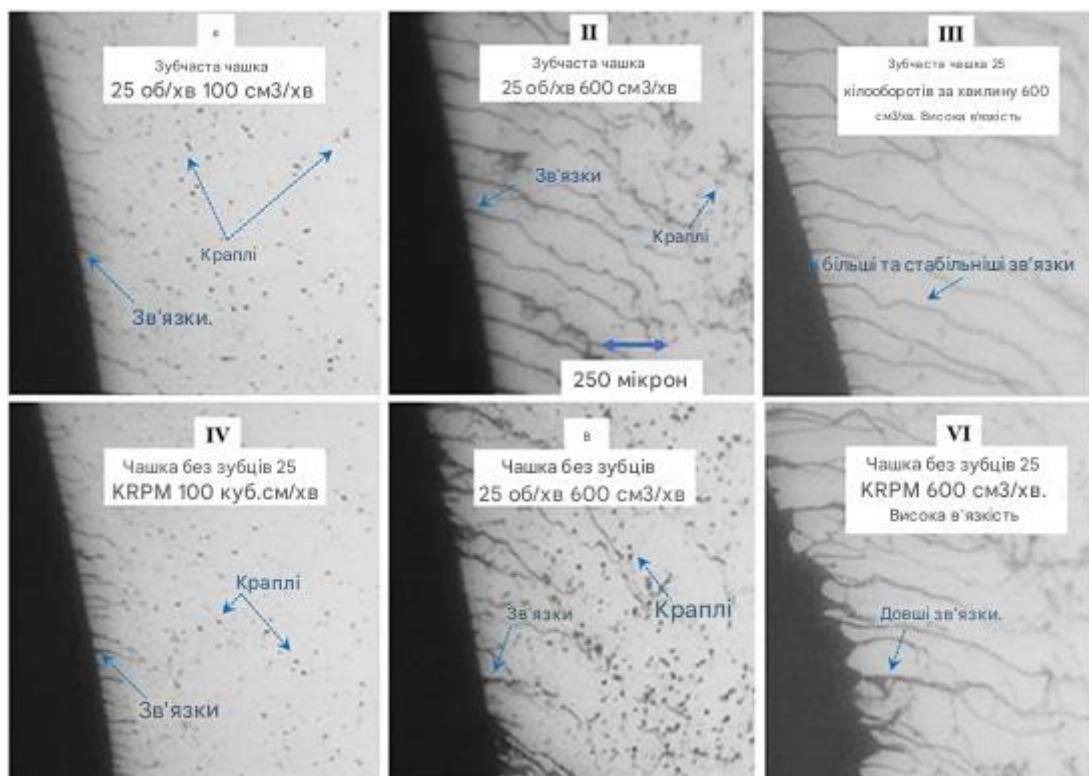


Рис. 2.10. Зображення, що демонструють перехідний процес розпаду зв'язків на краплі для дзвонових чаш із зубчастими та незубчастими краями.

2.7 Практичні підходи до визначення розмірів крапель розпилення

До таких методів належать шадографія, техніки на основі інфрачервоної термографії, високошвидкісна зйомка та фазово-доплерова інтерферометрія.

Метод шадографії базується на використанні імпульсного лазера для підсвічування хмари розпилення, що дозволяє зафіксувати чіткі зображення за допомогою синхронізованих камер. Ці зображення використовують для отримання даних про розміри і швидкість крапель.

Інфрачервона термографія забезпечує якісну візуалізацію та оцінку розподілу фарбувального потоку. У цьому методі застосовується рівномірно нагріте тло, яке випромінює теплову енергію, що фіксується інфрачервоною камерою. Зменшення інтенсивності зображення вказує на наявність частинок у хмарі розпилення. Цей підхід знайшов широке застосування в останніх дослідженнях і довів свою ефективність у вивченні розподілу фарби.

Метод високошвидкісної зйомки та фазово-доплерової інтерферометрії дозволяє аналізувати динаміку розпилення, а також розподіл швидкостей і розмірів крапель. У дослідженнях цей метод використовували для оцінки роботи вихрових атомайзерів і виявлення закономірностей у поведінці крапель.

Практичний приклад. У порівняльному дослідженні оцінювався розподіл розмірів крапель для розпилювачів із гладкою чашею дзвона та стандартного пневматичного атомайзера. Для експерименту було встановлено такі параметри: швидкість подачі фарби 360 мл/хв, об'єм потоку повітря 465 сл/хв, діаметр чаші дзвона 65 мм і швидкість обертання 20 тис. об/хв. Вимірювання проводилися за допомогою методу шадографії, а отримані дані були інтерпретовані на основі гамма-розподілу.

Для узагальнення результатів використовували метрики, зокрема середній арифметичний діаметр і середній діаметр за Сотером (SMD). Пневматичний атомайзер продемонстрував полідисперсний розподіл із середнім діаметром 21,5 мкм, тоді як розпилювач із чашею дзвона забезпечив моноmodalний розподіл із середнім значенням 55,8 мкм. Подібний моноmodalний розподіл для гладких чаш дзвона підтверджували

експерименти, хоча для зубчастих чаш при високих швидкостях спостерігалися бімодальні розподіли крапель, які виникали через специфіку їхньої геометрії.

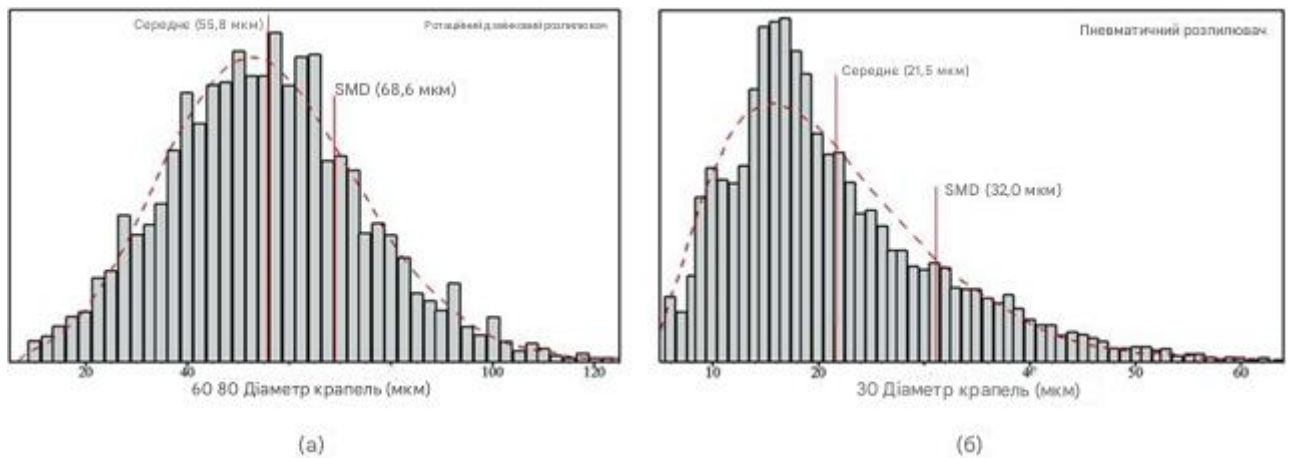


Рис. 2.11. Розподіл розмірів фарбувальних крапель, розпилених за допомогою різних автомобільних розпилювачів:

(а) ротаційний дзвоновий розпилювач, (б) пневматичний розпилювач. [34]

На рисунку 2.12 представлено зіставлення прогнозованих середніх діаметрів крапель для різних режимів роботи чаші дзвона: змінних швидкостей її обертання та подачі фарби. Для порівняння використано дані для гладких і зубчастих чаш дзвона. Використання в'язкоеластичних фарб, показало більші розміри крапель, ніж прогнозувала модель Tanasawa для ньютонівських рідин.

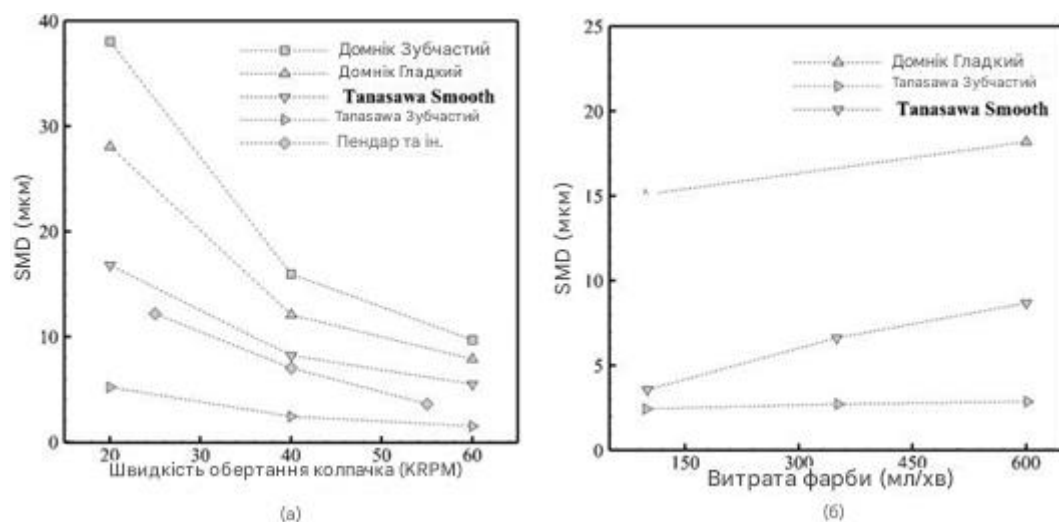


Рис. 2.12. Результати моделювання середнього діаметра крапель при зміні таких параметрів:

(а) швидкість обертання чаші дзвона, (б) швидкість подачі фарби.

Попри це, всі джерела сходяться на думці, що швидкість обертання чаші дзвона є ключовим фактором, який визначає розмір крапель. Темпи зміни із ростом швидкості подачі фарби демонструють однакову тенденцію.

2.8 Розпад і випаровування крапель

Процес розпаду крапель, який відбувається під час функціонування ротаційного розпилювача, є одним із основних факторів, які необхідно враховувати для забезпечення високої якості покриття. Усередині чаші дзвона рідина фарби зазнає значної дії відцентрової сили, яка виникає через високу швидкість обертання. Це призводить до формування плівки, утворення зв'язків і, зрештою, розпаду рідини на дрібні краплі. [21]

Розпад крапель у процесі розпилення поділяється на два основних етапи: первинний і вторинний. На стадії первинного розпаду визначаються основні параметри крапель, зокрема їхній початковий діаметр і кут утворення. Цей процес включає кілька фаз: деформацію крапель, утворення країв, їх розширення та подальший розпад. Під час транспортування крапель до цільової поверхні відбувається вторинний розпад, зумовлений дестабілізацією великих крапель під впливом нормальних напружень, а також утворенням дрібних частинок через механізм зривання.

Для оцінки первинного розпаду в електростатичному розпиленні широко використовуються сучасні моделі, такі як Розіна-Раммлера та розподіли хі-квадрат. Встановлено, що модель Розіна-Раммлера забезпечує точне відтворення розподілу крапель, яке відповідає результатам експериментів.

У попередніх числових дослідженнях часто ігнорували моделювання первинного розпаду, натомість застосовували метод припущених точок інжекції для крапель різного розміру. Отримані результати згодом співставляли з експериментальними даними.

Ефективність вторинного розпаду оцінювалася за допомогою різних моделей, модель аналогії Тейлора і її модифікована версія. Модифікована модель, яка враховує нелінійні властивості крапель із високою в'язкістю, показала найкращу відповідність експериментальним даним.

Дослідження також показали, що вторинний розпад має мінімальний вплив на загальну структуру струменя розпилення, однак значно впливає на розподіл розмірів крапель і середній діаметр за Сотером (SMD). Ці висновки є важливими для вдосконалення методів розпилення та підвищення ефективності нанесення покриттів.

Моделювання процесів розпаду рідини, що призводять до утворення дрібних крапель у ротаційному чашовому атомайзері, дозволяє глибше зрозуміти механізми формування аерозолі. Одним із прикладів є дослідження, де було проаналізовано режими розпаду рідини, що витікає з порожнистого конусного сопла, під дією тиску закручування. Особливу увагу приділено первинному та вторинному розпаду, що є ключовими стадіями у процесі формування крапель.

Аналіз ефективності моделей для прогнозування розміру крапель показав, що метод аналогії Тейлора дозволяє оцінити загальну форму хмари розпилення та розподіл розмірів крапель. Проте виявлено, що при роботі з в'язкими рідинами на високих швидкостях обертання ця модель має схильність до переоцінки процесу розпаду, що призводить до утворення часток менших розмірів, ніж передбачалося. [30]

Дослідження процесів первинного розпаду, таких як формування плівки та її розширення на внутрішній поверхні чаші дзвона, демонструють, як високошвидкісні ротаційні розпилювачі формують дрібнодисперсні краплі. У свою чергу, моделювання розпаду для дизельного розпилення дозволяє покращити точність прогнозування параметрів аерозолі в транспортних системах.

Окремо слід зазначити обмежену кількість досліджень, присвячених випаровуванню крапель у процесах, пов'язаних з електростатичним розпиленням. Встановлено, що використання електричного заряду підвищує швидкість охолодження крапель та ефективність передачі (TE), що практично подвоює ці показники. Для оцінки випаровування крапель використовуються моделі теплопередачі, що враховують енергетичний баланс крапель та вплив навколишнього середовища.

Сучасні підходи до моделювання випаровування включають розв'язання рівнянь енергії та ентальпії, що дозволяє точно прогнозувати зміну температури крапель під час розпилення. Ці методи є важливим кроком у вдосконаленні технологій розпилення, спрямованих на підвищення якості покриттів та ефективності їх нанесення.

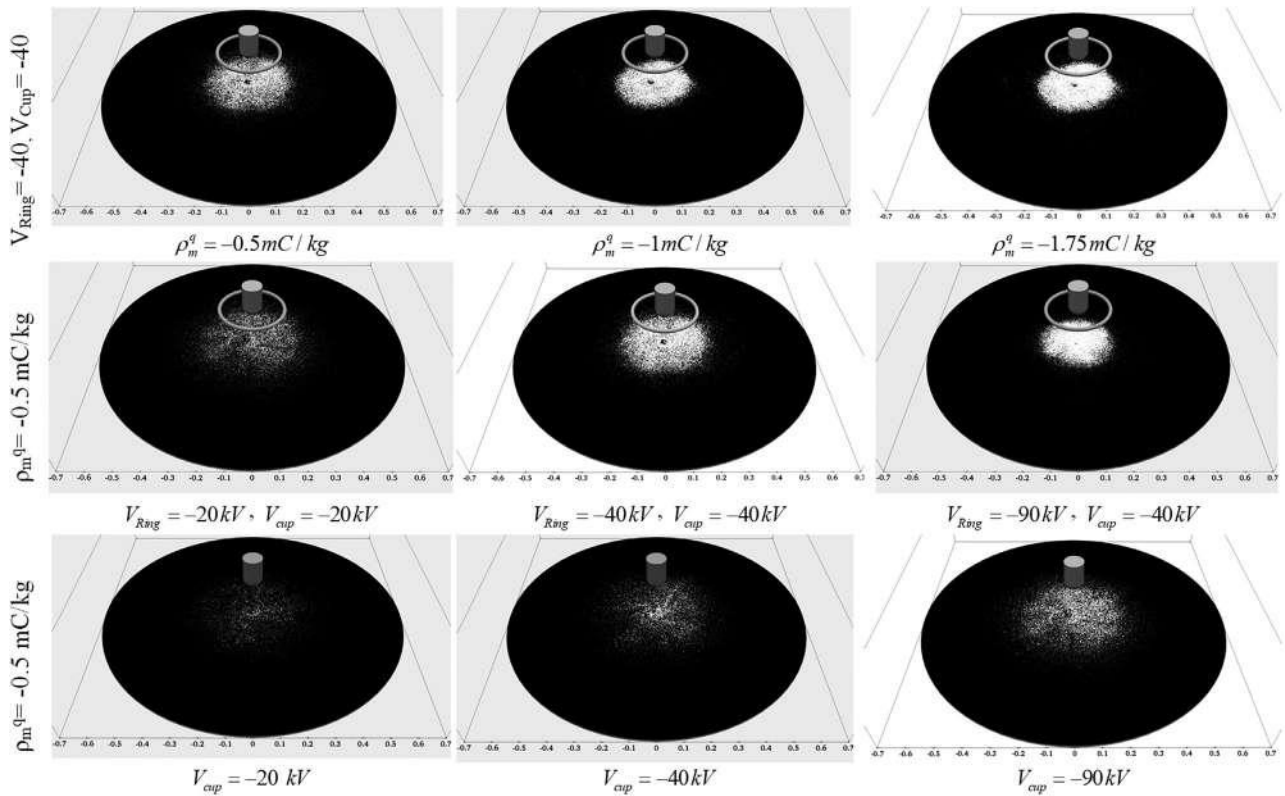


Рис. 2.13. Схематичне зображення розподілу крапель на поверхні в залежності від робочої напруги та співвідношення заряду до маси:

ВОНТ із доданим регульованим кільцем високої напруги як зовнішнім провідником (перші два ряди) порівняно зі стандартним ВОНТ (третій ряд).

2.9 Методи електричного зарядження фарбувальних крапель

Електричне зарядження фарбувальних крапель у процесі електростатичного нанесення покриттів може здійснюватися за допомогою внутрішнього або зовнішнього підходу, залежно від специфіки використовуваних матеріалів та обладнання. [22]

Внутрішній (прямий) метод див. рис. 2.14 (а) полягає у застосуванні високої постійної напруги в діапазоні 20–90 кВ безпосередньо до

розпилювального пристрою. У цьому випадку фарба заряджається до моменту її атомізації. Такий підхід є особливо ефективним для фарб із низькою провідністю, оскільки він дозволяє зменшити втрати напруги.

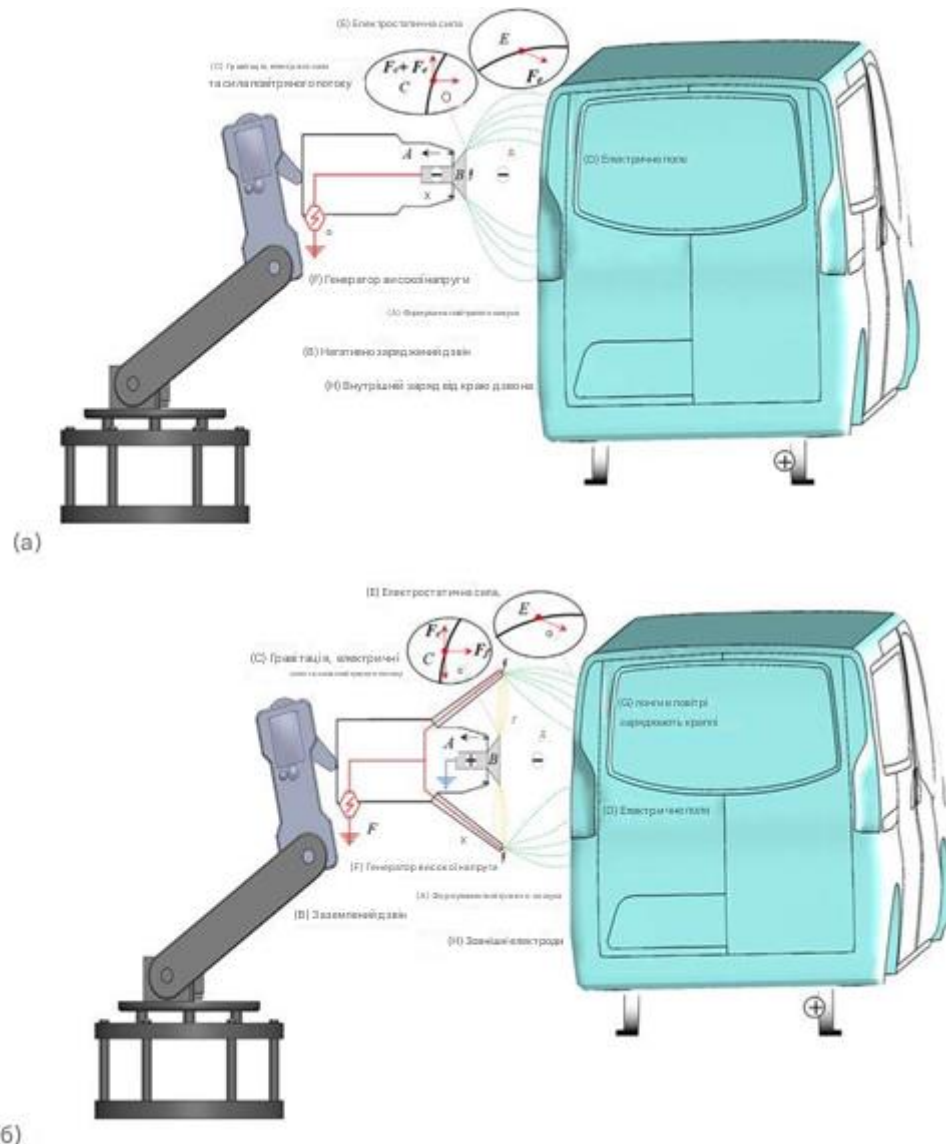


Рис. 2.14. Зовнішній (непрямий) метод.

