

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

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ**  
**ЛІНІЇ НАНЕСЕННЯ ПОРОШКОВИХ ПОКРИТТІВ З**  
**ОЦІНКОЮ ЯКОСТІ МЕТОДАМИ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ В**  
**УМОВАХ ТЗОВ «ЯРЕКС-Технотрейд»**

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-63

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)

Василь СІМОРІЗ

(Ім'я та прізвище)

Керівник: д.т.н., проф. Віталій ВЛАСОВЕЦЬ  
(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

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

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.  
“12” вересня 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу студенту  
**Сіморіз Василю Петровичу**

1. Тема роботи: **«Підвищення ефективності роботи технологічної лінії нанесення порошкових покриттів з оцінкою якості методами глибокого навчання в умовах ТзОВ «ЯРЕКС-Технотрейд»**

Керівник роботи: Власовець Віталій Михайлович, д.т.н., проф.

Затверджена наказом по університету від 12.09.2024 року № 616/к-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 06.12.2024 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів виробництва та розрахунків технологічного обладнання; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; Методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Теоретичні основи автоматизації процесів;

2. Обґрунтування, вибір та реалізація інструментарію;

3. Використання роботів для неруйнівного контролю якості;

4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях;

5. Визначення ефективності використання роботів для неруйнівного контролю

Висновки і пропозиції;

Бібліографічний список.

## 5. Перелік ілюстративного матеріалу:

*Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: мета та завдання досліджень; кластери досліджень в напрямку автоматизації; інтенсивність досліджень; загальний вигляд поста для неруйнівного контролю; слайди що ілюструють налаштування робота для неруйнівного контролю.*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3,5	Власовець В.М. д.т.н., проф. кафедри машинобудування			
4	Городецький І.М, доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва			

7. Дата видачі завдання: 12.09.2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Теоретичні основи автоматизації процесів»</i>	<i>12.09.24- 26.09.24</i>	
2.	<i>Виконання другого розділу: «Обґрунтування, вибір та реалізація інструментарію»</i>	<i>27.09.24- 16.10.24</i>	
3.	<i>Виконання розділу: «Використання роботів KUKA для неруйнівного контролю»</i>	<i>17.10.24- 05.11.24</i>	
4.	<i>Виконання розділу: «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях»</i>	<i>06.11.24- 18.11.24</i>	
5.	<i>Виконання розділу: «Визначення ефективності використання роботів для неруйнівного контролю»</i>	<i>19.11.24- 27.11.24</i>	
6.	<i>Завершення оформлення розрахунково- пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому</i>	<i>28.11.24- 06.12.24</i>	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Василь Сіморіз

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Віталій ВЛАСОВЕЦЬ  
(підпис)

УДК 631.332

Підвищення ефективності роботи технологічної лінії нанесення порошкових покриттів з оцінкою якості методами глибокого навчання в умовах

ТзОВ «ЯРЕКС-Технотрейд»

Сіморіз В.П. Кваліфікаційна робота. – Дубляни, Львівський національний університет природокористування, 2024р.

68 с. текст. част., 19 рис., 3табл., 65 джерел інформації.

Мета досліджень - Підвищення ефективності технологічної лінії нанесення порошкових покриттів з оцінкою якості методами глибокого навчання в умовах ТзОВ «ЯРЕКС-Технотрейд.».

Завдання досліджень:

1. Оцінити вплив цифрової трансформації на роботу підприємств у відповідності до принципів Індустрії 4.0;
2. Провести оцінку обладнання, яке використовується для нанесення покриттів;
3. З використанням платформи AWS розробити модель для ідентифікації якісної продукції та провести її випробування;
4. Запропонувати удосконалення процесу оцінки якості.

## ЗМІСТ

Вступ	6
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ	8
1.1. Автоматизація процесів неруйнівного контролю з використанням промислових роботів	8
1.2. Методи неруйнівного контролю на основі машинного навчання	28
1.3. Визначення проблеми та подальших напрямків її вирішення	33
1.5. Висновки	31
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ, ВИБІР ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНСТРУМЕНТАРІЮ	38
2.1. Устаткування для неруйнівного контролю	38
РОЗДІЛ 3 ВИКОРИСТАННЯ РОБОТА РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА UNIVERSAL ROBOTS UR10E ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ	42
3.1. Процес збирання	42
3.2. Процес зварювання	45
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	51
4.1. Охорона праці при використанні промислових роботів	51
4.2. Безпека у надзвичайних умовах	52
РОЗДІЛ 5 ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБОТІВ	56
ВИСНОВКИ	62
Список використаних джерел	63

## ВСТУП

Використання промислових роботів для неруйнівного контролю (NDI) і оцінки якості має численні переваги, ці переваги підвищують ефективність, точність і безпеку різноманітних промислових зусиль. Основні переваги включають наступне:

Промислові роботи можуть виконувати завдання з високою точністю та послідовністю, що важливо для незмінної якості тестування та оцінки. Їх можна запланувати на певний шлях і застосовувати однакову силу, що зменшує мінливість результатів тесту. На відміну від людей, роботи не втомлюються чи відволікаються, а це означає, що вони можуть повторювати те саме завдання з однаковим ступенем точності та послідовності. Роботи здатні працювати в небезпечних для людини середовищах, зокрема в зонах з високою радіацією, екстремальними температурами або токсичними хімікатами. Це знижує ймовірність ризику для здоров'я працівників. Роботів можна запрограмувати на дистанційну роботу, що дозволяє операторам залишатися на відстані від потенційно шкідливого середовища, зберігаючи контроль над роботами.