Зовнішній (непрямий) метод див. рис. 2.14 (б) передбачає використання зовнішніх елементів для створення електричного поля навколо розпилювача. Це можуть бути серії передніх електродів, регульоване кільце керування напругою або втягуючі лопаті, що формують кругову структуру навколо розпилювача. У випадку ротаційної чаші дзвона іонізація повітря навколо чаші сприяє зарядженню фарбувальних крапель, які проходять через цю область. Такий метод більше підходить для водоосновних фарб завдяки їхній високій провідності.

Порівняння ефективності методів. Хоча обидва методи широко використовуються в сучасних системах нанесення покриттів, внутрішній метод зазвичай забезпечує більшу ефективність передачі, оскільки він безпосередньо заряджає фарбу до її атомізації. Однак зовнішній метод демонструє кращі результати при роботі з матеріалами з високою електропровідністю, такими як водоосновні фарби, завдяки оптимальному використанню електричного поля.

Таким чином, вибір між внутрішнім і зовнішнім методом зарядження залежить від фізико-хімічних властивостей фарби та вимог до ефективності процесу нанесення покриття.

2.10 Оновлений опис конвекційної печі для автомобільної промисловості

Сушіння фарби в автомобільній промисловості може здійснюватися за допомогою двох основних способів: безперервного або партійного. Безперервні печі є ідеальним рішенням для масового виробництва, наприклад, на лініях затвердіння фарби, завдяки їхній високій продуктивності та зниженим витратам на одну одиницю продукції. У таких печах шасі автомобілів транспортуються за допомогою конвеєрів із санями, які рухаються з постійною швидкістю. Проте значна частина енергії витрачається на переміщення цих саней, що є одним із основних недоліків цього типу печей.

Конвекційні печі, які використовують нагріте повітря для прогрівання поверхонь автомобілів, є найбільш поширеним вибором у виробництві. Вони забезпечують сушіння фарби за рахунок теплопровідності та здатні ефективно працювати навіть зі складними геометричними формами кузова автомобіля. Регулювання параметрів вентиляції, температури та вологості у таких печах є критично важливими для досягнення високих естетичних і фізичних властивостей покриття. Крім того, швидкість руху конвеєра має значний вплив на якість кінцевого результату. [27]

Як зазначено на рис. 2.15, типова піч складається з трьох основних зон:

У цій зоні шасі автомобіля нагрівається до температури, достатньої для випаровування розчинників із фарби та забезпечення її затвердіння. Нагрівання

здійснюється за допомогою нагрітих стінок, які передають тепло через радіацію, або гарячих повітряних форсунок і панелей, що спрямовують потік гарячого повітря на кузов автомобіля.

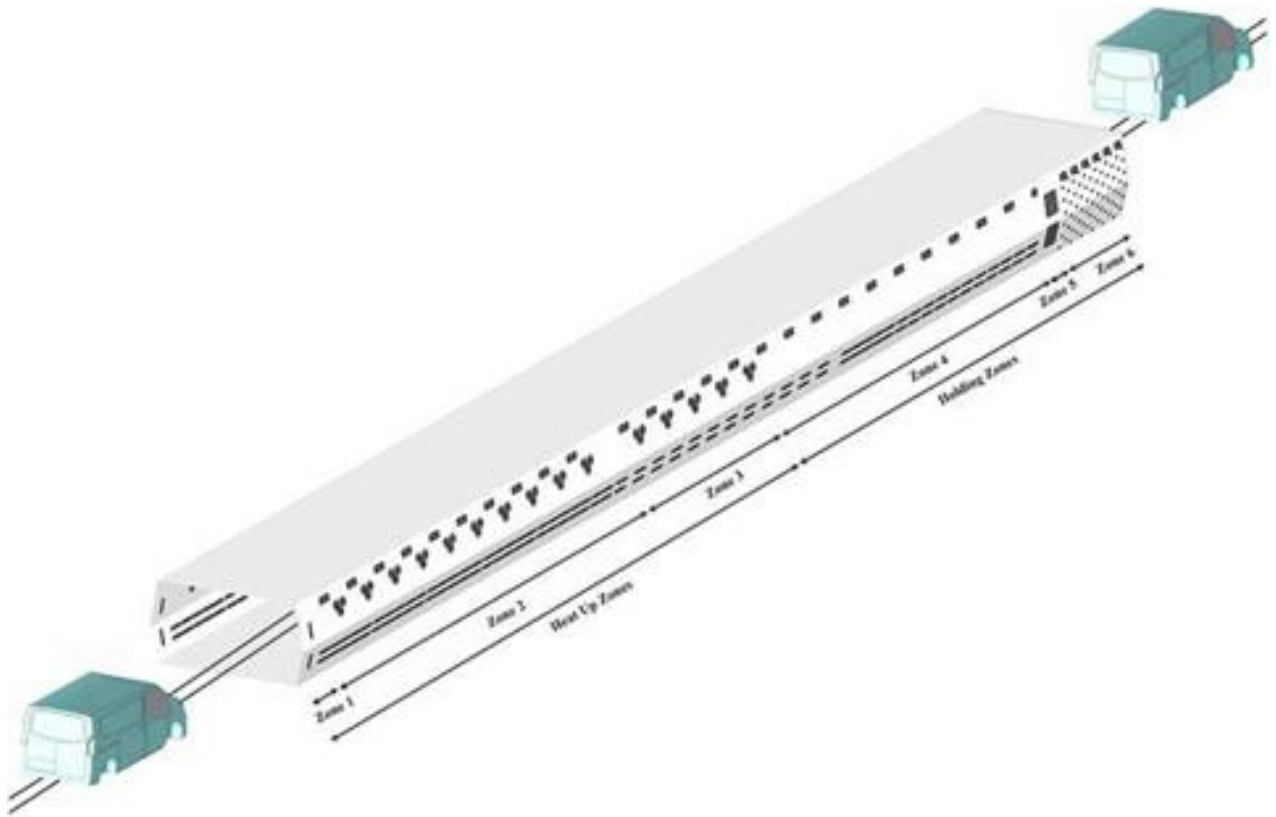


Рис. 2.15. Схематичне зображення геометричної конфігурації печі з виділенням зон нагрівання, витримки та охолодження.

Під час перебування в цій зоні шасі автомобіля утримується при постійній температурі, що дозволяє завершити процес випікання, розпочатий у зоні нагрівання.

На фінальному етапі процесу автомобіль охолоджується до температури навколишнього середовища, що забезпечує стабільність покриття.

На ранніх етапах процесу сушіння фарбувальний шар залишається вологим, тому важливо забезпечити транспортування шасі без попадання пилу для досягнення ідеальної якості покриття.

Рисунок 2.16. демонструє основні чинники, які визначають ефективність процесу сушіння та затвердіння фарби. Серед них:

Геометричне налаштування. Включає позиціювання форсунок, повітряних панелей і аспіраційних повітропроводів, а також розміри самої печі.

Оскільки після виготовлення печі ці параметри змінити неможливо, їх слід детально вивчити та оптимізувати на етапі проєктування.

Теплові умови. Містять у собі параметри передачі тепла, швидкості охолодження та аспіраційного потоку. Наприклад, для досягнення оптимального охолодження можуть бути задані часи охолодження: 13,90 хв у зоні охолодження та 14,55 хв у інших секціях будівлі.

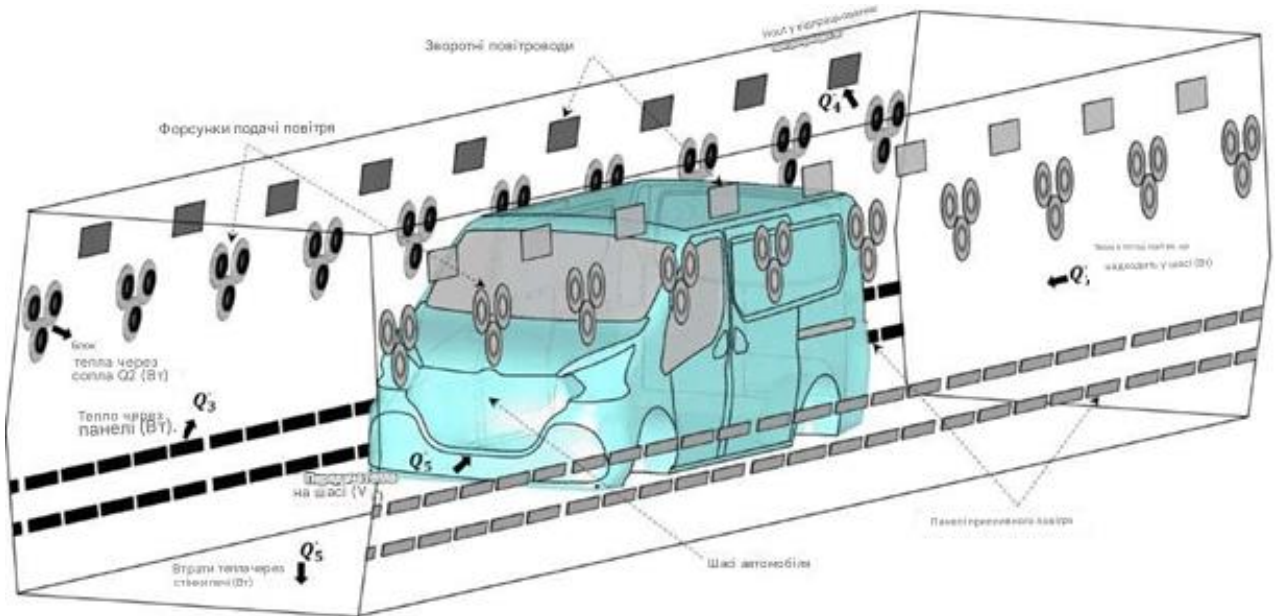


Рис. 2.16. Схематичне розташування компонентів гарячих повітряних форсунок: основа та стіни.

Експлуатаційні умови. Визначаються такими параметрами, як температура повітря, швидкість і об'єм повітряного потоку, а також швидкість руху кузова на конвеєрі. Зазвичай швидкість конвеєра становить 4–5 м/хв, температура повітря варіюється в межах 190–220°C, а швидкість потоку повітря - від 14 до 18 м/с.

Комбінування оптимальних геометричних, теплових і експлуатаційних параметрів дозволяє досягти високої ефективності сушіння та забезпечити якісне затвердіння фарбувального покриття. [23]



Рис. 2.17. Карта ключових факторів, що впливають на процес затвердіння та сушіння.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Застосування звичайних повітряних розпилювачів

Звичайні повітряні атомайзери охоплюють розпилювачі з великим об'ємом і низьким тиском, а також двофлюїдні розпилювачі. Хоча вони забезпечують створення прийнятної плівки фарби, ці розпилювачі характеризуються низькою ефективністю передачі та великим споживанням фарби. Численні дослідження були реалізовані для виявлення механізмів регулювання атомізації та визначення ефективних параметрів для традиційних повітряних розпилювачів. Ранні дослідження, що стосуються традиційних повітряних розпилювачів, які запропонували емпіричну формулу для опису взаємозв'язку розміру крапель із властивостями рідини та швидкостями потоків газу і рідини. Їхні висновки підтвердили, що швидкості потоків рідини і газу, в'язкості та щільності є ключовими факторами, які впливають на розмір крапель. Було використано беззатворне сопло для розпилення латексної фарби, водно-гліцеринових сумішей та води. Аналізувалися впливи розміру сопла, поверхневого натягу та в'язкості фарби, а також гідростатичного тиску. За розробленими емпіричними рівняннями, зростання зсувного напруження на стінках, щільності рідини та об'ємного потоку призводило до зменшення середнього діаметра крапель. Водночас збільшення поверхневого натягу та в'язкості фарби вело до зростання середнього діаметра крапель. [4]

На основі різних малюнків розпилення, сопла в традиційних розпилювачах класифікуються на кілька категорій, таких як плоске розпилення, повноконусне та порожньоконусне. Сопла з повним конусом створюють найбільший розподіл розмірів крапель, за якими слідують плоскі та порожньоконусні сопла при однаковій швидкості повітря та рідини. Зазвичай розмір крапель збільшується зі збільшенням швидкості потоку рідини та навпаки. Розмір крапель також має обернену залежність від тиску повітря. Подібно до цього, розмір крапель та кут розпилення мають обернену пропорційність: більший кут розпилення призводить до меншої дисперсії розміру крапель. Швидкість повітря є, без сумніву, найважливішим фактором,

що впливає на середній діаметр у звичайних повітряних розпилювачах. Оцінили, що пропорційний щільності повітря в степені 0.6. Для рідин з низькою в'язкістю швидкість повітря обернено пропорційна, що підкреслює необхідність працювати на максимально можливій швидкості повітря. Тим не менш, через зниження зі збільшенням тиску повітря, потрібно визначити оптимальне значення тиску повітря. Важливо оцінити взаємодію між впливовими параметрами для досягнення всебічних висновків про традиційні повітряні розпилювачі.

3.2 Двокомпонентні атомайзерні повітряні розпилювачі

На рисунку 3.1. (б) представлено типову кришку з основними функціональними елементами атомайзера для розпилення повітря. Такі розпилювачі включають отвори для фарби, первинні та вторинні повітряні отвори та отвори для формування потоку, що впливають на процес атомізації. Рідина, випущена з сопла для фарби (швидкість 5 м/с), стикається з повітряними отворами з двох сторін. Різне розташування первинних та вторинних отворів спричиняє подвійний розпад крапель під час розпилення. Ці розпилювальні пістолети зазвичай працюють під тиском рідини та повітря до 0,5 та 0,3 МПа відповідно. Шар зічнення, що формується близько і на поверхні мішені, викликає ефект перебризку (Рис. 3.1(а)), який перешкоджає прилипанню дрібних крапель з низьким осьовим імпульсом до поверхні у цьому типі розпилювача. Хоча цей тип розпилювача створює гладке покриття, його ефективність передачі низька (20%) порівняно з іншими розпилювачами.

Дослідження з двокомпонентними атомайзерами, використовуючи метод апроксимації кривих, дозволило отримати кореляцію для визначення розміру крапель. Обговорювались залежності між різними параметрами після удосконалення конструкції сопла. Вони вивчили вплив швидкості турбулентного повітря на траєкторії крапель і їх ефективність передачі. Вони зробили висновок, що краплі з розміром менше 120 мкм мають низьку ефективність передачі.

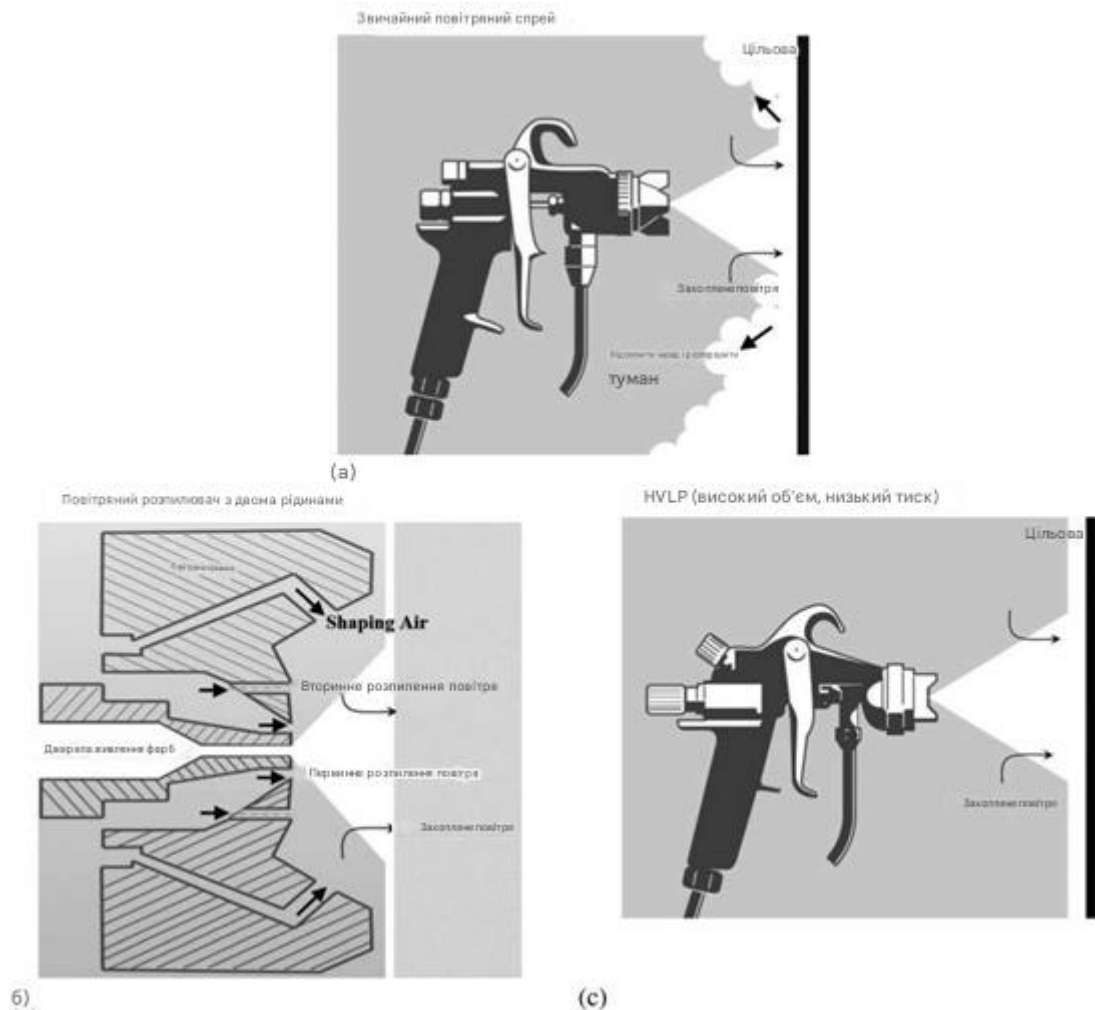


Рис. 3.1. Конструктивні особливості розпилювачів: (а) класичні повітряні розпилювачі, (б) атомізаторні повітряні розпилювачі двокомпонентного типу та (с) системи HVLP.

3.3 Пристрої з великим об'ємом і низьким тиском

На відміну від розпилювачів, описаних раніше, пристрої з великим об'ємом і низьким тиском (ВОНТ) спрямовують фарбу на ціль за нижчого тиску повітря. Ця характеристика призводить до значного зниження явища перебризкування [Рис. 3.1(с)]. ввів до використання пневматичні розпилювачі та турбінні системи як два основні типи устаткування ВОНТ. Технологія ВОНТ підвищує ефективність передачі і забезпечує покриття вищої якості, проте керування процесом покриття є досить складним. В системах ВОНТ низька інерція повітря призводить до неоднорідності покриття, збільшення витрат фарби і подовження часу роботи, що впливає на зниження продуктивності. У 2002 році було розроблено розпилювач середнього тиску малого обсягу, щоб

вирішити проблеми ВОНТ та забезпечити швидше завершення робіт з вищою ефективністю передачі. На рисунку 3.2 представлено інфрачервону термографію розпилення, що виконане за допомогою розпилювача ВОНТ. Вони зазначили, що з підвищенням рівня подачі рідини з 100 до 400 см³/хв кут розпилення розширюється, середній діаметр за Сотером зростає лінійно, а щільність центральної частини стає більшою.

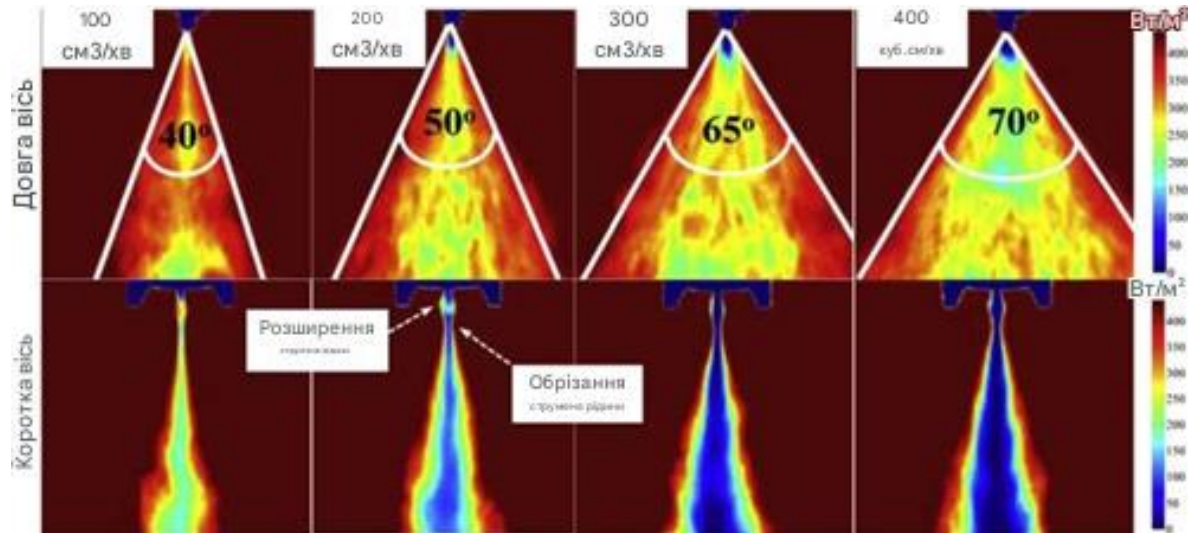


Рис. 3.2. Рис. 10. Термографічні знімки інфрачервоного спектру атомайзера ВОНТ за умови збільшення подачі рідини при сталому тиску повітря 0,4 МПа.

3.4 Розпилювачі без повітря під високим тиском

Розпилювачі без повітря під високим тиском застосовуються для різноманітних методів нанесення покриттів, завдяки їхній високій трансферній ефективності, яка досягається за рахунок великого тиску рідини. Фарба атомізується, проходячи через сопло з діаметром 0,18 до 1,2 мм під тиском від 8,0 до 52 МПа. Ці розпилювачі зазвичай створюють чіткий край з віяловидним візерунком розпилення, що дозволяє точно спрямувати струмінь, хоча таке використання є рідкісним у автомобільній промисловості [див. Рис. 3.3(а)]. Основи формування зв'язок та крапель у розпилювачах цього типу, розглядаючи потік як квазі-двовимірний. Залежність між діаметром сопла та середнім діаметром крапель за Сотером у таких установках. Вони з'ясували, що з підвищенням в'язкості фарби збільшуються розмір та розподіл крапель. Розпилювачі без повітря під високим тиском найчастіше використовуються в

умовах, які потребують великих обсягів покриття, наприклад, при нанесенні антикорозійних покриттів на автомобілі. Ключові чинники, що впливають на трансферну ефективність цих розпилювачів, зазначивши, що вона коливається від 70% до 95%. Вплив робочих параметрів на фарбування кораблів за допомогою таких розпилювачів, фокусуючись на інтегральних розмірах та швидкостях крапель. Вони повідомили про трансферні ефективності на рівні 55% при максимальній дистанції фарбування. Проблеми розпилювачів без повітря під тиском включають грубу атомізацію, значні втрати через перебризування, потенційні небезпеки в експлуатації та засмічення сопел. Незважаючи на це, ці розпилювачі широко використовуються у промисловому нанесенні покриттів, зокрема для водорозчинних фарб.

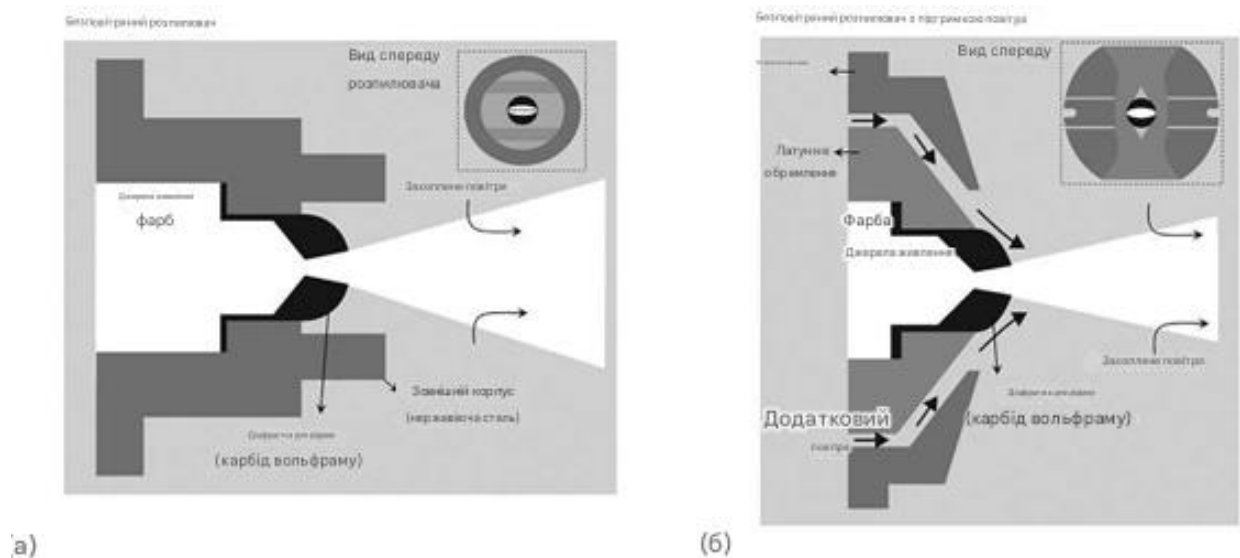


Рис. 3.3. Конструкція традиційних (а) безповітряних розпилювачів під тиском та (б) безповітряних розпилювачів з повітряною допомогою.

Безповітряні розпилювачі з повітряною допомогою. З кінця 1970-х років почалася розробка безповітряних розпилювачів з повітряною допомогою, які поєднують високу трансферну ефективність зі зниженим споживанням фарби. Ці розпилювачі поєднують технології ВОНТР та безповітряного розпилювання під тиском, інтегруючи їхні найкращі властивості для досягнення високої продуктивності та ефективності передачі. Фарба під високим тиском подається безповітряним насосом і доповнюється мінімальною кількістю повітря, що подається через повітряні сопла. Тиск рідкої фарби та допоміжного повітря коливається відповідно від 4.8 до 6.2 МПа та від 0.10 до 0.20 МПа. Такі

розпилювачі забезпечують гладке покриття, помірні темпи виробництва та вищу трансферну ефективність завдяки зменшенню перебризування. Згідно з обмеженою кількістю досліджень, Числові та експериментальні результати для безповітряного пістолета показали ТЕ на рівні 86% та 88%, тоді як для розпилювача з повітряною допомогою ці показники склали 78% та 77% відповідно.

3.5 Індекс ефективності передачі фарби розпилювачами

Індекс ефективності передачі (ІЕП) показує, яка частка загальної маси фарби, що подається в розпилювач, фактично осідає на оброблювану поверхню. Визначається він як відсоткове співвідношення маси фарби на виробі після фарбування до маси фарби, що була подана у розпилювач, тобто $TE = (m_f/m_i) * 100$, де m_i - маса фарби перед початком роботи, m_f - маса фарби після фарбування і сушіння, а m_{out} - маса фарби, що виходить з сопла. На рисунку 3.4 представлені діапазони ІЕП для різноманітних розпилювачів. Чутливість ТЕ стосується ряду параметрів, серед яких: (І) робочі налаштування, як-от швидкість і відстань до об'єкта фарбування, тиск повітря в системі формування струменя, швидкість обертання чаші при роботі з роторним атомайзером, а також (ІІ) технології фінішної обробки. [32]

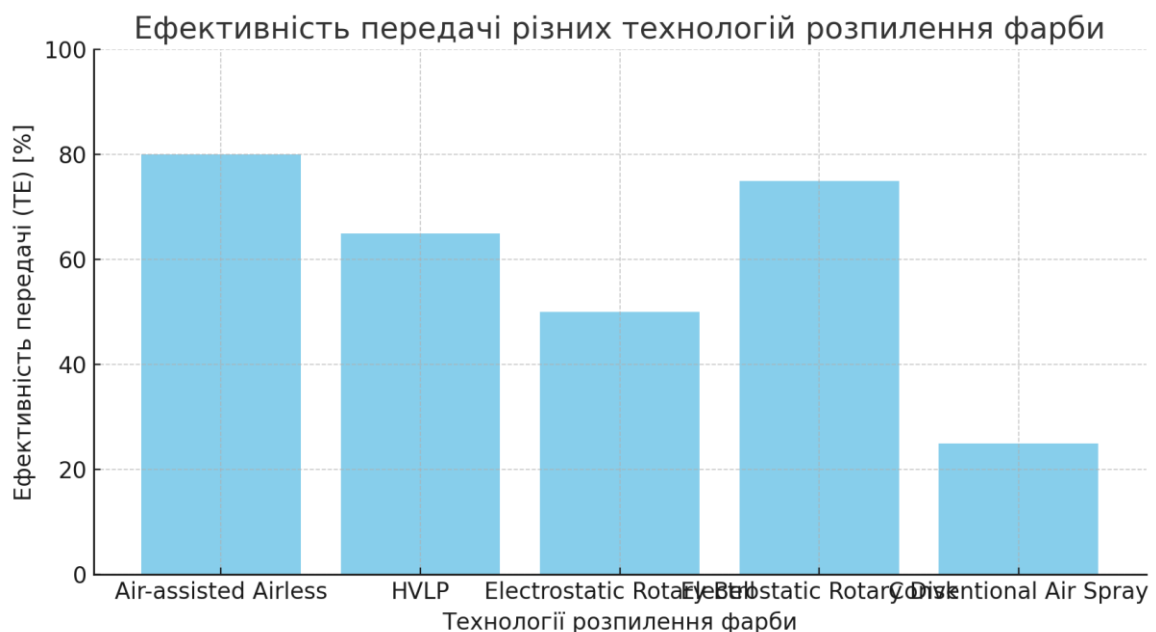


Рис.3.4. Приблизні коефіцієнти ефективності передачі

Згідно з представленими даними на рисунку 15, ефективність передачі (ІЕП) для електростатичних розпилювачів з обертовим дзвоном, які широко застосовуються у процесах автомобільного фарбування, коливається в межах 55%–95%. Проте окремі дослідження вказують, що в умовах реального виробництва цей показник рідко перевищує 60%. Розробка стратегій для підвищення ІЕП без компромісів щодо якості покриття має вирішальне значення. Це дозволить зменшити економічні витрати, мінімізувати негативний вплив на довкілля, скоротити викиди летких органічних сполук (ЛОС), зменшити утворення фарбувального осаду та перебризування. Навіть незначне підвищення ІЕП на 1% здатне забезпечити значну економію, що обчислюється мільйонами доларів на рік завдяки раціональнішому використанню матеріалів у фарбувальних цехах.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Підвищення якості зображень

Одним із ключових аспектів реалізації обраного методу контролю є забезпечення належної якості вхідного зображення. Для досягнення цієї мети застосовуються різні алгоритми обробки зображень. Головною особливістю вхідних зображень є наявність чітко вираженої текстури, яка повинна бути збережена для подальшого аналізу, водночас підвищуючи якість самого зображення. Як зазначено в роботі, більшість існуючих алгоритмів покращення зображень при обробці текстур разом із шумами та іншими дефектами часто видаляють значну частину інформації, необхідної для аналізу.

Серед методів, які забезпечують високу якість обробки, виділяється метод ковзного вікна. Цей підхід відзначається універсальністю та забезпечує стабільні результати незалежно від текстури або інших особливостей оброблюваних зображень. Розглянемо цей метод детальніше.

Суть методу полягає в поетапному переміщенні замкнутої області по зображенню. Ця область використовується для обчислення значень вихідного зображення, що наочно ілюструється на рисунку 4.1. Такий підхід дозволяє зберегти текстурну структуру зображення, мінімізуючи втрати важливої інформації під час обробки.

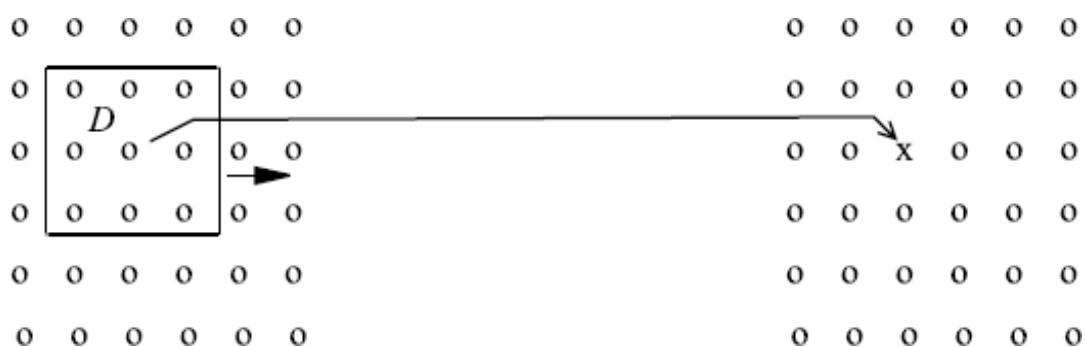


Рис. 4.1. Ілюстрація принципу роботи методу ковзного вікна.

Загальна математична модель цієї обробки виражається через рівняння, що описує:

$$(4.1)$$

$g(n1, n2), f(n1, n2)$ – двовимірні масиви відліків, які відповідають вхідному та вихідному зображенням;

G – оператор трансформації;

D – обмежена множина відліків, визначена у відношенні до початку координат, яка задає геометричну форму та розміри оброблюваного вікна.

Дослідження літературних джерел виявило, що одним із найефективніших підходів у цьому випадку є застосування системи, яка базується на кінцевій імпульсній характеристиці (перетворення за допомогою КІХ-фільтра).

Щоб визначити вихідний сигнал фільтра в межах вікна, необхідно виконати цифрову згортку вхідного сигналу з імпульсною характеристикою фільтра. Це передбачає обчислення суми значень вхідних відліків, помножених на відповідні коефіцієнти імпульсної характеристики.

Такий метод вимагає значного обсягу обчислювальних операцій, оскільки потрібно враховувати всі ненульові значення імпульсної характеристики. У практичному застосуванні це обмежує можливості методу до коротких імпульсних характеристик, що, своєю чергою, визначає невеликі розміри вікон обробки.

З урахуванням особливостей поставленої задачі, розмір оброблюваного вікна повинен бути значним, що істотно збільшує обсяг необхідних обчислень. Розв'язати цю проблему можна кількома способами.

Перший підхід полягає у використанні алгоритмів швидкої згортки. Хоча цей метод є одним із найпростіших для реалізації, згідно з дослідженнями, у багатьох випадках він забезпечує лише незначне скорочення обсягу обчислень, що робить його малоефективним у межах даного завдання.

Другий підхід передбачає застосування паралельної рекурсивної обробки. Цей метод складніший у реалізації, проте він суттєво підвищує ефективність обчислень. Використання таких алгоритмів дозволяє формувати гістограми зображень, обчислювати середні значення яскравості, дисперсії, виконувати фільтрацію та інші види обробки. Рекурсивна обробка базується на використанні поточних відліків і результатів попереднього кроку для виконання розрахунків на поточному етапі.

Фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ-фільтри), засновані на лінійній рекурсивній фільтрації, мають істотний недолік – низьку стійкість. Щоб усунути цю проблему, зазвичай застосовуються фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ-фільтри).

Серед різних варіантів реалізації цього підходу найефективнішим виявився фільтр із роздільною по координатах імпульсною характеристикою.

Цей фільтр працює шляхом послідовної обробки: спочатку виконуються рекурсивні обчислення для стовпців зображення, а потім построчно обробка отриманих результатів. Такий підхід дозволяє уникнути залежності кількості обчислень від розміру ненульових відліків і зводить їх до обсягу, що визначається кількістю рекурсій. Загальна кількість обчислень залежить від розміру вікна D . На практиці для цього методу найчастіше використовують прямокутне вікно, оскільки фільтрація в довільних областях є технічно складною або неможливою.

Рівняння, що описує прямокутні області, має вигляд:

$$D: -M_1^- \leq m_1 \leq M_1^+; -M_2^- \leq m_2 \leq M_2^+, \quad (4.2)$$

$M_1^-, M_1^+, M_2^-, M_2^+$ параметри, що визначають межі вікна за координатами $M_1^- + M_1^+ \geq 0, M_2^- + M_2^+ \geq 0$.

Один із підходів до застосування описаної методики передбачає використання прямокутних вікон, які є симетричними відносно центрального елемента.

Такі вікна можна описати за допомогою рівняння:

$$D: -M_1 \leq m_1 \leq M_1; -M_2 \leq m_2 \leq M_2. \quad (4.3)$$

Для реалізації цього підходу до фільтрації зображень необхідно врахувати кілька ключових аспектів: визначення параметрів вікна, вибір K базисних функцій, що будуть використані для розкладу, а також встановлення відповідних коефіцієнтів для фільтра.

Завдання визначення розміру вікна зазвичай вирішується шляхом застосування евристичних підходів. Вибір K функцій і обчислення коефіцієнтів для фільтра базуються на чисельних методах із перебором можливих варіантів.

Обробка сигналу, представленого базисними функціями, передбачає вибір підмножини, яка забезпечує максимально ефективну обробку. Для цього розраховується показник якості R , максимальне значення якого шукається серед усіх можливих комбінацій базисних функцій K . Проте цей підхід вимагає виконання значної кількості обчислень, що ускладнює його реалізацію на практиці.

Оптимізувати цей процес можна через впорядкування базисних функцій і використання перших K функцій із набору. У якості базису найкраще застосовувати базис Фур'є з упорядкуванням функцій за зростанням частоти. Однак слід зазначити, що порядок слідування функцій може змінюватися, а це може призвести до формування підмножини, яка не є оптимальною.