Промислові операції можуть продовжуватися без зупинки, це підвищить продуктивність і скоротить кількість часу, необхідного для перевірки та оцінки якості.

Роботи можуть виконувати процедури швидше, ніж люди, це прискорює весь процес і дозволяє швидше приймати рішення та відповідні дії.

Автоматизація процесу QA і QA знижує вартість праці, пов'язану з ручним тестуванням, ці витрати включають витрати на оплату праці, навчання та інші витрати.

Роботи можуть працювати разом із існуючими виробничими лініями без значних пауз, це мінімізує час простою та підтримує продуктивність.

Промислові роботи можуть мати різні датчики та інструменти, які виконують різні методи NC, включаючи ультразвукове випробування,

радіографічне випробування та візуальну оцінку. Роботи можуть бути перепрограмовані та переконфігуровані для виконання різних функцій і мають різні адаптації для нових умов тестування, що робить їх універсальними інструментами для оцінки якості. Роботи можуть поєднуватися з розширеними інструментами збору й аналізу даних, щоб забезпечити негайний зворотний зв'язок і моніторинг. Це полегшує негайне виявлення проблем та інших проблем якості.

Дані, зібрані роботами під час тестування, можна зберігати та аналізувати, щоб визначити тенденції та підвищити загальну якість продуктів і методів виробництва. Роботизовані методи тестування, які не передбачають руйнування продукту, не завдають йому шкоди, що гарантує, що всі продукти, в тому числі перевірені, зберігаються у функціональному та непошкодженому стані.

Інтеграція промислових роботів у роботизовану інспекцію та оцінку якості має численні переваги, зокрема підвищену точність, підвищену безпеку, підвищену ефективність, зниження витрат, універсальність, збір даних і безконтактне тестування. Ці переваги роблять роботизований NC ідеальним вибором для компаній, які хочуть підтримувати високі стандарти якості та максимізувати ефективність.

# РОЗДІЛ 1.

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

### 1.1 Автоматизація процесів неруйнівного контролю з використанням промислових роботів

Сучасне виробництво та один із його останніх досягнень, який є найбільш значущим з точки зору розвитку – адитивне виробництво (AM) стає все популярнішим у багатьох дисциплінах. Зокрема, автомобільна та машинобудівна промисловість значно розвинули AM для металів, особливо при ремонті виробів під час війни. Прикладом є виготовлення вийшли з ладу деталей безпосередньо на місці ремонту без тривалої послідовності замовлення нових деталей через AM, що раніше вимагало складання численних компонентів [1-3]. Інші переваги AM включають швидку реакцію на запити споживачів, можливість використання нових матеріалів, налаштування за потреби тощо.

Оцінено стан досліджень щодо автоматизації процесів неруйнівного контролю за допомогою універсальних роботів (рис. 1.1). Період дослідження 2000-2014 рр. Ми розглянули групи дослідників, які вивчають. Чим більше цитат, тим більше коло. Чим менше світла, тим молодші статті в кластері.

Останнім часом накопичено значний досвід випробувань виробів, які не є руйнівними, зокрема корпусних частин, застосовано сучасні процеси автоматизації та роботизовані системи (рис.1.2). Це полегшує швидку оцінку якісних компонентів із високою консистенцією.

У тому числі, як свідчить обсяг досліджень, зріс і обсяг цілеспрямованої роботи в цьому напрямку (рис.1.3).