Згідно з дослідженнями, раціональним підходом до вибору базисних функцій є використання субоптимального методу поступового додавання. Цей метод передбачає початковий вибір функції з найвищим показником якості, після чого до неї додається наступна функція, і для їх комбінації обчислюється максимальний показник якості. У підсумку формується набір із K функцій, які відповідають заданим критеріям. [25]

Щоб спростити цю процедуру, часто використовують базис Фур'є, який дозволяє на кожному етапі додавати групу функцій із однаковими частотними індексами. Такий підхід забезпечує значне скорочення обчислень порівняно з методом повного перебору, хоча й може призводити до незначної втрати оптимальності обраної підмножини функцій.

Обчислення показника якості для обробки сигналів із використанням підмножини базисних функцій, а також розрахунок коефіцієнтів розкладу імпульсної характеристики фільтра для кінцевої підмножини здійснюються за єдиною методологічною схемою.

Шукані коефіцієнти подаються у вигляді вектор-стовпця $A = \{a_k\}_{k=0}^{K-1}$, який подається у вигляді матриці:

$$A = B^{-1}C, \quad (4.4)$$

Під час вибору базисних функцій застосовується показник якості, розрахунок якого здійснюється за відповідним співвідношенням:

$$R = A^T C = C^T B^{-1} C, \quad (4.5)$$

1 – індекс, який вказує на операцію обернення матриці;

T – індекс, що відображає операцію транспонування векторів.

Залежно від специфіки поставленого завдання, методика обчислення матриці B та вектора C може змінюватися.

Для реалізації паралельної структури фільтра необхідно вирішити окрему задачу, яка була зазначена раніше. Основна функція такого фільтра полягає в трансформації вхідного стаціонарного випадкового процесу у вихідний процес із наперед заданими характеристиками енергетичного спектра.

Взаємозв'язок між вхідним і вихідним сигналами фільтра визначається рівнянням:

$$\Phi_g(e^{i\omega}) = \Phi_f(e^{i\omega}) |\bar{H}(e^{i\omega})|, \quad (4.6)$$

де $\Phi_g(e^{i\omega})$ – енергетичний спектр вхідного сигналу фільтра,

$\Phi_f(e^{i\omega})$ – енергетичний спектр вихідного сигналу,

$\bar{H}(e^{i\omega})$ – частотна характеристика фільтра.

На основі цього виразу можна зробити висновок:

$$\bar{H}(e^{i\omega}) = \sqrt{\frac{\Phi_g(e^{i\omega})}{\Phi_f(e^{i\omega})}}. \quad (4.7)$$

Таким чином, постає завдання апроксимації частотної характеристики з урахуванням вагової функції, що дозволяє визначити параметри паралельного фільтра.

Загальні розрахункові формули при цьому мають наступну форму:

$$b_{lk} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi_f(e^{i\omega}) H_l(e^{i\omega}) H_k(e^{i\omega}) d\omega, \quad (4.8)$$

$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sqrt{\Phi_f(e^{i\omega}) \Phi_g(e^{i\omega})} H_k(e^{-i\omega}) d\omega, \quad (4.9)$$

$$b_{lk} = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-M^-}^{M^+} \sum_{n=-M^-}^{M^+} h_l(m) h_k(n) B_f(m-n), \quad (4.10)$$

де $B_f(m)$ – функція автокореляції для вхідного процесу,

$$c_k = \sum_{m=-M^-}^{M^+} \bar{h}(m) h_k(m), \quad (4.11)$$

$h^*(m)$ – це послідовність, отримана шляхом застосування оберненого перетворення Фур'є.

Обернене перетворення Фур'є визначається за такою формулою:

$$\bar{h}(m) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sqrt{\Phi_f(e^{i\omega})\Phi_g(e^{i\omega})} e^{i\omega m} d\omega. \quad (4.12)$$

Мінімальне значення похибки, що виникає при визначенні коефіцієнтів даного фільтра, обчислюється за такою формулою:

$$\varepsilon_{min}^2 = D_g - R, \quad (4.13)$$

де D_g – дисперсія вихідного випадкового процесу.

На рисунку 4.2 зображено структуру у формі хреста, яка містить по 9 елементів у кожному напрямку. Це зображення було попередньо модифіковане шляхом дворазового усереднення з використанням вікна розміром 3×3 елементи, а також додаванням адитивного білого шуму з дисперсією D_v . На прикладі цього зображення проведено аналіз ефективності застосування паралельно-рекурсивних КІХ-фільтрів, побудованих на базі поліноміальних функцій.

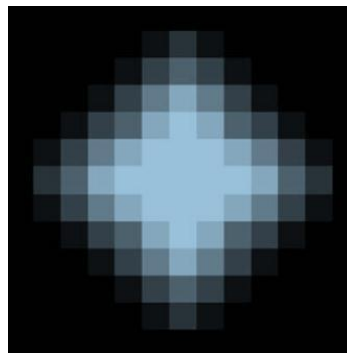


Рис. 4.2. Структура у формі хреста.

Ефективність фільтрації оцінюється за допомогою залежності, яка визначається як добуток відстані Махаланобіса між класами об'єкта та фону на дисперсію, що враховує складність виконаних обчислень. Для цього застосовується наступна формула:

$$U = U_+ + \eta U, \quad (4.14)$$

де η – коефіцієнт, що характеризує відносну складність операції множення.

Виконаємо порівняльний аналіз ефективності застосування рекурсивних поліноміальних базисів. Для розрахунків приймемо значення коефіцієнта відносної складності операції множення рівним 3. Результати проведеної оцінки відображені на рисунку 4.3.

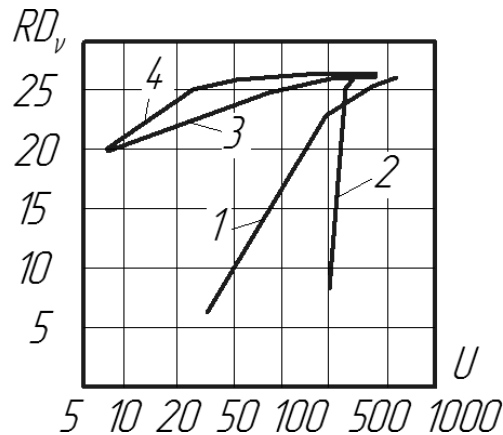


Рис. 4.3. Оцінка ефективності використання рекурсивних поліноміальних базисів.

Оцінка ефективності, наведена на рисунку 4.3. базиса демонструє найкращі характеристики, оскільки має найбільше значення відстані Махаланобіса.

Оцінка ефективності алгоритмів прямої та швидкої згортки проводилася з урахуванням змін розмірів ковзного вікна.

Ефективність паралельно-рекурсивних фільтрів оцінювалася шляхом перебору підмножини базисних функцій із множини з індексами:

$$0 \leq k \leq K, \quad 0 \leq l \leq K. \quad (4.15)$$

Ефективність алгоритмів автоматичної обробки значною мірою визначається їхньою здатністю адаптуватися до змінних умов, тобто враховувати характеристики вхідних даних та підлаштовуватися під них.

Процес фільтрації зображення складається з кількох етапів. На початку визначається тип алгоритму, який буде використовуватися для обробки. Далі проводиться детальний аналіз зображення, що дозволяє встановити його структурні, статистичні та інші параметри. На основі отриманих даних налаштовуються параметри обраного алгоритму для подальшої фільтрації.

У практичному застосуванні важливо заздалегідь визначити клас алгоритмів, які будуть використовуватися. Якщо поставлено завдання досягти

конкретного результату, процес оптимізації має бути спрямований на вирішення задач для визначеного класу об'єктів. Однак слід врахувати, що шлях до отримання оптимального рішення може відрізнятись від описаного алгоритму і, відповідно, не бути оптимальним за своєю суттю.

Задачі, пов'язані з обробкою та аналізом зображень, найчастіше вирішуються шляхом комбінування та евристичного синтезу різноманітних підходів до обробки. Це обумовлено тим, що для створення оптичних сигналів використовуються різні математичні моделі, а багато задач складно формалізувати. Додатковою проблемою є визначення чітких критеріїв для оцінки якості обробки.

Існуючий підхід має ряд значних недоліків, що обумовлені наявністю численних алгоритмів, орієнтованих на вирішення окремих вузькоспеціалізованих завдань. Це призводить до того, що такі алгоритми виявляються малоефективними та не завжди можуть забезпечити належну якість обробки. Для подолання цих проблем часто виникає необхідність ускладнення архітектури систем і програмного забезпечення.

Альтернативним шляхом вирішення цих питань є використання принципово нового підходу, заснованого на прийнятті рішень за прецедентом із наперед невизначеним механізмом перетворення. У цьому випадку системі задається бажаний результат обробки. Система, у свою чергу, автоматично синтезує алгоритм для формування вирішального правила. У межах такого підходу обробка зображення зводиться до визначення заданого результату у даних, отриманих із вхідного зображення.

Детально розгляньмо запропонований підхід. Припустімо, що є вхідне зображення F , для якого потрібно виконати перетворення G . Це перетворення повинно бути якомога ближчим до еталонного перетворення G_0 , яке представляє ідеальне зображення у необхідному вихідному вигляді. Перетворення може мати різний рівень складності та ступінь формалізації.

Як навчальну вибірку використовують узгоджені пари (F, G_0) . Це дозволяє створити класифікатор, який на основі вхідного зображення F формує вектор ознак, що відповідає вихідному зображенню G . У разі розбіжностей між

G і G_0 , тобто за результатами оцінки якості обробки, можна коригувати набір ознак і структуру класифікатора.

На рисунку 4.4 наведено схему процесу навчання класифікатора за цією методикою. Варто зауважити, що класифікатор, налаштований таким способом, придатний для роботи лише із зображеннями того ж самого класу.

Рисунок 4.5 ілюструє схему обробки даних за допомогою зазначеного класифікатора.

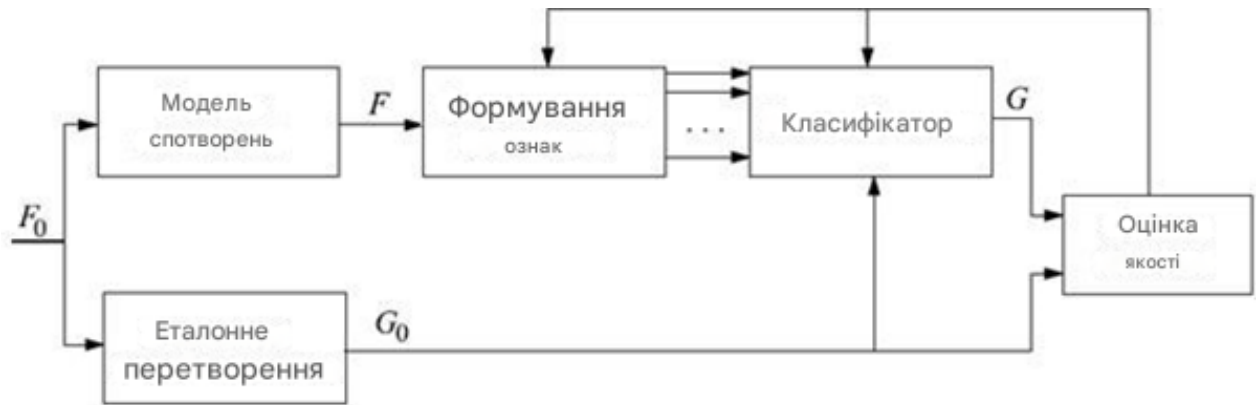


Рис. 4.4. Схема процесу навчання класифікатора.

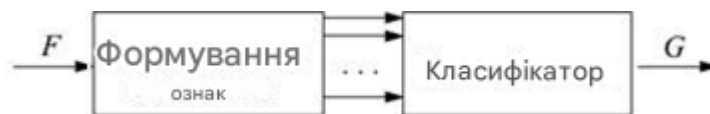


Рис. 4.5. Схема обробки зображення із використанням класифікатора.

У практичних завданнях реальні зображення часто характеризуються великою кількістю класів вихідних даних, а також високою розмірністю вектора ознак. Це призводить до значного збільшення розміру навчальної вибірки та, відповідно, до суттєвого зростання обсягу обчислень, які необхідно виконати під час обробки. Така ситуація ускладнює ефективне застосування цього підходу в його базовій формі.

Процес можна спростити, використовуючи просторово-інваріантну обробку зображень за допомогою ковзного вікна. Суть цього підходу полягає в наступному: для кожного положення вікна формується вектор ознак розмірністю K для кожного вихідного відліку. Це дозволяє значно зменшити кількість локальних ознак зображення завдяки невеликому розміру вікна. Також спостерігається зменшення кількості класів, оскільки для кожного

відліку рішення приймається окремо. В результаті навчальна вибірка буде більшою, оскільки вона містить всі можливі позиції ковзного вікна на зображенні.

Для розширення вибірки в відеосистему можна інтегрувати додаткові спотворення та перетворення зображень.

4.2 Бінаризація зображень

Складність порівняння відновленого зображення з його еталонним варіантом може бути спрощена за допомогою процедури бінаризації. Вхідне зображення являє собою композицію сегментів із консистентними характеристиками. Це дозволяє представити його у вигляді обмеженої кількості чітко відділених один від одного областей певного типу. Під час аналізу такого зображення формується його карта - класифікація типів областей та їхніх геометричних властивостей. Цей аналіз зазвичай включає процес сегментації, простішою формою якої є бінаризація, що ділить зображення на два фундаментальні типи областей.

Бінаризація зображень заснована на ідентифікації характеристик, які дозволяють розрізнити різні типи ділянок. Зазвичай в якості характеристик використовуються середня яскравість, дисперсія коливань та кореляційні властивості. Найчастіше диференціація ділянок базується на відмінностях у середній яскравості. У випадку однакової яскравості залучається аналіз дисперсії коливань. Кореляційні характеристики означають зміну від плавних, повільних коливань яскравості до значно швидших.

Під час аналізу реальних зображень можуть виникати ситуації, коли для чіткого розділення ділянок необхідно використовувати комбінацію зазначених характеристик. Це зумовлено різноманітністю візуальних патернів та потребою в точному визначенні типу ділянки.

У практичних задачах часто зустрічаються зображення з чітко окресленими, але однорідними за характеристиками ділянками. В таких випадках традиційний підхід до бінаризації, заснований на моментно-кореляційних характеристиках, може бути неефективним.

В умовах кольірних зображень, колір може слугувати додатковою ознакою для сегментації. Вирішення таких задач на практиці може бути складним, проте ефективно допомагає в якісній обробці вхідного зображення контрольованого об'єкта. Оскільки не існує універсального підходу до ефективності використання методів, різноманіття методів бінарної сегментації є значним. Аналіз існуючих методів бінаризації виявив, що порогова обробка зображень є найбільш перспективною для вирішення поставленого завдання. Цей метод є одним з найпростіших і найефективніших, причому його застосування обмежується відмінностями середньої яскравості між ділянками на зображенні.

Розглянемо детальніше цей метод.

Перетворення точок вихідного зображення $y(i, j)$ з точок вхідного зображення $x(i, j)$ здійснюється за наступною формулою:

$$y(i, j) = \begin{cases} y_0, & \text{при } x(i, j) \leq x_0 \\ y_1, & \text{при } x(i, j) > x_0 \end{cases} \quad (4.16)$$

Для коректної обробки зображень важливо встановити відповідний поріг обробки (x_0), а також визначити рівні вихідної яскравості (y_0, y_1).

Кожну точку зображення потрібно віднести до одного з класів - A або B , використовуючи для цього задані рівні яскравості y_0 та y_1 як мітки. Оптимальним є використання чорного та білого кольорів для наочності обробленого результату. Якщо зображення потрібно поділити на декілька класів, то і порогів яскравості має бути стільки ж, скільки і класів.

Основною задачею в автоматизації процедури бінаризації зображень є точне визначення порогу обробки. Серед численних методів вирішення цієї проблеми особливо ефективним є метод аналізу гістограми вихідного зображення, що дозволяє оптимально налаштувати параметри обробки.

Ця техніка заснована на вивченні гістограми, представленої функцією $w(x)$, з діапазоном значень x від 0 до 255, де 0 відповідає чорному кольору, а 255 - білому. Гістограма для кожного класу має однопіковий розподіл і лише невелику кількість точок на кордонах класів. З цих спостережень випливає, що кожен клас ідентифікується через індивідуальні піки, а області у впадинах гістограми слугують межами, які фактично становлять пороги для сегментації.

Ілюстрація цього методу застосована на бінаризацію зображень представлена на рисунку 4.6.

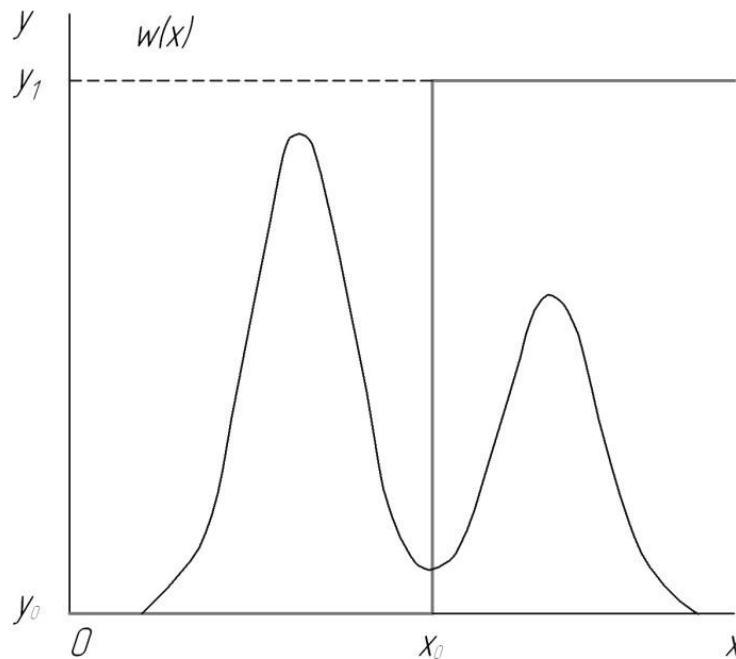


Рис. 4.6. демонструє ідеальний випадок порогу бінаризації зображення.

Гістограми, що відображають реальні зображення, часто включають багато впадин, що робить складним процес виявлення мінімумів. Додатково, кордони ділянок із однорідними властивостями на таких зображеннях зазвичай є нечіткими, що призводить до зростання числа крайніх точок та викривлення гістограм. Це, в свою чергу, може призвести до зменшення кількості або повної відсутності впадин. Отже, застосування зазначеного підходу для встановлення порогів обробки в умовах реальних зображень виявляється складним завданням.

Для вирішення цієї задачі можна використати дискримінантний критерій. Давайте розглянемо цей метод більш глибоко. Задумаємося над тим, що оброблюваний розподіл яскравості зображення $w(x)$, із значеннями x від 0 до 255, містить два різних типи ділянок. Ці ділянки можливо розділити використовуючи ідеально підбрану границю x_0 . Оптимальний поріг визначається через дискримінантну функцію $\eta(x_0^*)$, де $0 \leq x_0^* \leq 255$. Цей пробний поріг x_0^* стає оптимальним, коли максимізує значення функції $\eta(x_0^*)$, забезпечуючи найточніше розділення ділянок на зображенні.

При розробці дискримінантної функції ми виходимо з того, що x^* може слугувати потенційним порогом для розділення розподілу $w(x)$, де $0 \leq x \leq 255$, на два класи. Враховуючи, що кількість межових точок з яскравістю x_0^* є невеликою, можливо ігнорувати їхню приналежність до будь-якого класу.