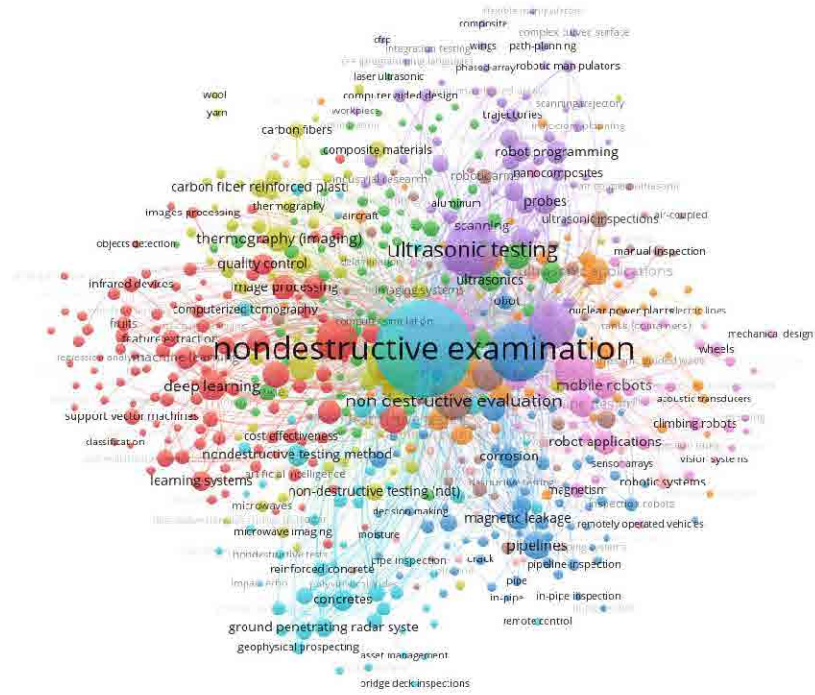


Рисунок 1.1 Кластери досліджень по автоматизації процесів неруйнівного контролю

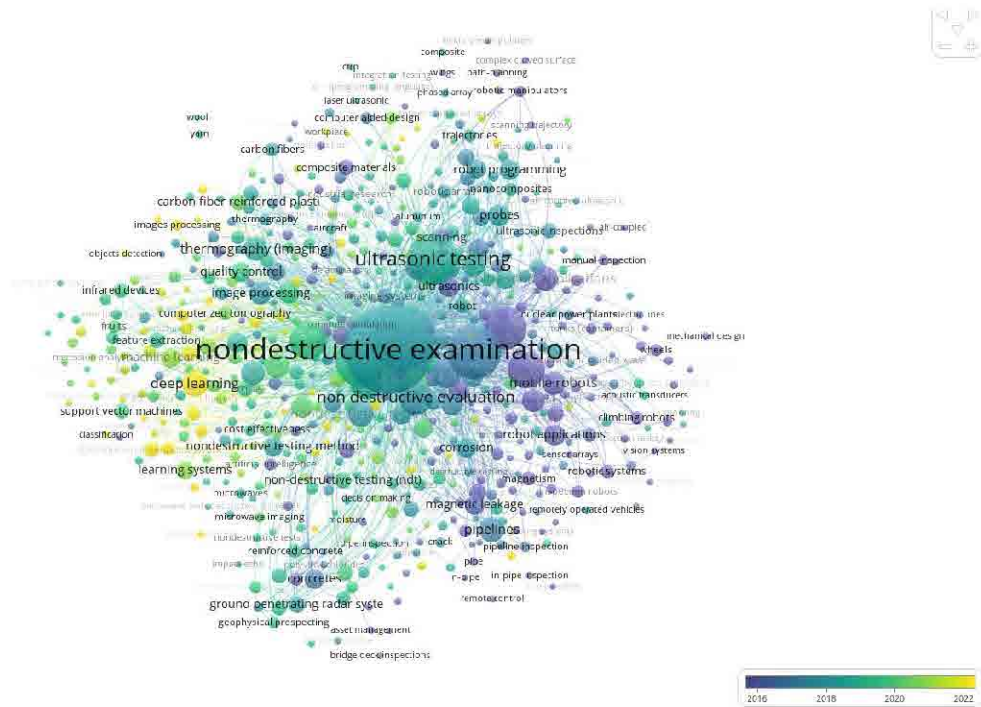


Рисунок 1.2 Інтенсивність досліджень по автоматизації неруйнівного контролю

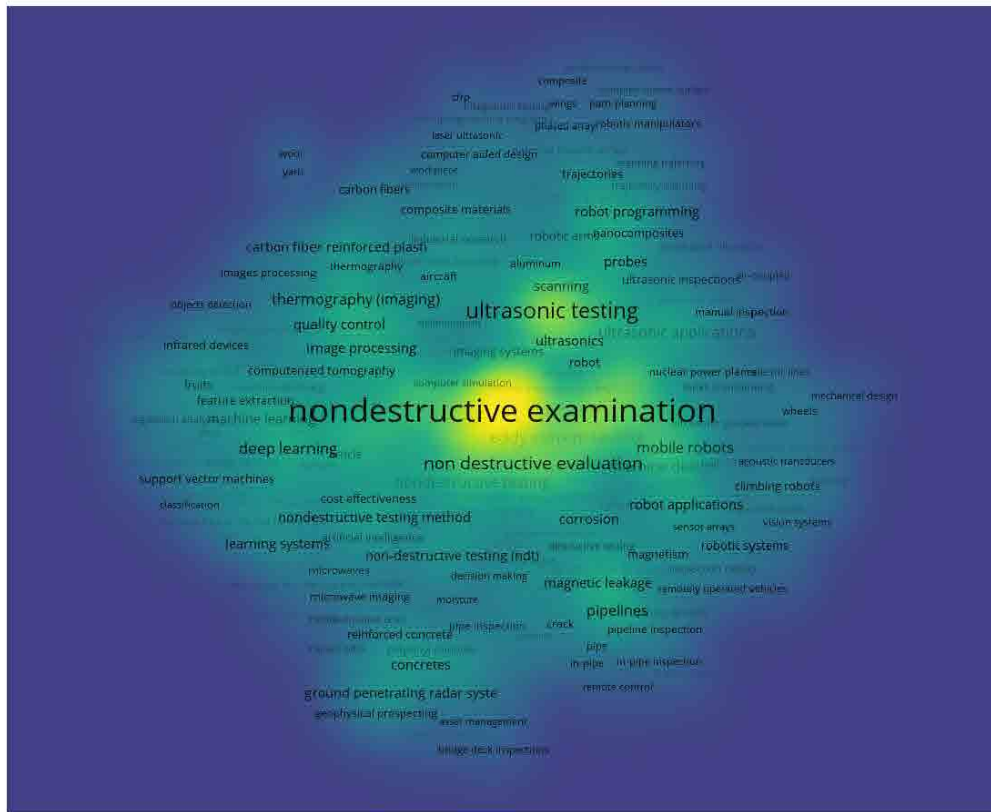


Рисунок 1.3 Теплова карта досліджень

Через різноманітність і складність процесів АМ для металу в готових деталях можуть бути різні внутрішні дефекти. Ці недоліки помітно впливають на внутрішню структуру, механічні властивості та якість цих компонентів. Одією з найбільших перешкод для широкого впровадження АМ у промисловості є складність перевірених частин, їх характеристики та пошкодження, яке вони можуть завдати. Методи неруйнівного контролю (NDT) використовуються для ефективного виявлення різноманітних дефектів товарів АМ. Процедура та параметри для АМ відрізняються для кожного процесу, що ускладнює неруйнівне випробування продуктів АМ, ніж традиційних продуктів. Складна конструкція багатьох компонентів АМ зумовлює необхідність правильного вибору та застосування методу ВАТ, який є найбільш ефективним для виявлення дефектів. У деяких випадках для більш ефективного контролю дефектів критичних частин використовують комбінації методів ВАТ [6]. Важливо відзначити, що існують інноваційні вдосконалення у виробництві деталей, які не мають тріщин, з використанням

зміненої сировини в поєднанні з певним виробничим процесом. Ці розробки включають виробництво деталей без тріщин з використанням модифікованої сировини в поєднанні з певним виробничим процесом. Однак, навіть якщо компоненти виготовлені за однаковим технологічним протоколом, вони можуть мати значні розбіжності. Після використання цих компонентів у реальних ситуаціях наявність недоліків ймовірна. Методи неруйнівного контролю можна застосовувати як для перевірки, так і для оцінки здатності цих конструкцій до відсутності тріщин, крім того, їх можна використовувати для спостереження під час експлуатації. Це полегшує кількісну оцінку структурної цілісності та властивостей матеріалу.