Імовірність того, що точка належить до класу A , визначається наступним виразом:

$$p_A = \sum_{x=0}^{x_0^*} w(x) = p(x_0^*). \quad (4.17)$$

При аналізі ймовірності приналежності точки до класу B , ми користуємося відповідним математичним виразом.

$$p_B = \sum_{x=x_0^*+1}^{255} w(x). \quad (4.18)$$

Нормування розподілу ймовірностей забезпечує правильність їхнього сумарного значення, що має дорівнювати одиниці. Цей процес дозволяє точно визначити частку ймовірності, що припадає на кожен з класів, у тому числі і на клас B .

$$p_A + p_B = 1. \quad (4.19)$$

На основі цього, сегмент, який відноситься до класу A , характеризується розподілом $w(x)$, для якого виконується $0 \leq x \leq x_0^*$. Водночас, сегмент, що приписується класу B , представлений розподілом $w(x)$, де $x_0^* + 1 \leq x \leq 255$. З цих даних формулюємо вирази розподілів $w_A(x)$ та $w_B(x)$ для відповідних класів A (4.20) та B (4.21):

$$w_A(x) = \frac{w(x)}{p_A}, \quad 0 \leq x \leq x_0^*, \quad (4.20)$$

$$w_B(x) = \frac{w(x)}{p_B}, \quad x_0^* + 1 \leq x \leq 255. \quad (4.21)$$

Для визначення математичних очікувань відповідних розподілів ймовірностей використовуються наступні формули:

$$\mu_A = \sum_{x=0}^{x_0^*} x w_A(x) = \sum_{x=0}^{x_0^*} x \frac{w(x)}{p_A}, \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \mu_B &= \sum_{x=x_0^*+1}^{255} x w_B(x) = \sum_{x=x_0^*+1}^{255} x \frac{w(x)}{p_B} = \frac{\sum_{x=0}^{255} x w(x) - \sum_{x=0}^{x_0^*} x w(x)}{x_B} = \\ &= \frac{\mu(255) - \mu(x_0^*)}{x_B} = \frac{\mu(255) - \mu(x_0^*)}{1 - p(x_0^*)}, \end{aligned} \quad (4.23)$$

$\mu(255) = \sum_{x=0}^{255} xw(x)$ математичне очікування загального кадру

$\mu(x_0^*) = \sum_{x=0}^{x_0^*} xw(x)$ математичне очікування для класу A .

Що стосується дисперсії кадру, її можна розрахувати згідно з наступним виразом:

$$\sigma_T^2 = \sum_{x=0}^{255} [x - \mu(255)]^2 w(x). \quad (4.24)$$

Розробка дискримінантної функції здійснюється на базі аналізу міжкласової дисперсії, визначеної за певним математичним виразом.

$$\sigma_M^2 = p_A (\mu_A - \mu(255))^2 + p_B (\mu_B - \mu(255))^2. \quad (4.25)$$

Виведення дискримінантної функції проводиться на основі встановленого відношення.

$$\eta(x_0^*) = \frac{\sigma_M^2(x_0^*)}{\sigma_T^2}. \quad (4.26)$$

Ідеальний поріг для розділення класів визначається через специфічний математичний вираз:

$$x_0 = \arg \max_{x_0^*} \eta(x_0^*). \quad (4.27)$$

Пік виразу (4.26) співпадає з максимумом його чисельника, адже дисперсія зображення в знаменнику не залежить від x_0^* . Отже, для визначення цього піку необхідно зосередитися на аналізі міжкласової дисперсії (4.25). Розглядаючи формулу (4.17), можна зробити висновок, що поріг обробки матиме тенденцію до зниження, якщо ймовірність p_A стрімко зменшуватиметься до нуля. У такому випадку, весь образ буде віднесено до класу B , отже, μ_B наблизиться до $\mu(255)$, і вираз (4.26) вийде на нуль. Схожий результат очікується і при встановленні порогу на протилежному краї значення $x_0^* = 255$. Оптимальний поріг визначається як абсциса, на краях якої значення виразу (4.26) досягають нуля, при цьому показники у формулах (4.25) та (4.27) не можуть бути негативними. [14]

При розгляді практичних завдань щодо встановлення порогів обробки зустрічаються ситуації, коли існують виражені відмінності між площами територій, що належать до класів A і B . У випадках, коли існує лише два класи, дискримінантна функція $\eta(x_0^*)$ може демонструвати декілька піків. Тоді

потрібно знайти абсолютний максимум цієї функції. Для цього ініціюється процес, який починається з визначення математичного очікування $\mu(255)$ та дисперсії зображення σ^2 . Далі, для кожного тестового порогу x^* , слід оцінити ймовірності належності точок до класів A та B , а також розрахувати математичні очікування μ_A та μ_B , на основі чого обраховується значення дискримінантної функції $\eta(x_0^*)$. Для скорочення кількості обчислень можна застосувати трансформацію виразу (4.25), що стосується міжкласової дисперсії, з використанням формул (4.17)...(4.23), що призводить до виведення нових формул для математичних очікувань.

$$p_A \mu_A + p_B \mu_B = \mu(255). \quad (4.28)$$

Поєднуючи отримані дані, розкладаємо на складові квадратичні різниці, які зазначені у формулі (4.25). Від цього процесу ми отримуємо наступне:

$$\sigma_M^2 = p_A p_B (\mu_B - \mu_A)^2. \quad (4.29)$$

З формули (4.28) визначаємо параметри для розрахунку μ_B . Цей результат вводимо у формулу (4.29), в результаті чого маємо:

$$\sigma_M^2(x_0^*) = \frac{[\mu(255)p(x_0^*) - \mu(x_0^*)]^2}{p(x_0^*)[1 - p(x_0^*)]}. \quad (4.30)$$

Цей вираз включає лише ненормалізоване математичне очікування $\mu(x_0^*)$ і ймовірність $p(x_0^*)$, що дозволяє істотно зменшити кількість необхідних розрахунків. Це робить його ідеально підходящим для автоматизованого пошуку оптимального порогу.

Ось як можна продемонструвати ефективність застосування вищезгаданого алгоритму автоматичної бінаризації, використовуючи як приклад виявлення дефекту тріщини, який ілюструється на рисунку 4.7. Результати обробки цього зображення можна побачити на рисунку 4.8.



Рис. 4.7. Демонструє первісне зображення дефекту під назвою тріщини.

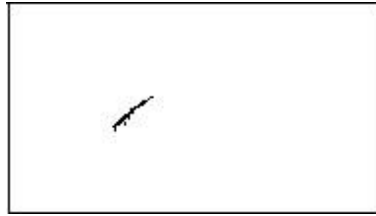


Рис. 4.8. Ілюструє результати, отримані за допомогою автоматизованої бінаризації цього дефекту.

На рисунку 4.9 представлено гістограму початкового зображення, яка відображає розподіл яскравості.

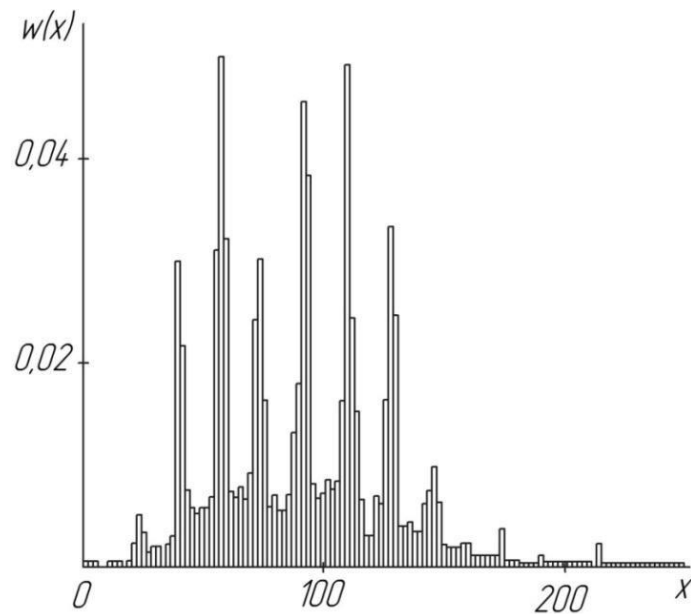


Рис. 4.9. Гістограма зображення.

Оцінюючи результати аналізу дискримінантної функції $\eta(x^*)$ на основі зазначеної гістограми, представлені на рисунку 4.10, ми можемо зробити наступні спостереження:

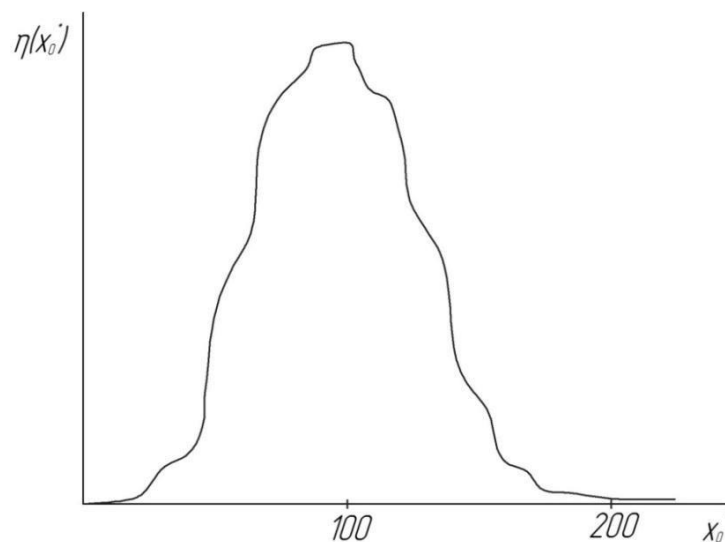


Рис. 4.10. Дискримінантна функція.

Після аналізу даних з рисунків 4.9 та 4.10 встановлено, що гістограма первісного зображення включає численні перепади, що перешкоджають чіткому розділенню класів через відсутність однозначного мінімуму. Зате процес визначення порогового значення за допомогою дискримінантної функції виявляється значно простішим, оскільки графік функції має унімодальний характер з чітко визначеним екстремумом. У цьому конкретному випадку, поріг бінаризації встановлюється на рівні $x_0 = 100$. Ця техніка автоматичної бінаризації зображень показала ефективність при реалізації заданої задачі.

4.3 Аналіз текстур у зображеннях

Прогресивний аналіз зображення використовує методику порівняння зі стандартним зразком на основі текстурного аналізу. Цей підхід дозволяє ідентифікувати і зберігати ключові текстурні особливості зображення, що подальше їх порівняння з характеристиками еталонного зразка. Такий аналіз можливий не тільки на рівні цілісного зображення, але й для його окремих фрагментів. Алгоритм аналізу текстур ґрунтується на критерії кореляційної відповідності. «Аналіз фрагменту контрольованої поверхні B у визначеній зоні пошуку» Ω , обмежений розмірами $L \times L = n + m$, проводиться порівнянням з еталонним зображенням A , представленим у формі матриці U_0 з розмірами $n \times n$. Відстань h у площині P_2 дискретної сітки hZ_2 встановлює перекривання між фрагментами. Ознаки $\{u_0(x), x = (x, y)\}$ на еталонному зображенні A та $\{u(x)\}$ на зображенні контрольованої поверхні B визначаються в рамках дискретної сітки. [18]

Процедура порівняння здійснюється шляхом застосування функції схожості, яка порівнює еталонне зображення $\{u_0(x), x \in \Gamma A\}$ з контрольованим $\{u(x), x \in \Gamma B\}$, здійснюючи зсув кожного фрагмента на один дискрет. Щоб забезпечити точну реєстрацію точок сполучення на зображеннях, текстурні атрибути фрагменту еталонного зображення мають бути точно визначені за допомогою функції схожості, з мінімальними похибками та найвищою точністю. Критерій відповідності елементів зображень одного і того ж об'єкта визначається так:

$$u_0(x, y) = (au(x + k, y + l) + b)rect(x/n, y/n) + \varepsilon(x, y), \quad (4.31)$$

де a - показник контрасту;

b - показник середнього рівня освітленості;

k, l - коефіцієнти відносного зміщення еталону і контрольованого зразка;

$\varepsilon(x, y)$ - шумові перешкоди.

$$rect(x/n, y/n) = \begin{cases} 1, & x \leq n, y \leq n \\ 0, & \end{cases}. \quad (4.32)$$

Із формули (4.31) можна зрозуміти, що процес порівняння зводиться до виявлення параметрів зсуву між еталонним і контрольованим зображеннями. Припустимо, що рівень середнього освітлення є однаковим для усіх зображень, це дозволяє переходити до використання центрованих змінних при аналізі параметрів k та l . В результаті такого підходу ми отримаємо наступні результати:

$$\check{u}(x, y) = u(x, y) - \bar{u}, \quad \bar{u} = \frac{1}{L^2} \sum_{(x,y) \in \Omega} u(x, y), \quad (4.33)$$

$$\check{u}_0(x, y) = u_0(x, y) - \bar{u}_0, \quad \bar{u}_0 = \frac{1}{n^2} \sum_{x,y=1} u_0(x, y). \quad (4.34)$$

Середньоквадратична помилка у точці (k, l) розглядається як показник розбіжності:

$$\varepsilon_a^2(k, l) = \sum_x \sum_y [\check{u}_0(x, y) - a\check{u}(x + k, y + l)]^2. \quad (4.35)$$

Для того, щоб мінімізувати цю функцію, необхідно провести детальний перебір можливих зсувів еталону в межах визначеної зони оброблюваного зображення. Успішне досягнення збіжності можливе тільки за умови:

$$\varepsilon_a^2(k, l) \leq \lambda, \quad (4.36)$$

де λ - це заданий поріг.

Параметр контрастності a розраховується на основі умови мінімізації помилки:

$$(\varepsilon_a^2(k, l))'_a = 0. \quad (4.37)$$

Підставляючи знайдене значення a у рівняння (4.35), отримуємо такий результат:

$$\varepsilon_a^2(k, l) = \sum_x \sum_y [\tilde{u}_0(x, y)]^2 - \frac{[\sum_x \sum_y \tilde{u}_0(x, y) \tilde{u}(x, y)]^2}{\sum_x \sum_y [\tilde{u}(x, y)]^2}. \quad (4.38)$$

Цей вираз можна модифікувати, виключивши з нього перший член. Це цілком обґрунтовано, оскільки даний член не містить параметрів, пов'язаних із відносним зсувом, є постійною величиною та не впливає на положення екстремуму функції. У результаті отримуємо наступний вираз:

$$\bar{\varepsilon}_a^2(k, l) = \frac{[\sum_x \sum_y \tilde{u}_0(x, y) \tilde{u}(x, y)]^2}{\sum_x \sum_y [\tilde{u}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [\tilde{u}_0(x, y)]^2}. \quad (4.39)$$

З огляду на це, визначення максимального значення коефіцієнта кореляції між поточним фрагментом і еталоном здійснюється за допомогою такої формули:

$$\hat{r}(k, l) = \frac{[\sum_x \sum_y \tilde{u}_0(x, y) \tilde{u}(x, y)]^2}{\{\sum_x \sum_y [\tilde{u}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [\tilde{u}_0(x, y)]^2\}^{\frac{1}{2}}}. \quad (4.40)$$

Граничне значення $r_{\text{пор}}$ для взаємної кореляції $\max \hat{r}(k, l)$ використовується як показник достовірності виявлення. Процес виявлення вважається надійним, якщо виконується така умова:

$$\max \hat{r}(k, l) \geq r_{\text{пор}}. \quad (4.41)$$

Дотримання цієї умови гарантує з високою ймовірністю відповідність між оброблюваним і еталонним зображенням.

При використанні випадкових вибірок для визначення порогового значення застосовують функцію розподілу коефіцієнта кореляції, а також довірчу ймовірність для ухвалення рішення про дійсну схожість між фрагментами.

4.4 Оцінка геометричних характеристик дефектів

Під час аналізу зображень часто виникає необхідність здійснювати вимірювання для отримання характеристик, які описують як зображення в цілому, так і його окремі ділянки. Найпоширеніші завдання в цьому контексті включають визначення статистичних параметрів зображення, виявлення об'єктів на ньому, встановлення їхніх координат, а також оцінювання їхніх геометричних властивостей.

Для дефектів лакофарбового покриття одним із ключових завдань є визначення геометричних параметрів, зокрема розмірів дефекту, його площі та місця розташування.

Для виконання цієї задачі застосовується спеціальний алгоритм. У бінарному зображенні основний фон представлений білим кольором, тоді як дефекти зображуються чорним. Це означає, що значення фону дорівнює нулю, а значення, що відповідає дефекту, - одиниці.

Розглянемо дію алгоритму на прикладі обчислення площі об'єкта. Кожен елемент площі представлений як квадрат із одиничною площею, що проілюстровано на рисунку 4.11. Ідентифікація дефекту здійснюється на основі критерію чотирьох зв'язності.

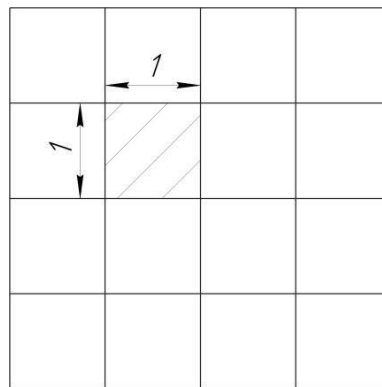


Рис. 4.11. Квадрат одиничної площі.

Матриця відліків аналізується послідовно, рядок за рядком, починаючи з верхнього лівого кута і рухаючись вниз та праворуч. Зосередимо увагу на обробці внутрішнього елемента $f(n_1, n_2)$.

Якщо значення $f(n_1, n_2)$ дорівнює 0, що означає його належність до фону, алгоритм переходить до наступного елемента.

Якщо значення $f(n_1, n_2)$ дорівнює 1, тобто воно відповідає об'єкту, цей елемент аналізується і зараховується до об'єкта зображення.

Алгоритм передбачає аналіз сусідніх елементів $f(n_1 - 1, n_2)$ та $f(n_1, n_2 - 1)$. Якщо одночасно виконується умова $f(n_1 - 1, n_2) = 0$ і $f(n_1, n_2 - 1) = 0$, оцінюваний елемент визначається як початок нової області, тобто створюється новий об'єкт. У цьому випадку відповідні значення додаються до таблиці характеристик областей.

Якщо виконується умова $f(n_1 - 1, n_2) = 0$ і $f(n_1, n_2 - 1) = 1$, то оцінюваний елемент включається до області, якій належить $f(n_1, n_2 - 1)$, і площа цієї області збільшується на одиницю. Аналогічно, якщо $f(n_1 - 1, n_2) = 1$ і $f(n_1, n_2 - 1) = 0$, то поточний елемент додається до області, визначеної $f(n_1 - 1, n_2)$, після чого виконується перерахунок її площі.

У разі виконання умови $f(n_1 - 1, n_2) = f(n_1, n_2 - 1) = 1$ необхідно провести аналіз областей, до яких належать ці елементи. Якщо обидва сусідні елементи належать до однієї області, то поточний елемент також приєднується до цієї області. У ситуації, коли сусідні елементи належать до різних областей, вони об'єднуються разом із поточним елементом, а їхні площі перераховуються.

На рисунку 4.12 подано алгоритм, що описує процес визначення геометричних об'єктів на зображенні.