Багато досліджень зосереджено на неруйнівному контролі та моніторингу процесів і продуктів в робочих умовах. Під час і після процедур АМ використовували такі методи, як метод ВАТ, який включає рентгенівську комп'ютерну томографію (КТ), акустичну емісію (АЕ), ультразвукову дефектоскопію (УЗД), термографію, комп'ютерне бачення, світлову структуровану систему та лазерний лінійний сканер. найнятий. [12] обговорили різні типи дефектів, механізми їх утворення та неруйнівні методи випробувань, які використовуються для оцінки механічних властивостей і якості деталей, створених за допомогою процесу АМ. [13] оцінили різні методи неруйнівного контролю для виявлення металевих нерівностей і недоліків, пов'язаних з обслуговуванням. Автор запропонував контрольні блоки та стандартні процедури, які б гарантували, що той самий метод NCing використовується різними операторами на одній металевій підкладці та з використанням подібних процесів АМ. Ці процедури дадуть порівняльні результати виявлення. Також були вивчені труднощі, пов'язані з досягненням ефективного виявлення та визначення характеристик у процесах, заснованих на металевому порошку, включаючи проблеми, пов'язані з мікроструктурою та геометрією, обмеження існуючих технологій для НДТ та прогалини, що залишаються в технологічному розвитку. з основною метою моніторингу та виявлення при створенні АМ. Загальний опис загальних дефектів компонентів

AM, різних методів НДТ, які застосовуються до компонентів AM, і їхньої здатності досліджувати та регулювати дефекти виробництва та обслуговування задокументовано в 10. [14, 15] обговорювали фундаментальні атрибути сучасних методи неруйнівного контролю та задокументовано основні пов'язані з ними досягнення та труднощі для кожного методу неруйнівного контролю. Автори продемонстрували найменший розмір дефекту, який можна виявити за допомогою методу неруйнівного контролю, це було результатом академічних досліджень або випробувань, проведених компаніями.

Крім того, у літературі опубліковано деякі більш конкретні дослідження та огляди методів неруйнівного контролю. Наприклад, задокументовано комплексне дослідження різних методів неруйнівного контролю, специфічних для дроту та дуги AM (WAAM) [16-18]. Займаючись рентгенівською технологією, вони провели дослідження рентгенівської мікрокомп'ютерної томографії, ця технологія використовується для вимірювання розмірів, оцінки пористості та виявлення дефектів у компонентах AM. Протягом останніх п'яти років було проведено цілеспрямоване дослідження використання високошвидкісної технології синхротронного випромінювання для спостереження та аналізу утворення дефектів в AM. Інші міркування включають ультразвукові методи *in situ* та *off-line*, які застосовуються до AM. Ці методи обговорюють специфіку ультразвуку, який використовується для виявлення помилок у компонентах AM. [22] пояснив фундаментальні принципи тестування AE у виробничому процесі та тепловізор у процесах AM. У цій статті досліджується використання цих двох методів неруйнівного контролю в AM, а також їхній потенціал для виявлення недоліків у компонентах AM, у статті також оцінюються переваги та недоліки кожного методу.

ISO/ASTM 52900:2021 (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Словник і основні терміни AM: процедура комбінування матеріалів для створення об'єктів із 3D-даних щодо створення, як правило, шляхом

додавання шарів, замість використання субтрактивного підходу [14, 23]. Як правило, методи АМ включають кілька подібних кроків, які перетворюють модель САД у фізичне представлення наприклад, створення 3D-моделі за допомогою програмного забезпечення САД або отримання числової інформації за допомогою зворотного проектування, створення файлу та налаштування машини. Після етапів попередньої обробки слідує процес АМ, а завершальним етапом є додаткова обробка, яка може включати очищення та іншу поверхню. Після завершення обробки додаткова дообробка може включати термічну обробку, наприклад, ізостатичну обробку металів проводять гарячою температурою 26-28 градусів за Цельсієм Специфіка процесу АМ була задокументована в попередніх письмових роботах [29-36].

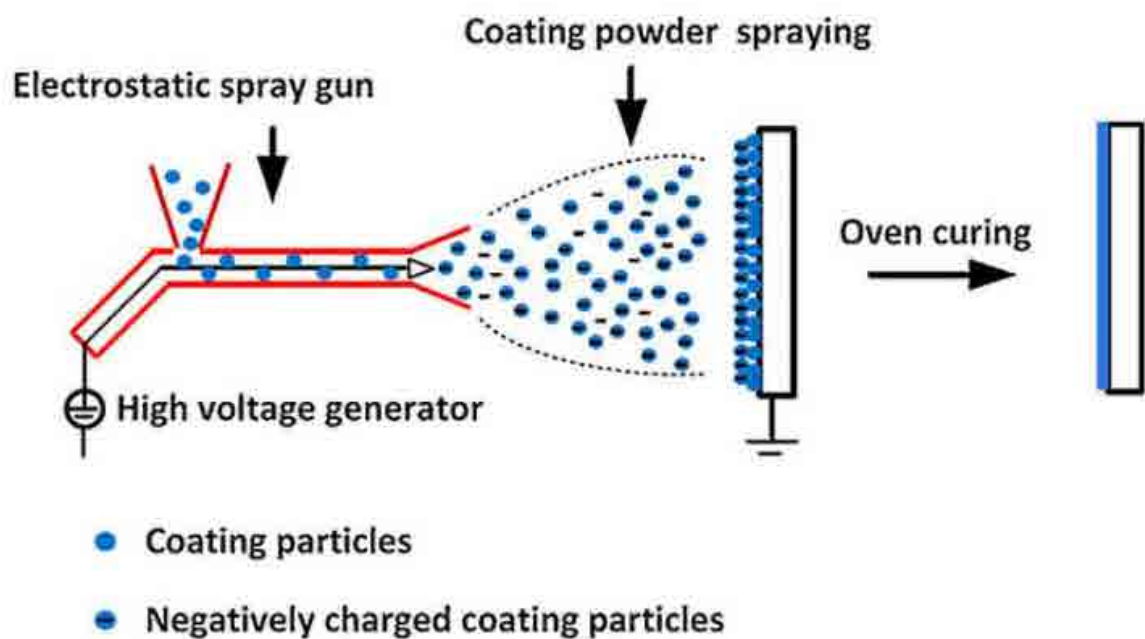


Рисунок 1.4 Процес нанесення порошкового покриття

Методи АМ поділяються на сім різних типів: спрямоване енергетичне осадження (DED), екструзія матеріалів (MEX), порошкове сплавлення (PBF), листове ламінування (SHL), струменеве напилення матеріалів (MJT), струменеве розпилення зв'язувального матеріалу (BJT) і Фотополімеризація в резервуарах (VPP). Серед них DED та PBF мають найбільшу кількість створених компаній.