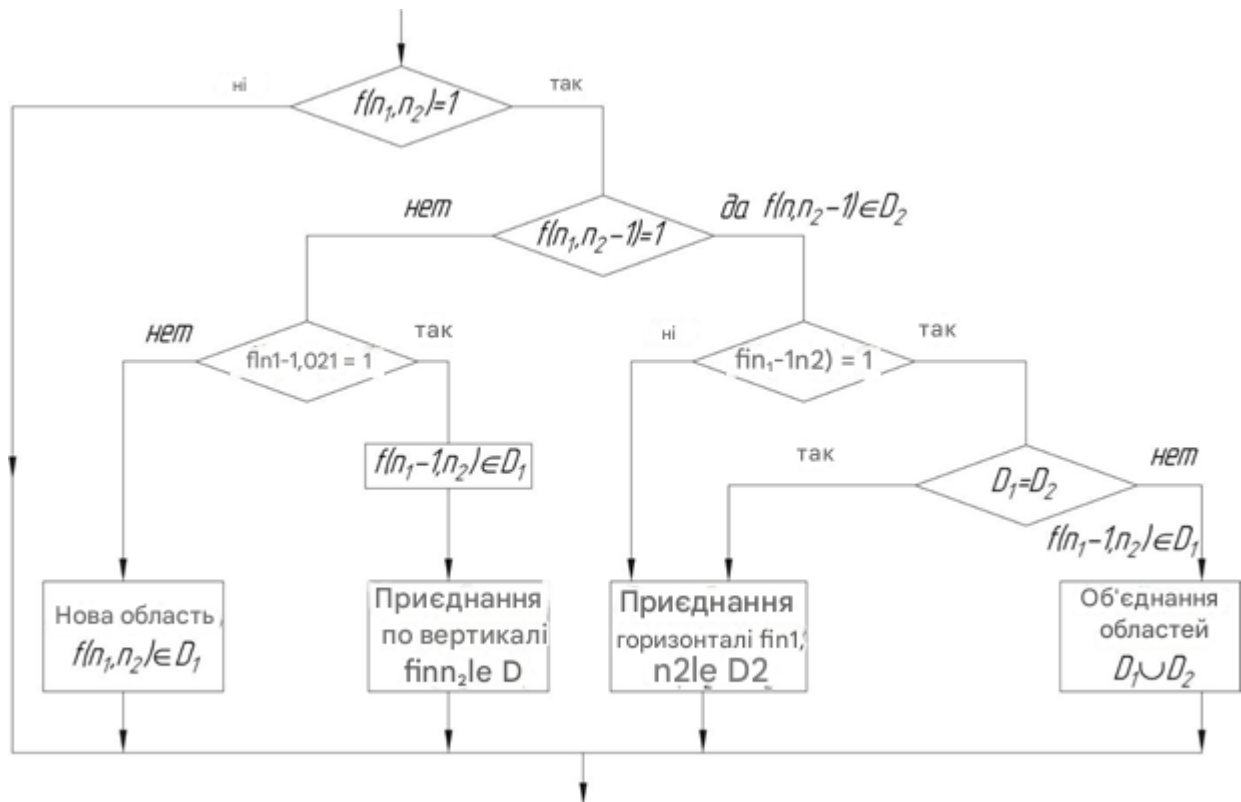


Рис. 4.12. Алгоритм оцінки геометричних параметрів.

Потім розглянемо алгоритм обробки граничних елементів, тобто тих, що розташовані в першому рядку або першому стовпці, де $f(n_1, n_2 - 1) = 0$. У таблиці характеристик значення кутових елементів $f(0,0)$ можуть бути рівні $f(0,0) = 1$ або $f(0,0) = 0$.

На рисунку 4.13 представлено фрагмент розміром 5×5 , на якому розташований об'єкт, для якого потрібно визначити його площу.

Таблиця 4.1 ілюструє алгоритм обчислення площі об'єкта, що зображений на рисунку 4.13, із застосуванням построчного аналізу відліків.

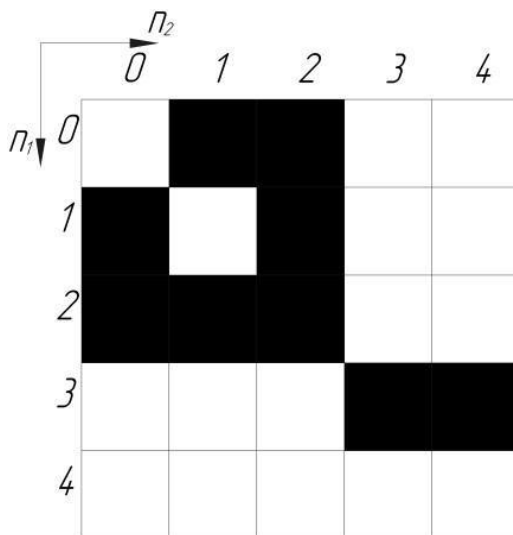


Рис. 4.13. Зразок фрагмента зображення.

Таблиця 4.1. Алгоритм обчислення площі

Плаваючий відлік	Характеристика (площа) ділянки		
	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 3
$f(0,1)$	1	-	-
$f(0,2)$	$1+1=2$	-	-
$f(1,0)$	2	1	-
$f(1,2)$	$2+1=3$	1	-
$f(2,0)$	3	$1+1=2$	-
$f(2,1)$	3	$2+1=3$	-
$f(2,2)$	$3+3+1=7$	Об'єднання з ділянкою.1	-
$f(3,3)$	7	-	1
$f(3,4)$	7	-	$1+1=2$

У таблиці наведено тільки ті відліки, які відповідають об'єкту, тобто мають значення $f(n_1, n_2) = 1$. Це зроблено з метою оптимізації та скорочення її розмірів. [17]

На рисунку 4.14 зображено розмітку областей, виконану за алгоритмом.

Як видно з рисунка 4.14, було виділено дві області. Перша область має площу, еквівалентну 7 відлікам, тоді як площа другої області становить 2 відліки.

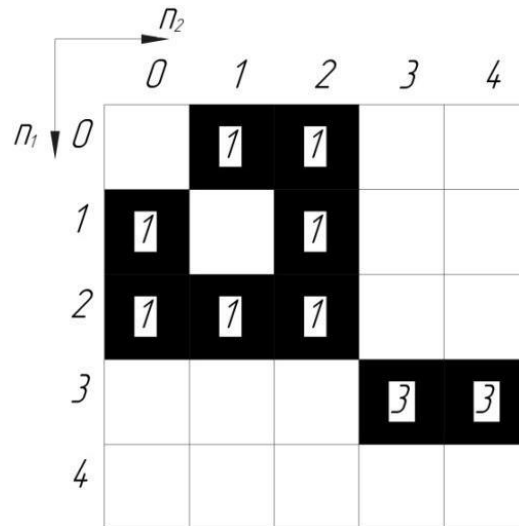


Рис. 4.14. Розподіл областей.

Для визначення додаткових характеристик об'єкта на зображенні використовуються подібні алгоритми. У цьому випадку застосовується принцип розрахунку характеристик об'єднаної області на основі параметрів вихідних областей, що формулюється наступним виразом:

$$F(D_1 \cup D_2) = \Phi[F(D_1), F(D_2)] \quad (D_1 \cap D_2 = \emptyset) \quad (4.42)$$

$F(D)$ - параметр, який обчислюється на основі множини D .

Характеристики, що відповідають заданому обмеженню, набувають такого вигляду. Для адитивних параметрів:

$$F(D) = \sum_{(n_1, n_2) \in D} (\Phi(n_1, n_2)), \quad (4.43)$$

де $\Phi(n_1, n_2)$ - функція, що визначається координатами n_1 та n_2 .

Щодо екстремальних характеристик:

$$F(D) = \text{ext}_{(n_1, n_2) \in D} (\Psi(n_1, n_2)), \quad (4.44)$$

де $\Psi(n_1, n_2)$ - функція, яка довільно залежить від координат n_1 та n_2 .

На рисунку 4.15 представлено приклад геометричної фігури, для якої необхідно розрахувати її геометричні параметри.

Розрахунок площі цієї фігури виконується за допомогою наступної формули:

$$F(D) = \sum_{(n_1, n_2) \in D} 1. \quad (4.45)$$

Функція $\Phi(n_1, n_2) = 1$ у даному контексті слугує адитивною характеристикою, що описує задану область.

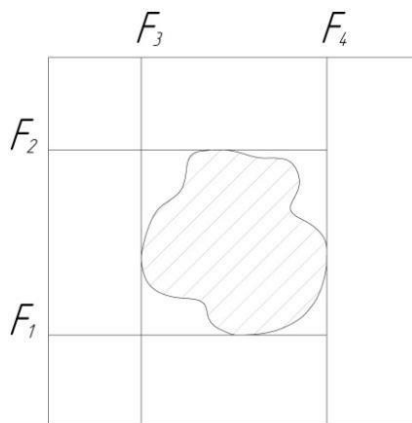


Рис. 4.15. Визначення координат країв області на зображенні.

Координати меж зображення у вертикальному та горизонтальному напрямках розраховуються за наступними виразами:

$$F_1(D) = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\}; \quad (4.46)$$

$$F_2(D) = \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\}; \quad (4.47)$$

$$F_3(D) = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\}; \quad (4.48)$$

$$F_4(D) = \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\}. \quad (4.49)$$

Функції $\Psi(n_1, n_2) = n_1$ і $\Psi(n_1, n_2) = n_2$ у цьому випадку виступають як екстремальні характеристики. [13]

Використовуючи ці характеристики, можна визначити центр області об'єкта, який зображений на рисунку 4.16, а також його габаритні розміри, показані на рисунку 4.17.

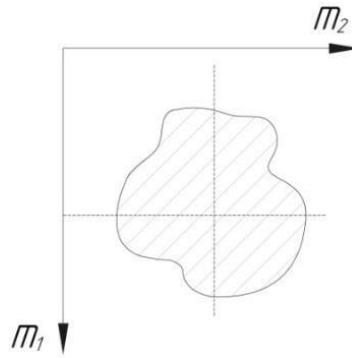


Рис. 4.16. Розрахунок центру області об'єкта.

Обчислення центру області об'єкта для випадку з безперервними аргументами здійснюється за допомогою наступної формули:

$$\theta_1 = \frac{\int_D \int x_1 dx_1 dx_2}{\iint_D dx_1 dx_2}; \theta_2 = \frac{\int_D \int x_2 dx_1 dx_2}{\iint_D dx_1 dx_2}. \quad (4.50)$$

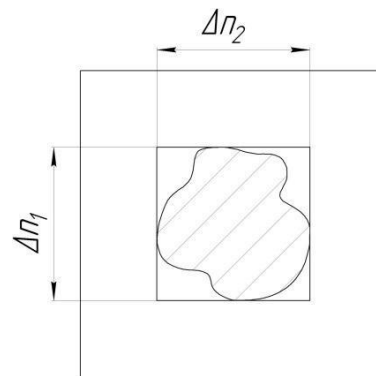


Рис. 4.17. Визначення габаритних параметрів об'єкта.

Формули, що використовуються для обробки зображень у цифровому форматі, виглядають наступним чином:

$$m_1 = \frac{\sum_{(n_1, n_2) \in D} n_1}{\sum_{(n_1, n_2) \in D} 1}; m_2 = \frac{\sum_{(n_1, n_2) \in D} n_2}{\sum_{(n_1, n_2) \in D} 1}. \quad (4.51)$$

Отриманий вираз можна подати в наступній формі:

$$m_1 = \frac{\alpha_{10}}{\alpha_{00}}; m_2 = \frac{\alpha_{01}}{\alpha_{00}}. \quad (4.52)$$

Адитивні первинні характеристики у цьому випадку визначаються таким чином:

$$\begin{cases} \alpha_{00} = \sum_{(n_1, n_2) \in D} 1 \\ \alpha_{10} = \sum_{(n_1, n_2) \in D} n_1 \\ \alpha_{01} = \sum_{(n_1, n_2) \in D} n_2 \end{cases} \quad (4.53)$$

Розрахунок розмірів у вертикальній та горизонтальній площинах виконується за допомогою наступних формул:

$$\Delta n_1 = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\} - \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\}, \Delta n_2 = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\} - \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\}. \quad (4.54)$$

Вищезгадані характеристики визначаються з урахуванням параметрів, розрахованих на основі формул (4.46)–(4.49).

Розроблена методика демонструє високу ефективність у розв’язанні задач, пов’язаних із аналізом геометричних характеристик лакофарбового покриття.

Підсумком роботи цього розділу є створення математичного інструментарію для обробки зображень, який дозволяє автоматизувати процес виявлення дефектів лакофарбового покриття. Розв’язання цієї задачі стало можливим завдяки попередньому поліпшенню якості вхідного зображення за допомогою навчання класифікатора та застосування методу обробки ковзним вікном. Крім того, запропоновано алгоритм автоматичної бінаризації зображень, що базується на пороговій обробці. [15]

Для аналізу зображень рекомендовано використовувати методи текстурного аналізу з порівнянням із еталонним зображенням, що забезпечує високу точність виявлення дефектів на вхідному зображенні. Додатково запропоновано застосовувати алгоритми оцінки геометричних характеристик виявлених дефектів, що дозволяє більш детально аналізувати стан лакофарбового покриття.

4.5 Алгоритми роботи системи контролю

Було встановлено, що для виявлення дефектів лакофарбового покриття доцільно використовувати цифрові зображення. Для їх отримання запропоновано систему, яка базується на персональному комп’ютері та оптико-

цифровому модулі. Автоматизація процесу розпізнавання зображень забезпечується впровадженням різних алгоритмів, які відповідають за функціонування окремих підсистем.

Процес обробки зображень включає такі етапи, як оцінка та покращення їхньої якості, а також розпізнавання й визначення характеристик об'єктів. Для реалізації цих процедур необхідна розробка спеціалізованих алгоритмів.

Основна мета алгоритму, орієнтованого на оцінку та покращення якості вхідного зображення, полягає у виявленні потенційних дефектів лакофарбового покриття та приведенні зображення до рівня, який дозволяє ефективно виконувати подальшу обробку у разі наявності дефектів.

Структура запропонованого алгоритму представлена на рисунку 4.18. Його робота побудована за наступним принципом: вихідне цифрове зображення, отримане від оптико-цифрового модуля, проходить первинну обробку. Цей етап спрямований на визначення характеристик зображення, необхідних для виконання наступних етапів аналізу та обробки.

На наступному етапі алгоритму здійснюється виявлення дефекту та його реєстрація на зображенні. Якщо дефект не виявлено, система генерує повідомлення про його відсутність. У разі фіксації дефекту переходять до виконання наступного кроку алгоритму. [19]

На цьому етапі виконується покращення якості зображення, що дозволяє суттєво підвищити точність подальшого аналізу та визначення характеристик дефекту. За результатами обробки перевіряється відповідність якості зображення встановленим критеріям. Після цього ухвалюється рішення щодо придатності або непридатності зображення для подальших етапів аналізу.

Якщо зображення не відповідає заданим вимогам якості, система видає відповідне повідомлення. У такій ситуації необхідно або повторно обробити це зображення, або отримати новий знімок потрібної області для подальшого аналізу. [8] [9]

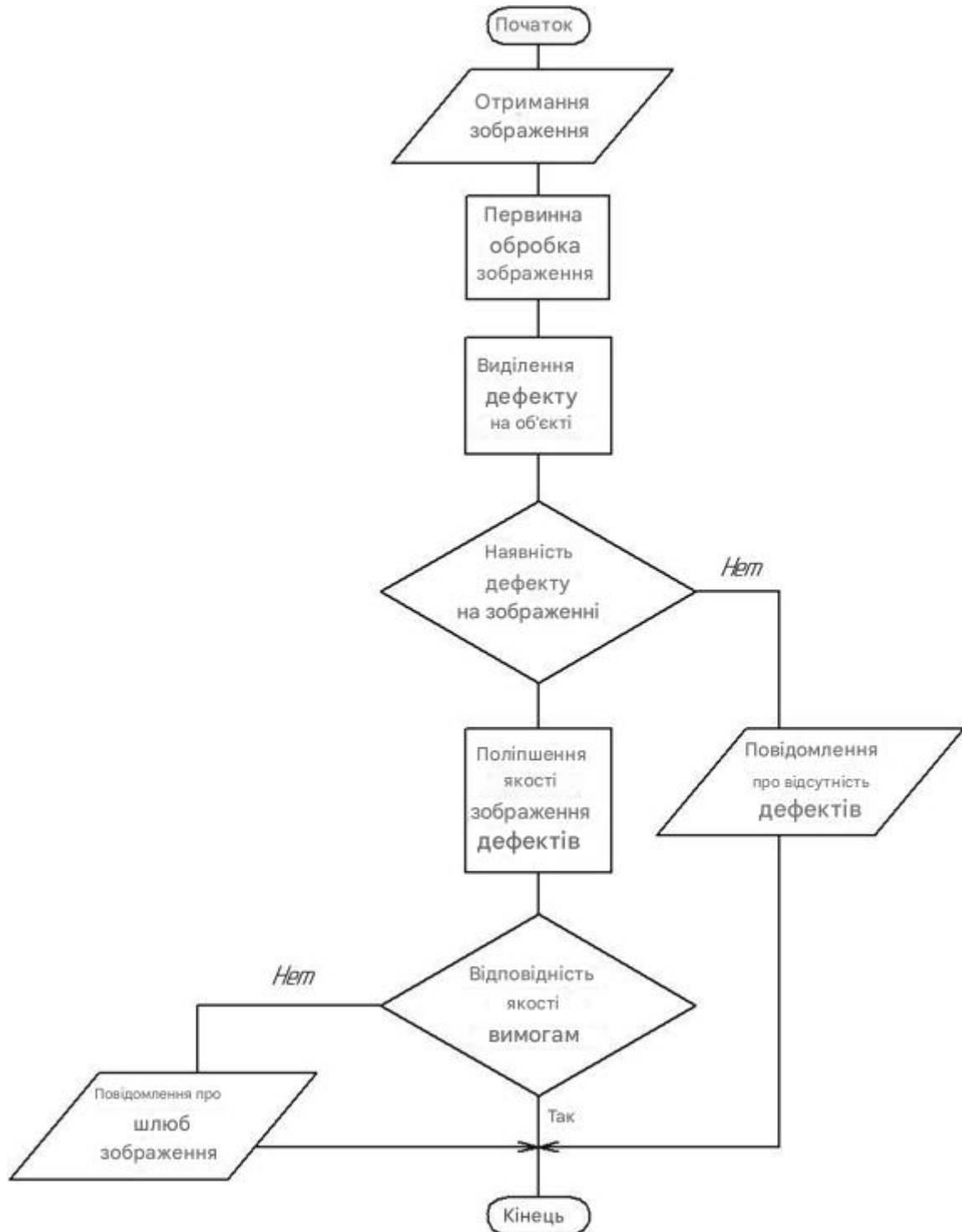


Рис. 4.18. Алгоритм роботи підсистеми для оцінки та покращення якості зображення.

Наступним етапом обробки зображення згідно з прийнятою схемою контролю є розпізнавання та визначення характеристик об'єктів на зображенні. Алгоритм виконання цього етапу наведено на рисунку 4.19.



Рис. 4.19. Алгоритм виявлення дефектів.

Етапи роботи алгоритму, який демонструється на рисунку 4.19, описуються так: спочатку як вхідне використовується зображення, яке було оброблене згідно з алгоритмом оцінки та поліпшення якості, представленим на рисунку 4.18. Далі зображення проходить первинну обробку, що дублює раніше застосовані методи, з метою точного визначення необхідних характеристик для подальших дій. Далі алгоритм ізолює ділянку з дефектом і аналізує її геометричні параметри. У разі точного визначення характеристик дефекту, інформація про нього вноситься в базу даних дефектів та систему контролю якості підприємства. Якщо ж дефект виявити не вдалося, система надсилає

повідомлення про невдачу у розпізнаванні. В таких випадках зображення обробляється знову або повторно отримується для дальшої обробки.

Основні процедури в цих алгоритмах полягають у первинній обробці зображень, що має на меті визначення їхніх основних характеристик, які є необхідними для подальшої обробки. Також до цих процедур входить виділення дефектів на зображенні, покращення якості зображень дефектів та оцінка їхніх геометричних характеристик. Передбачається розробка цих процедур.

Первинна обробка вхідного зображення здійснюється з метою виявлення та зменшення шумів, що з'являються через специфіку процесу отримання цифрових зображень. Основні причини виникнення шумів включають фон на зображенні, неідеальні умови отримання зображення, фізичні особливості процесів дискретизації та квантування зображень, а також системи передачі та відображення.

Усунення шумів представляє собою складне завдання, яке реалізується за допомогою різноманітних методів, що застосовуються як на етапі технічного забезпечення процесу отримання зображення, так і на етапі програмної обробки. Використання додаткового освітлення контрольованого об'єкта є одним із часто вживаних технічних рішень, яке допомагає вирішити проблеми з умовами отримання зображень. Велика частина шумів на зображенні ліквідується завдяки застосуванню відповідних оброблювальних алгоритмів.