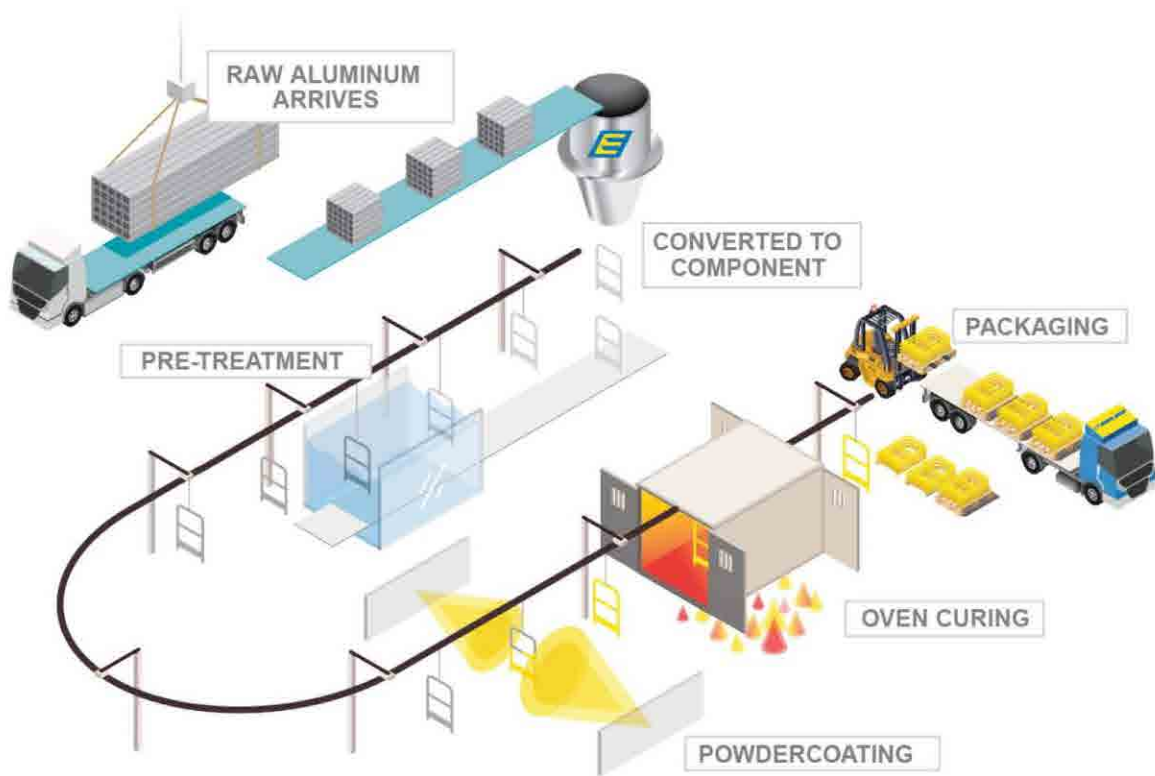


Рисунок 1.5 Типова лінія нанесення порошкових покриттів

DED використовує джерело живлення разом з одним або декількома соплами для розсіювання вихідної сировини. Джерелом енергії може бути лазер, електронний промінь, плазма або електрична дуга. Дріт або порошок, який використовується як сировина, розплавляється в певному місці за допомогою джерела енергії, наприклад електронного променя або лазера, потім порошок наноситься на підкладку у вигляді зростаючих шарів. Лазерні електроерозійні системи зазвичай більш популярні, і хоча вартість сировини нижча, для розплавлення дроту потрібен потужніший лазер, що збільшує вартість обладнання. Універсальна система доставки порошку DED підходить для обробки багатьох речовин і створення деталей з різними функціональними характеристиками. Підготовка великих компонентів, ремонт пошкоджених компонентів і нанесення покриттів є доцільним використанням технології DED, оскільки сучасне обладнання DED використовує 5-осьову систему, діапазон обробки більший, ніж у 3-осьової системи, а швидкість осадження вища (2,5 кг/год) [19]. Кілька робіт також були використані для широкомасштабного використання методів на основі DED для AM. Однак

існують специфічні проблеми, пов'язані з DED. Під час процесу шарування матеріал піддається різноманітним температурним циклам, які можуть призвести до складних фазових змін і значної залишкової напруги. Крім того, шари, нанесені DED, зазвичай товщі, ніж шари, нанесені PBF, що призводить до більшого ступеня злиття поверхні на межі розділу між шарами та секціями з більшою анізотропією.

PBF використовує високоенергетичний електронний промінь або лазер, який селективно руйнує металеві частинки або, відповідно, спалює їх на шарі порошку. Це можна далі розділити на селективне лазерне плавлення (SLM) і плавлення електронним променем (EBM) на основі джерела енергії. Однією з істотних відмінностей між SLM і EBM є різні використовувані джерела енергії, а також різні методи, що використовуються для керування потоком енергії вздовж заздалегідь визначеної траєкторії: SLM використовує лінзу для керування рухом лазерного променя, тоді як EBM фокусує і відхиляє електронний пучок за допомогою магнітного поля. Після того, як шар порошку вибірково розплавиться, платформа опускається і на поверхню, яка вже розплавилася, додається новий шар порошку, процес повторюється. Щоб уникнути окислення металевих частинок при високих температурах, робочу камеру SLM зазвичай заповнюють інертним газом, тоді як EBM вимагає вакуумного середовища. Компоненти, виготовлені методом PBF, зазвичай мають вищий ступінь точності та меншу шорсткість поверхні. Порівняно з DED, порошковий шар має більш сприятливу репутацію для розробки складних внутрішніх структур, однак це відбувається за рахунок ефективності виробництва, споживання матеріалу та розміру виробу. Виробництво матеріалів із функціональною диференціацією за допомогою PBF також створює додаткові проблеми, ніж DED [26, 27]. Компоненти PBF мають різноманітні дефекти, пов'язані з ними, включаючи проблеми з пористістю та нелегуванням, ці проблеми, як правило, викликані поганим міжшаровим зв'язком і складною термічною історією відповідно. Крім того, міжшаровий зв'язок у компонентах PBF може бути порушений, якщо надходження

теплової енергії недостатнє, це призведе до зменшення напрямку нарощування та слабшого зв'язку з напрямком сканування. Залишкові напруги та дефекти обробки можуть суттєво вплинути на механічні властивості конструкції, що може значно скоротити область застосування конструкцій АМ.

Різні види матеріальних домішок. Кінцеві особливості мікроструктури та дефекти компонентів АМ на основі металевго порошку в основному впливають із початкових властивостей матеріалу, а також варіацій виробничих параметрів, таких як потужність лазера, швидкість росту шарів, форма порошку, і параметри впорскування. Деякі загальні дефекти, які можуть бути присутніми в DED та PBF на основі металевго порошку, включають пористість, зазори, відсутність плавлення, включення, залишкову напругу, розшарування та тріщини.

Кінцеві особливості мікроструктури та дефекти компонентів АМ на основі металевго порошку в основному впливають із початкових властивостей матеріалу, а також варіацій виробничих параметрів, таких як потужність лазера, швидкість росту шарів, форма порошку, і параметри впорскування. Деякі загальні дефекти, які можуть бути присутніми в DED та PBF на основі металевго порошку, включають пористість, зазори, відсутність плавлення, включення, залишкову напругу, розшарування та тріщини.

Пористість може бути викликана забрудненням вихідного матеріалу, неправильним вибором технологічних параметрів, що може призвести до відсутності плавлення, утворення пари з компонентів вихідного матеріалу, неповного плавлення та уловлювання газу [29]. Пористість є найбільшим недоліком, який слід визнати. Виконуючи функцію напруги, пористість у продуктах АМ може спричинити утворення тріщин і зниження здатності матеріалів витримувати тиск. Важливо визнати, що гарячий ізостатичний тиск може зменшити пористість дрібних пор, але не може вирішити проблему великих пор. У процесі DED висока швидкість руху порошку може зменшити питому енергію ванни розплаву, що збільшує об'єм газу, який захоплюється. У методі PBF взаємодія лазера з порошком може захопити газові пори і



запобігти відсутності плавлення під час SLM. Важливим аспектом є несферична пористість у методі PBF. Ці атрибути, швидше за все, є звичайними та меншими, ніж ті, що отримані від кованих або литих компонентів.

Створення зазорів в основному викликано зміною рівня енергії лазерного або електронного променя. Також перебої в подачі порошку можуть викликати внутрішньосферові розриви. Коли утворені проміжки оточені послідовними проходами в тому самому шарі або наступних шарах, це збільшує складність НС. Порожнечі зазвичай присутні в процесі осадження порошку АМ [24].

Відсутність злиття часто зустрічається в компонентах АМ через недостатнє розігрівання. Тепло, яке поглинається частинками порошку, залежить від різних властивостей частинок, включаючи їх щільність, теплофізичні властивості, швидкість газу, а також форму та склад їхніх частинок. Якщо новий шар порошку недостатньо нагрітий і розплавлений, це призводить до часткового злиття з попереднім шаром. Крім того, відсутність дефектів легування може бути пов'язана з високою швидкістю осадження або неправильністю технологічних процесів або параметрів. Майте на увазі, що після виявлення цього дефекту його можна усунути в процесі виробництва.

Включення - це частинки, які мають властивості, відмінні від решти матеріалу або середовища. Вони також можуть включати компоненти, які частково розплавлені, і компоненти, які розбризкуються під час виробничого процесу. Ці напилені компоненти можуть перешкоджати руху лазерного променя в різних положеннях, це може негативно вплинути на якість поверхні, а також може розглядатися як ділянки з високим ступенем пористості і, таким чином, схильні до дефектів. Якщо об'єм включень перевищує товщину шару, який створюється, це може призвести до неправильного зв'язку між наступними шарами. Конфігурація, розмір і розподіл включень можуть впливати на кінцеві властивості компонентів.

Залишкові напруження можна зрозуміти через механізм температурного градієнта. Під час нагрівання джерело енергії створює локальні пружно-пластичні деформації і додатково індукує розтягуючі напруження в опроміненій області. Під час фази охолодження розплавлених верхніх шарів термічне стиснення спричиняє усадку і призводить до створення зон залишкових напружень розтягування і стиснення [20]. Залишкові напруження можуть спричинити серйозні геометричні деформації та суттєво змінити механічні властивості [21].