Значущим результатом процедури виділення дефектів на зображенні є ідентифікація області, де вони знаходяться, шляхом визначення координат цієї області. Детальний опис відповідних алгоритмів, а також аналіз умов їх застосування надаються в науковій літературі. [10]

Вдосконалення якості зображення дефектів та оцінювання їх геометричних характеристик виконуються згідно з математичними методами.

Розробка функціональної схеми запланованої системи контролю враховує необхідні процедури для контролю та алгоритми, засновані на раніше введених математичних моделях. Результати розробки цієї схеми демонструються на рисунку 4.20.



Рис. 4.20. Функціональна схема системи моніторингу.

Ключовим елементом у вирішенні задачі контролю дефектів лакофарбового покриття є створення належного алгоритму цифрової обробки зображення, який включає послідовність процедур обробки. Результати розробки цього алгоритму демонструються на рисунку 4.21.

Розглянемо цей алгоритм детальніше. Етап отримання зображення планується здійснювати за допомогою оптико-цифрового пристрою на основі ПЗС-матриці. Перевага такого методу отримання вхідного зображення полягає в відсутності необхідності обробки зображення перед його введенням у систему контролю. Це пояснюється тим, що зображення відразу надходить у цифровому вигляді. Однак процес отримання цифрового зображення може вносити у зображення помилкові сигнали, які призводять до істотного спотворення інформації. Це не дозволяє обробляти вхідне зображення безпосередньо, оскільки алгоритми оцінки зображення працюватимуть некоректно.



Рис. 4.21. Алгоритм цифрової обробки зображень для виявлення дефектів лакофарбового покриття.

Цей блок забезпечує корекцію зображення за допомогою алгоритмів, які компенсують спотворення, спричинені вищеописаними впливами. Це важливо для забезпечення точності та надійності системи контролю, яка має оперувати в різноманітних умовах виробництва, де такі фактори як вібрації та інші зовнішні впливи можуть суттєво погіршувати якість обробки даних. [16]

Реалізація такої системи передбачає інтеграцію ряду технологічних рішень, включаючи адаптацію до використання ПЗС-матриць для збору зображень, що забезпечують високу чіткість знімків. Ключовою перевагою ПЗС-технологій є їхня здатність ефективно працювати в умовах обмеженого освітлення, що дозволяє застосовувати ці системи в промислових умовах без потреби в значних модифікаціях освітлювальних систем.

На наступному етапі алгоритму використовується бінарна сегментація зображення, що полегшує процес порівняння відновленого та оригінального

зображень. Ця стадія дозволяє суттєво знизити кількість аналізованих характеристик на зображенні, тим самим зменшуючи обчислювальні витрати. Процедура виконується на підставі математичних моделей, оптимізуючи ефективність виконання алгоритму.

Проведення текстурного аналізу поверхонь та контрольних зразків дає змогу ідентифікувати, фіксувати та зберігати текстурні особливості зображень, а також здійснювати їх порівняння з еталонними характеристиками. Це дозволяє точно визначати наявність дефектів на досліджуваній поверхні. Основою реалізації такої процедури виступають математичні моделі, які забезпечують точність і достовірність аналізу. [20]

Процес оцінювання геометричних параметрів дефектів лакофарбового покриття спрямований на отримання кількісних характеристик, що описують природу виявлених пошкоджень. Для лакофарбових покриттів найбільш значущими параметрами є величина дефекту, його загальна площа та місце розташування на поверхні. Реалізація цього методу також базується на застосуванні математичних моделей, що забезпечують високу ефективність та об'єктивність оцінки.

Після завершення роботи запропонованих алгоритмів здійснюється формування результатів, які інтегруються до корпоративної бази даних. Ці дані можуть слугувати основою для подальшого статистичного аналізу, що дозволяє ідентифікувати типи дефектів і встановлювати їх можливі причини. У разі потреби результати алгоритмів можуть бути представлені у вигляді контрольних карт для подальшого використання в системі моніторингу якості.

У даному розділі розроблено низку алгоритмів, спрямованих на автоматизацію процесів контролю дефектів лакофарбового покриття. Зокрема, запропоновано такі елементи: алгоритм, що забезпечує роботу підсистеми оцінювання та поліпшення якості зображення; метод розпізнавання маркування; структурна схема системи контролю; а також алгоритм цифрової обробки зображень, спеціально адаптований для виявлення та аналізу дефектів лакофарбового покриття.

4.6 Концепція структури системи контролю

Розробка структури системи контролю базується на визначених вимогах до її функціонування, а також на аналізі сучасних технічних рішень у цій галузі. Для забезпечення безконтактного збору даних і формування цифрового зображення вибрано оптико-цифровий модуль, який виступає ключовим елементом системи. Обробка отриманої інформації здійснюється із застосуванням попередньо розроблених алгоритмів та математичних моделей, виконання яких потребує наявності персонального комп'ютера.

Комплектація системи включає джерело монохромного освітлення, яке забезпечує рівномірне підсвічування об'єкта дослідження та мінімізує рівень шумів у вихідному зображенні. Також до складу входять інтерфейсні модулі для забезпечення зв'язку між компонентами системи, периферійні пристрої для передачі даних і обладнання для відображення результатів аналізу. Для ефективного управління даними передбачається інтеграція системи з базою даних через локальну обчислювальну мережу.

Управління системою планується здійснювати в інтерактивному режимі, що дозволяє користувачу контролювати всі процеси в реальному часі. Повна автоматизація, хоча й можлива, не є раціональним рішенням у цьому контексті через необхідність створення складних алгоритмів зі штучним інтелектом, які вимагають значних ресурсів і підвищують вартість системи. [11] [12]

Проектування системи базується на модульній архітектурі з використанням стандартного обладнання. Такий підхід забезпечує оптимальне співвідношення між вартістю системи, її якістю та надійністю.

Також створено функціональну схему програмного забезпечення, яка дозволяє реалізувати запропоновані алгоритми для аналізу зображень, керування апаратними модулями та оптимального використання обчислювальних ресурсів. Опис розробленої схеми представлено на рисунку 4.22.

Головним викликом під час реалізації цієї схеми є забезпечення ефективної інтеграції компонентів системи та організації обміну даними між

ними. Це завдання потребує ретельного підходу до проектування взаємодії елементів для забезпечення стабільної роботи всієї системи.



Рис. 4.22. Архітектурна схема програмного забезпечення.

Програмний комплекс складається з двох основних компонентів: базового програмного забезпечення та диспетчерських модулів. Базове програмне забезпечення виконує ключові функції, пов'язані із здійсненням процесу контролю. Диспетчерські модулі, у свою чергу, забезпечують підтримку працездатності базових програм, а також організовують ефективну взаємодію з периферійними пристроями для збору й передачі даних.

Розроблена структурна схема створює умови для:

забезпечення безперебійної роботи програмного забезпечення у визначений проміжок часу,

функціонування системи в реальному часі для оперативної обробки даних,

організації ефективного обміну інформацією між системою та периферійними пристроями,

досягнення високої швидкості виконання програмних операцій,

оптимізації використання пам'яті, що дозволяє зменшити її необхідний обсяг.

Впровадження розробленої структурної схеми виконується в кілька етапів. Спочатку проводиться детальне тестування кожного модуля схеми окремо, після чого здійснюється інтеграційна перевірка всієї системи програмного забезпечення. У ході цих процедур важливо ідентифікувати можливі недоліки у взаємодії між окремими модулями та підпрограмами, а також оперативно внести необхідні зміни для усунення виявлених проблем.

Одним із найважливіших аспектів проєктування будь-якої системи контролю є аналіз надійності програмного забезпечення. Надійність напрямку впливає як на загальну ефективність функціонування системи, так і на достовірність отриманих результатів контролю. Запропонована структурна схема програмного забезпечення розробленої системи повністю відповідає встановленим вимогам і забезпечує виконання всіх ключових функцій, покладених на цю систему. [6] [7]

Одним із ключових елементів розроблюваної системи контролю є її апаратна складова. Для її створення необхідно розробити структуру, яка базується на аналізі вимог, що висувуються до системи. Ці вимоги визначають функціональні можливості та технічні характеристики системи.

Основні вимоги до апаратної частини системи включають:

- здатність ефективно розпізнавати зображення, навіть за умов наявності шумів;

- можливість ідентифікувати будь-які типи текстур, кольорів та інших характеристик поверхонь, що підлягають контролю;

- виключення контактних елементів, які могли б взаємодіяти з контрольованою поверхнею;

- повну автоматизацію процесу контролю;

- забезпечення високої швидкості роботи системи;

- підтримання високої роздільної здатності при проведенні контролю;

- стійкість до впливу зовнішніх факторів, таких як вібрації, зміни температури тощо;

- можливість швидкого налаштування та адаптації системи до нових умов;

збереження мінімальної вартості без зниження ефективності.

Враховуючи ці вимоги, буде створено структурну схему установки для контролю дефектів лакофарбового покриття, яка буде представлена на рисунку 4.23.

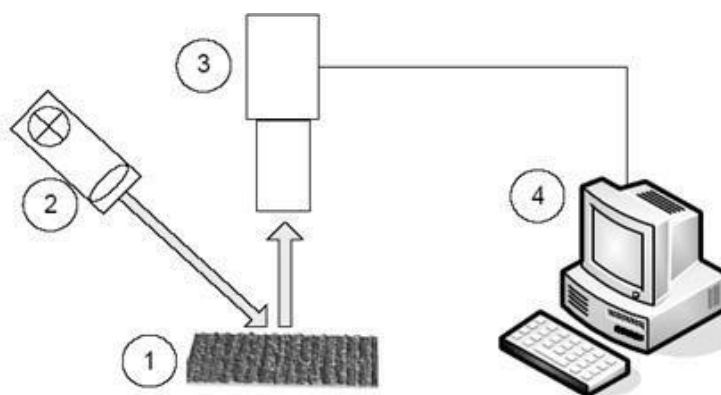


Рис. 4.23. Схема установки для контролю дефектів лакофарбового покриття:
1 – контрольована поверхня; 2 – джерело світла; 3 – цифрова камера; 4 – персональний комп'ютер.

Як видно з розробленої схеми, установка базується на використанні цифрової камери для отримання високоякісних зображень контрольованої поверхні в цифровому форматі. Персональний комп'ютер у цій системі виконує ключову функцію, забезпечуючи обробку отриманих даних за допомогою спеціалізованих алгоритмів і математичних моделей.

Аналіз причин появи дефектів і шумів на зображеннях, проведений раніше, показав, що для мінімізації їхнього впливу необхідно створити оптимальні умови отримання зображень. Основною умовою є рівномірне освітлення зони контролю. Для вирішення цього завдання пропонується додати до установки додаткове джерело спрямованого світла, яке забезпечить підсвітку зони дослідження та підвищить якість отриманих зображень.

Реалізація запропонованої структурної схеми установки для контролю дефектів лакофарбового покриття здійснюється з використанням стандартного обладнання. Це дозволяє значно скоротити витрати на виробництво системи, зберігаючи водночас усі необхідні характеристики для точного та ефективного контролю.

Варто відзначити, що розроблена структура установки характеризується відкритістю архітектури. Це дає змогу за потреби легко інтегрувати додаткові периферійні пристрої або вносити зміни до її конфігурації, що підвищує гнучкість і адаптивність системи.

У рамках цього розділу було розроблено структурні схеми програмного забезпечення та апаратної частини установки, призначеної для контролю дефектів лакофарбового покриття. Впровадження цих схем дасть змогу створити установку, яка повністю відповідає сучасним вимогам, забезпечує високий рівень автоматизації процесів контролю та може бути інтегрована в цифрові виробничі системи для оптимізації технологічного процесу.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Структурно-функціональний аналіз виникнення небезпечних ситуацій

Охорона довкілля передбачає впровадження комплексу заходів, спрямованих на раціональне використання природних ресурсів та збереження та охорону навколишнього середовища. Це має велике значення для забезпечення поточних і майбутніх поколінь людей.

Навколишнє середовище складається з різних природних, економічних та соціальних факторів, що впливають на здоров'я людей.

Транспортні засоби можуть бути однією з основних причин забруднення довкілля. Викиди від транспортних засобів можуть містити важкі метали, газові речовини, вуглеводні та інші шкідливі речовини, які можуть мати негативний вплив на якість повітря та здоров'я людей, ведуть до забруднення повітря та водних ресурсів, а також до змін клімату. Рух автомобілів також призводить до шумового забруднення та погіршення якості життя людей, особливо в міських районах.

Складність структури та великий спектр впливів, що здійснюють автотранспортні підприємства та використовуваного технологічного обладнання є наслідком значної кількості забруднень довкілля.

Існують різні види забруднень навколишнього середовища, серед яких можна виділити хімічне, механічне та фізичне. Хімічне забруднення виникає внаслідок викиду хімічних сполук, що може призвести до негативного впливу на екосистему. Механічне забруднення пов'язане з механічним впливом на навколишнє середовище. Фізичне забруднення може бути тепловим, світловим, шумовим або електромагнітним і змінює фізичні параметри навколишнього середовища.

Залежно від характеристик і типу, кожен небезпечний фактор має свою власну зону впливу. Якщо розміри цієї зони залишаються постійними, то її можна назвати постійною зоною. Однак, якщо рівень небезпечного фактору або

його положення в просторі змінюється під час роботи, то зона впливу стає змінною.

Небезпечні умови (НУ) виникають через неправильну організацію робіт, недостатню підготовку працівників, недостатній контроль з боку інженернотехнічного персоналу та роботу без використання засобів індивідуального захисту.

Небезпечна ситуація (НС) виникає, коли працівник здійснює небезпечні дії, що можуть призвести до аварійної ситуації, такої як поломка, ушкодження або руйнування обладнання або механізму, або травма працівника пов'язана з аварією.

Таблиця 5.1 - Формування та виникнення аварійних ситуацій, які виникають при роботі на дільниці для кузовних робіт підприємства.

Вид технологічної операції	Виробнича безпека			Можливі наслідки	Заходи запобігання
	Небезпечна умова (НУ)	Небезпечна дія (НД)	Небезпечна ситуація (НС)		
Необережне поводження під час роботи на дільниці для кузовних робіт	Технічна несправність обладнання НУ ₁ Неуважність працівника НУ ₂	Недотримання вимог техніки безпеки НД	Створення аварійно-небезпечної ситуації АНС	Аварія, травма, наслідок без аварії і травми	Перед початком роботи необхідно здійснити перевірку технічного стану обладнання, переконатися в відповідності застосовуваних засобів технологічному процесу і провести підготовку персоналу щодо питань охорони праці.

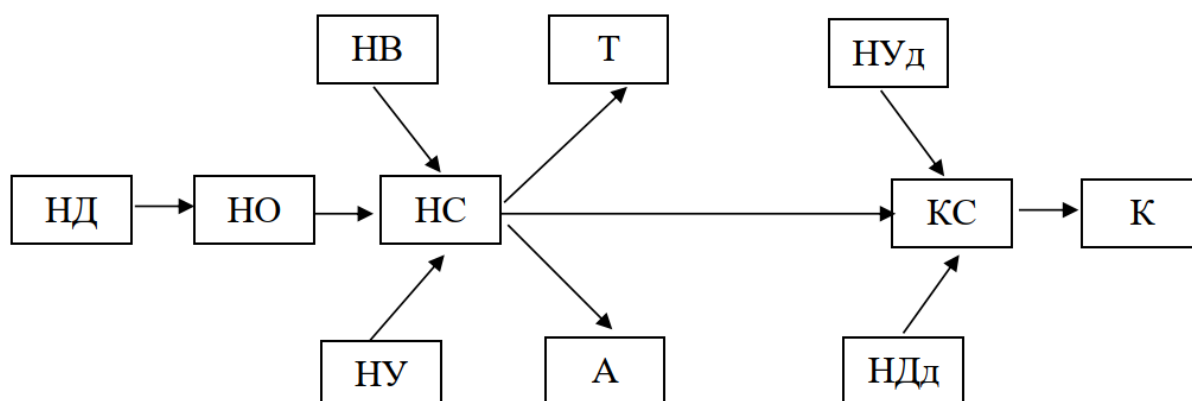


Рис. 4.1. Блок-схема процесу формування та виникнення небезпечних, аварійних та катастрофічних ситуацій:

НВФ - небезпечний виробничий фактор; НУ - небезпечні умови; НД - небезпечні дії; НО - небезпечні обставини; НС - небезпечна ситуація; А - аварія; Т - травма, КС - критична ситуація; НУД - небезпечні умови додаткові; НДд - небезпечні дії додаткові; К - катастрофа.

5.2 Обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці на ділянці для кузовних робіт

Нижче наведені деякі рекомендації щодо охорони праці на ділянці для кузовних робіт на підприємстві автомобільного транспорту.

1. Забезпечення належного освітлення робочого місця, щоб уникнути помилок і зменшити ризик травматизму
2. Впровадження системи вентиляції та забезпечення належну циркуляцію повітря, щоб уникнути накопичення шкідливих речовин та запобігти отруєнню працівників.
3. Забезпечення працівників необхідними засобами індивідуального захисту, такими як рукавиці, маски, окуляри, щоб запобігти контакту з шкідливими речовинами та ушкодженням.
4. Проведення навчання та інструктажу з охорони праці, щоб працівники розуміли правила безпеки і вміли користуватися обладнанням та інструментами на ділянці.

5. Регулярна перевірка технічного стану обладнання, інструментів та пристроїв на дільниці та вчасно проведення їх обслуговування та ремонту.
6. Забезпечення належної організації робочого простору, уникнення надмірної забрудненості та непотрібного скупчення матеріалів, що може створити небезпеку для працівників.
7. Встановлення сигнальної інформації та застосування системи сигналізації для попередження працівників про можливі небезпечні ситуації на дільниці.
8. Проведення регулярної перевірки та аудиту з охорони праці для виявлення потенційних ризиків та впровадження відповідних запобіжних заходів.

Правила пожежної безпеки на дільниці для кузовних робіт є надзвичайно важливими для забезпечення безпеки працівників та запобігання пожежам. Нижче наведені деякі рекомендації та правила, які слід дотримуватись на дільниці для кузовних робіт:

1. Перевірка та обслуговування пожежної системи: Регулярно перевіряйте та підтримуйте роботу пожежної системи на дільниці, включаючи пожежні тривоги, пожежні вогнегасники та засоби пожежогасіння відповідно до «Правил пожежної безпеки в Україні» . Переконайтеся, що всі працівники знають місцезнаходження та використання пожежних засобів.
2. Зберігання та видалення вогненебезпечних матеріалів: Ретельно контролюйте зберігання та використання вогненебезпечних матеріалів, таких як пальне, розчинники та інші легкозаймисті речовини. Забезпечте їх правильне зберігання в спеціальних контейнерах та видалення відпрацьованих матеріалів відповідно до встановлених правил та норм.
3. Електробезпека: Впевніться, що всі електричні системи, обладнання та інструменти на шиноремонтній дільниці відповідають вимогам електробезпеки. Регулярно перевіряйте електричні проводки на наявність пошкоджень та забезпечте їх правильне заземлення.
4. Встановлення протипожежного обладнання на підставі НАПБ Б.03.001-2004 "Типові норми належності вогнегасників" (табл.5.2): Забезпечте наявність і правильне розташування протипожежного обладнання, такого як пожежні

вогнегасники, пожежні крани, пожежні системи оповіщення та автоматичні спринклерні системи. Вони повинні бути легкодоступними та знаходитися на видному місці.

5. Регулярне прибирання та усунення загроз: Здійснюйте регулярне прибирання робочого місця, усувайте відходи, стружку та легкозаймисті матеріали. Підтримуйте чистоту та порядок на ділянці, що допоможе уникнути небезпеки пожежі.

6. Навчання та свідомість працівників: Проведіть навчання та тренінги щодо пожежної безпеки для всього персоналу. Працівники повинні бути ознайомлені з процедурами евакуації, використанням пожежного обладнання та поведінкою в разі виникнення пожежі.

Таблиця 5.2. Норма необхідних первинних засобів пожежогасіння

N з/п	Гранична захищувана площа, кв. м	Клас можливої пожежі	Мінімальна кількість порошкових вогнегасників									
			Переносний вогнегасник (з газом-витискувачем у балоні або закачний) із зарядом вогнегасної речовини, кг					Пересувний вогнегасник (з газом-витискувачем у балоні або закачний) із зарядом вогнегасної речовини, кг				
			5	6	8	9	12	20	50	100	150	
Приміщення категорії В з наявністю горючих газів і рідин												
1	більше 50 до 150 включно	А, В, (Е)	4	4	3	3	2	1	-	-	-	

Згідно з законодавством України, зокрема з Законом "Про оцінку впливу на довкілля", компанія зобов'язана приймати відповідні заходи з метою зменшення негативного впливу виробництва, технічного обслуговування та ремонту транспортних засобів на природне середовище. Правильна сортування відходів на ділянці з кузовного ремонту та їх належне зберігання, а також

дотримання правил електро- і пожежної безпеки є необхідними для успішної діяльності підприємства.

5.3 Оцінка потенційної аварії в цеху малярно-кузовного ремонту за попереднім аналізом небезпек

Метою попереднього аналізу небезпек є визначення складих частин технологічного процесу малярно-кузовного ремонту системи або окремих елементів, виявлення потенційних небезпек або небезпечних станів, які можуть призвести до небезпечних подій, тобто визначення тієї частини системи, де потрібно провести більш детальний аналіз.

Спрогнозуємо ситуації, коли в цеху малярно-кузовного ремонту проводяться зварювальні роботи по відновленню пошкоджених ділянок автомобіля за наявності в приміщенні легкозаймистих речовин та коли відбувається насичення камери для фарбування автомобіля парами фарбувальних матеріалів (табл. 5.3).

Таблиця 5.3. Наслідки небезпечних ситуацій в цеху малярно-кузовного ремонту за ПАН.

№	Структура якісного аналізу	Ситуація 1	Ситуація 2
1	Система, підсистема або елемент	Зварювальний апарат	Камера для фарбування автомобіля
2	Ситуація	Проведення зварювальних робіт, експлуатація	Насичення камери парами фарбувальних матеріалів
3	Небезпечний елемент	Електрод, ізоляція	Вентеляційна камера, освітлення ізоляція

4	Причина, що обумовлює небезпечни й стан	Іскріння, електропроводка	Пошкодження деталей вентиляційної камери, нагрівання скла лампи більше 150 °С. Корозійна дія хімічних речовин на ізоляції.
5	Небезпечні умови	Можливість окисних реакцій між високою температурою та горючими матеріалами	Утворення несприятливих умов для введення парів фарбувальних речовин
6	Подія, що обумовлює небезпечні умови	Попадання іскри на легкозаймисті матеріали	Перенасичення камери парами фарбувальних речовин
7	Потенційна аварія	Пожежа	Пожежа, вибух
8	Наслідки	Поранення персоналу, пошкодження устаткування, пошкодження будівлі	Поранення персоналу, пошкодження устаткування, пошкодження будівлі
9	Клас небезпеки	ІІІ критичний	ІІІ критичний
10	Заходи для запобіган- ня аварії	Контроль зварювального апарату, додержання робочого місця в належному стані	Підбір якості фарбувальних матеріалів. Технічний огляд припливно- витяжної вентиляції, контроль електроізоляції освітлювальних установок

Отже, спрогнозовані небезпечні ситуації можуть призвести до виникнення критичного класу безпеки на ділянці, який пов'язаний з помилками персоналу, недоліками конструкції або її невідповідністю проектній документації, а також неправильним її функціонуванням, який призводить до істотних порушень в роботі, пошкодження обладнання та створює небезпечну ситуацію, що вимагає негайних заходів з порятунку персоналу та обладнання.

Спрогнозуємо ситуацію виникнення пожежі в цеху малярно-кузовного ремонту автомобілів, розглянувши наступну структуру ДВ:

Рівень 1 – виникнення пожежі;

Рівень 2 – несправність системи пожежогасіння АБО відмова обладнання АБО помилка персоналу;

Рівень 3 – низька кваліфікація персоналу АБО відмова датчика автоматичного АБО речовина для гасіння пожежі АБО відсутність зовнішньої подачі води АБО корозія зношування обладнання ТА джерело високої температури;

Рівень 4 – порушення вимог технологічних процесів порушення трудового розпорядку на робочому місці зовнішні чинники порушення зборки або експлуатації ТА наявність іскри АБО людина, яка курить.

Необхідно також зауважити, що прогностичні оцінки небезпеки територій, адміністративно територіальних одиниць чи об'єктів економіки для людини, на яких базується цивільна безпека безпосередньо не стосуються визначення кількісних характеристик ризику. Оскільки апріорі вважається, що при наявності існування ризику надзвичайних ситуацій, вона може виникнути в будь-якому випадку. Однак розрахункові показники небезпеки необхідні як підґрунтя превентивних заходів попередження надзвичайних ситуацій. Результати дослідження підходів до оцінки небезпеки територій, адміністративно територіальних одиниць чи об'єктів економіки дають підстави стверджувати, що чим більше цілеспрямованих вихідних показників береться для цього, тим точніше оцінка. Так при наявності 10 показників розрахунки, що виконуються за діючими методиками, надають похибку в 6%...8%, при п'яти показниках похибка складає 30%...50%, а при трьох – 75%...80%. Таким чином, для максимального зменшення похибки у визначенні небезпеки територій, адміністративно територіальних одиниць чи об'єктів економіки необхідно ідентифікувати як можна більше постійно діючих показників, котрі впливають на їхню безпеку.

Керуючись вищезазначеним, побудовано ДВ для цеху малярно-кузовного ремонту автомобілів з урахуванням максимально можливої кількості чинників, які можуть призвести до виникнення пожежі на ділянці (рис. 5.2).

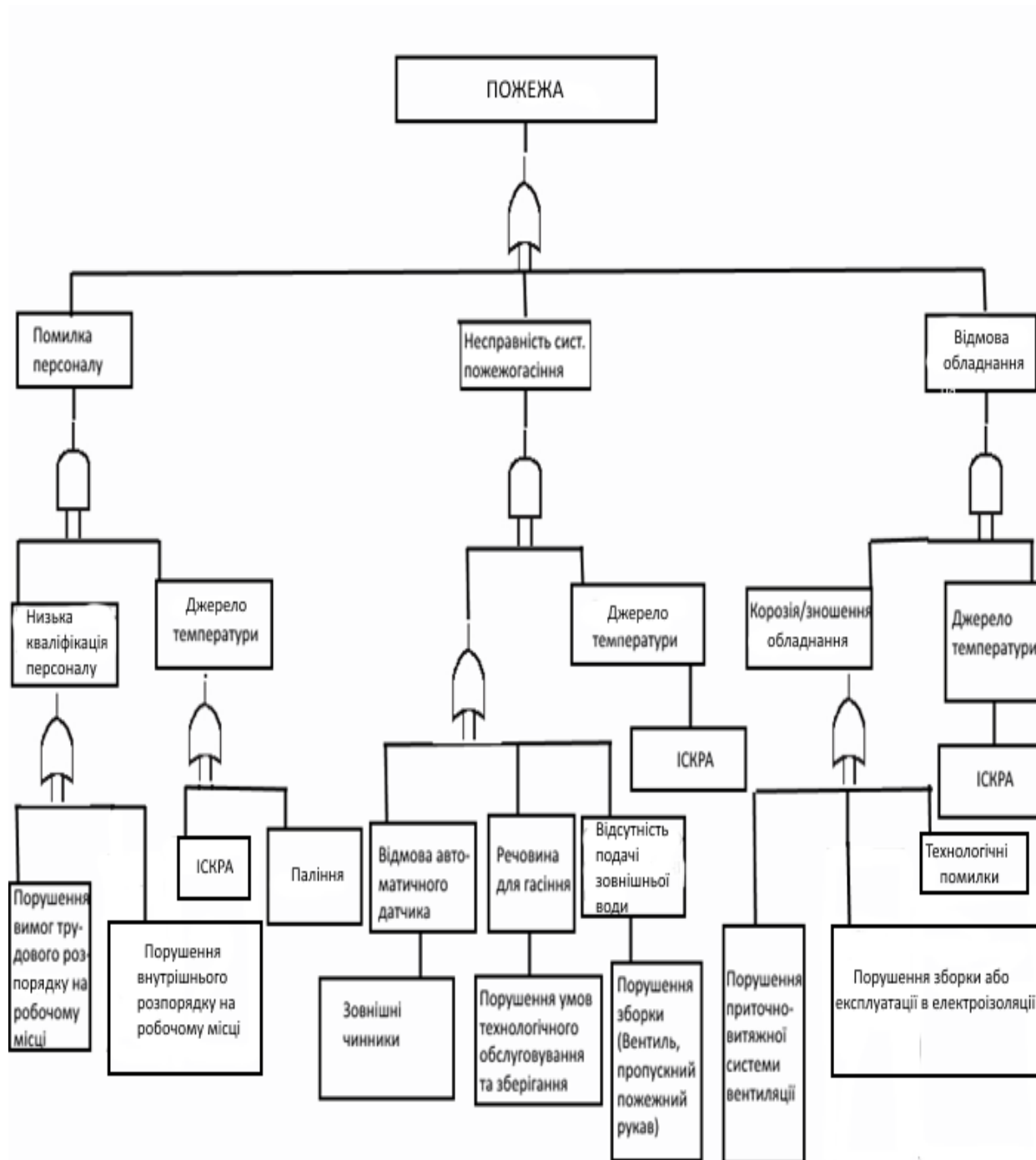


Рис. 5.2. Структура дерева відмов при прогнозуванні небезпечної події «пожежа» на дільниці малярно-кузовних робіт автомобіля.

Отже, ймовірність виникнення пожежі на підприємстві перевищує допустимі норми і не відповідає сучасному стану прийнятого рівня ризику на виробництві в цілому. [35]

Відповідно до нормативно-правового акту пожежна безпека об'єкта повинна забезпечуватися системою запобігання пожежі, системою протипожежного захисту і системою організаційно-технічних заходів. Потрібний рівень пожежної безпеки людей за допомогою вказаних систем,

згідно з нормативно-правовим актом, не повинен бути меншим за $0,999999$ відвернення впливу на кожну людину, а допустимий рівень пожежної небезпеки для людей не може перевищувати 10^{-6} впливу небезпечних факторів пожежі, що перевищують гранично допустимі значення на рік в розрахунку на кожну людину. Рівень забезпечення пожежної безпеки являє собою також кількісну оцінку запобігання збиткам при можливій пожежі. Об'єкти, пожежі на яких можуть призвести до загибелі або масового ураження людей небезпечними факторами пожежі та їх вторинними проявами, а також до значного пошкодження матеріальних цінностей, повинні мати системи пожежної безпеки, що забезпечують мінімальну можливу імовірність виникнення пожежі. Конкретні значення такої імовірності визначаються проектувальниками та технологами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Загально-технічний розділ включає огляд дефектів лакофарбових покриттів, методів ідентифікації та огляд літератури щодо сучасних методів нанесення покриттів.

Дозволяє зрозуміти проблематику та існуючі підходи в досліджуваній галузі. Можна деталізувати вплив дефектів на довговічність і естетику автомобіля.

Технологічний розділ аналізує структуру шарів покриття, технології нанесення та методи електростатичного розпилення.

Добре висвітлено взаємодію фізичних процесів, таких як утворення крапель, їх розпад і випаровування.

Додати приклади з реальних виробничих процесів для підсилення практичної цінності.

Конструкторський розділ розглянуто різні типи розпилювачів, включаючи високоефективні пристрої.

Охоплено широкий спектр конструкцій, що дає змогу вибирати оптимальні рішення для різних умов.

Поглибити аналіз економічної ефективності застосування різних розпилювачів.

Науково-дослідний розділ містить результати досліджень з бінаризації зображень, аналізу текстур і геометрії дефектів.

Використання алгоритмів і систем контролю свідчить про інноваційний підхід.

Надати більше прикладів тестових зображень і аналізу результатів.

Охорона праці та безпека містить аналіз небезпек і рекомендації щодо організації безпеки на дільницях кузовних робіт.

Включення цього розділу підкреслює важливість безпеки в автомобільній промисловості.

Розширити аналіз потенційних аварійних ситуацій для більшої деталізації.

Робота є добре структурованою, насиченою технічними деталями й має високу науково-практичну цінність. Особливістю є глибокий аналіз сучасних технологій, використання автоматизованих систем і увага до питань безпеки праці. Для подальшого вдосконалення рекомендовано додати більше прикладних аспектів, конкретних даних із виробництва та економічного обґрунтування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. О.Л. Ляшук, М.Г. Левкович, Д.В. Міронов, В.О. Тесля. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт» галузі знань 27 «Транспорт». – Тернопіль: Видавництво ТНТУ, 2023. – 60 с.
2. Підручник з будови автомобіля. Видання третє. Виправлене й доповнене – Моноліт 2021 – 288 с.
3. Кисликов В.Ф., В.В. Лущик Будова і експлуатація автомобілів. Підручник - Либідь м.Київ, 2018 – 400с.
4. Кузьмінський Р.Д., Шарибура А.О Технічний сервіс. Ремонт електрообладнання тракторів і автомобілів Львів 2017 – 376 с.
5. Сукач М.К. Технічний сервіс машин. Навч. пос.. Гриф МОНМСУ - Ліра-К, 2017 – 288 с.
6. Форнальчик Є. Ю., Качмар Р. Я. Основи технічного сервісу транспортних засобів - Львівська політехніка 2017, - 324 с.
7. Akafuah, N. K., Salazar, A. J., and Saito, K., “Infrared visualization of automotive paint spray transfer process,” in Fluids Engineering Division Summer Meeting (ASME, 2009), Vol. 43727, pp. 759–765.
8. Akafuah, N. K., Salazar, A. J., and Saito, K., “Infrared thermography-based visualization of droplet transport in liquid sprays,” *Infrared Phys. Technol.* 53(3), 218–226 (2010).
9. Kuhnhenh, M., Luh, M. F., Joensen, T. V., Reck, M., Roisman, I. V., and Tropea, C., “Modelling of the breakup process of viscous fluids by a high-speed rotary atomizer,” *Exp. Fluids* 59, 117 (2018).
10. O’Rourke, P. J., and Amsden, A. A., “A spray/wall interaction submodel for the KIVA-3 wall film model,” SAE Technical Paper No. 2000-01-0271, 2000.
11. Liu, J., Yu, Q., and Guo, Q., “Experimental investigation of liquid disintegration by rotary cups,” *Chem. Eng. Sci.* 73, 44–50 (2012).
12. Liu, J. X., Yu, Q. B., and Qin, Q., “Numerical study on film disintegration by centrifugal atomisation using rotating cup,” *Powder Metall.* 56(4), 288–294 (2013).

13. Liu, L. S., “Experimental and theoretical investigation on the characteristics and two-phase spray flow field of effervescent atomizers,” Ph.D. thesis (Tianjing University, 2001).

14. Bell, G. C., and Hochberg, J., “Mechanics of electrostatic atomization, transport, and depositions of coatings,” in Proceedings of the 7th International Conference in Organic Science and Technology (1981), pp. 59–115.

15. Ahmed, M., and Youssef, M. S., “Characteristics of mean droplet size produced by spinning disk atomizers,” J. Fluids Eng. 134(7), 071103 (2012).

16. Ahmed, M., and Youssef, M. S., “Influence of spinning cup and disk atomizer configurations on droplet size and velocity characteristics,” Chem. Eng. Sci. 107, 149–157 (2014).

17. Пендара М. Р. та Паскуа Ж. С., "Числовий аналіз розподілу розмірів заряджених крапель у процесі електростатичного нанесення покриття: Вплив різних робочих умов," Phys. Fluids 33(3), 033317 (2021) з дозволу AIP Publishing LLC.

18. Pendar, M. R., i Páscoa, J. C., “Numerical analysis of charged droplets size distribution in the electrostatic coating process: Effect of different operational conditions,” Phys. Fluids 33(3), 033317 (2021).

19. Pendar, M. R., i Páscoa, J. C., “Atomization and spray characteristics around an ERBS using various operational models and conditions: Numerical investigation,” Int. J. Heat Mass Transfer 161, 120243 (2020a). Авторське право 2020 Elsevier.

20. Коробочка О.М. Основи розрахунків, проектування і експлуатації технологічного обладнання для автомобільного транспорту: Навч. посібник / Коробочка О.М., Скорняков Е.С., Сасов О.О. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007 – 252 с.

21. Кукурудзяк, Ю. Ю. Технічна експлуатація автомобілів. Організація технологічних процесів ТО і ПР навчальний посібник / Ю. Ю. Кукурудзяк, В. В. Біліченко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 198 с.

22. Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту. – К.: Мінтранс України, 1998. – 16 с. – (Нормативний документ Мінтрансу України).

23. Андрусенко С. І. Технологічне проектування автотранспортних підприємств: навч. посіб. / Андрусенко С. І., Білецький В. О., Бортницький П. І.; за ред. проф. С. І. Андрусенка. – К. : Каравела, 2009. – 368 с.

24. Канарчук В. Є. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Книга 1 :теоретичні основи. Технологія: підручник / В. Є. Канарчук, О. А. Лудченко, А. Д. Чигиринець – К. : "Вища школа", 1994. – 342 с.

25. Канарчук В. Є. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Книга 2: організація, планування і управління : підручник / В. Є. Канарчук, О. А. Лудченко, А. Д. Чигиринець – К.: "Вища школа", 1994. – 383 с.

26. Курніков І. П. Технологічне проектування підприємств автомобільного транспорту : навчальний посібник / І. П. Курніков, М. К. Корольов, В. М. Токаренко. – К. : Вища школа, 1993. – 191 с.

27. Автомобілі. Теорія : навч. посіб. / В.П. Сахно, В.І. Сирота, В.М. Поляков, В. Г. Головань, О.В. Лисий; Військ. акад. - Одеса: Військ. акад., 2017. - 412 с.

28. Кисликов В.Ф., Лущик В.В. Будова й експлуатація автомобілів: Підручник. -. 8-те вид. - К.: Либідь, 2018. - 400 с.

29. Кисликов В.Ф. Лущик В.В. Будова й експлуатація автомобілів. – К.: Либідь, 2016. – 400 с. 5. Ю.А.

30. О.П. Строков, М.Г. Макаренко, В.Ф.Фролов Технічне обслуговування та ремонт вантажних і легкових автомобілів, автобусів. Підручник: У 2 кн. К.: Грамота, 2005.

31. Liashuk O., Hevko I., Hud V., Khoroshun R., Hevko B., Matviishyn A., Sipravska M. Stands for car suspension research. Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research, No. 26 (2022). С 93-103.

32. Lyashuk, O., Levkovych, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Slobodian, L., Pyndus, Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2023, 118, 161-172. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.11>. (Scopus).

33. Ляшук О. Л., Клендій В. М., Хорошун Р. В. Конспект лекцій з дисципліни «Технічна експлуатація автомобілів» для студентів спеціальності 274 «Автомобільний транспорт». Тернопіль: Вид. ТНТУ, 2018. 302 с.

34. В.В. Аулін, О.Л. Ляшук, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко, Д.В. Міронов, Л.М. Слободян, Р.М. Рогатинський Оптимальний комплекс операцій технічного обслуговування і ремонту для підвищення надійності вузлів, систем та агрегатів мобільних машин Збірник наукових праць. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Випуск № 8(39)_II. - Кропивницький. - 2023. - С. 175-189.

35. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.