Розшарування в осаджених шарах в першу чергу спричинене зміною температури плавлення [22]. Це призводить до створення залишкових напружень всередині деталей, що призводить до утворення деформації та відокремлення компонента від заготовки. У деяких випадках, при виготовленні великогабаритних компонентів, може також відбуватися розбухання і руйнування.

Тріщини вважаються переривчастими або роз'єднаними ділянками у виробках з АМ через залишкові напруження в діапазоні межі текучості. Тріщини можуть утворюватися за наявності температурних градієнтів, особливо коли теплофізичні властивості основи значно відрізняються від властивостей шарів будівлі [5]. Крім того, великі швидкості охолодження можуть спричинити появу тріщин і деформацій. Орієнтація тріщини з більшим співвідношенням сторін призводить до вищих концентрацій напружень [13].

Подібно до порошкових процесів DED і PBF, процеси DED на основі дроту, в основному включаючи WAAM і дротяне лазерне осадження металу, можуть страждати від деяких подібних дефектів, таких як пористість, відсутність сплавлення, включення і тріщини. Однак, процеси DED на основі дроту також демонструють типові дефекти, більш унікальні для них, такі як розбризкування, підрізи та прогорання. Бризки - це крихітні краплі металу, які викидаються зі зварювального пальника під час процесу WAAM [24]. Ці краплі можуть прилипати до поверхні деталі, що виготовляється, що призводить до появи непривабливих дефектів. Дефект підрізу виникає, коли

розплавлений метал не може повністю з'єднатися з попереднім шаром, в результаті чого утворюється щілина або отвір [17]. Інший поширений дефект, прожог, виникає, коли дровий електрод плавиться наскрізь через дно деталі, що виготовляється, залишаючи отвір у готовому виробі [25]. Зазвичай це відбувається під час осадження перших шарів, прожог в основному зачіпає основний метал [17].

Неруйнівний нагляд і контроль процесів моніторингу. Методи неруйнівного контролю відіграють значну роль в АМ, вони охоплюють різноманітні теми - від матеріалів, оптимізації процесу та забезпечення якості до моніторингу після обслуговування. Компоненти АМ мають такі властивості, як тонка мікроструктура та висока анізотропія, які відрізняють їх від традиційних продуктів. Різні мікроструктури можуть впливати як на статичну, так і на динамічну міцність. Аналіз мікроструктури може пов'язати результати неруйнівного контролю, який визначає конкретні ознаки несправності в сигналах, з механічними властивостями, що дає змогу зрозуміти всі характеристики компонента.

Методи неруйнівного контролю, які застосовуються в процесі обробки металів і готових деталей, в основному покладаються на такі атрибути, як світло, звук, тепло, електрика та магнетизм. Перегляньте найпоширеніші методи, включаючи метод на основі оптичного зображення, рентгенівську комп'ютерну томографію, тестування АЕ та ультразвукове виявлення дефектів, які задокументовані в літературі. Ці процедури використовуються для розпізнавання та опису пошкоджень, а також для забезпечення якості.

Оптичний метод на основі візуалізацій. В оптичних методах, які використовують зображення, зображення отримують з високою швидкістю за допомогою різних типів камер під час процесу АМ. Ці зображення аналізуються різними комп'ютерами, щоб розпізнати будь-які аномальні властивості, які можуть вказувати на недоліки. Система моніторингу зору на основі високошвидкісної камери та фільтра, який відсікає край смуги, була запропонована в 19. Шар металевого порошку додається до вбудованої

конструкції платформи за допомогою ролика, потім порошок розплавляється за допомогою лазерний промінь на основі попередньо розробленої траєкторії для заповнення форми двовимірного шару, отриманого з моделі CAD. Після додавання одного шару платформа зменшується на один шар і цей процес повторюється, поки не буде побудована вся секція. Камера CMOS розташована поза камерою SLM. Потім зібрані зображення обробляються за допомогою нового методу обробки зображень, який враховує конкретні умови під час обробки та дозволяє сегментувати басейн розплаву, полум'я та бризки один від одного. Це продемонструвало, що це життєздатний інструмент для спостереження та регулювання процесу PBF у режимі реального часу.

Вивченню обробки зображень присвячено велику кількість досліджень. Наприклад, у систему SLM було включено метод низькокогерентної інтерферометричної візуалізації, що дозволило виявити дефекти процесу, викликані неправильним налаштуванням параметрів, і розпізнати характерні симптоми несправностей [18, 19]. Описано процедуру спостереження за процесом ПБФ за допомогою оптичних засобів та 3D-візуалізації. Незлиття в діапазоні розмірів 0,05 мм-0,75 мм можна виявити в кожному шарі за допомогою розробленого алгоритму, який враховує виявлення змін зображення поточного шару внаслідок різних напрямків освітлення, а також шляхом порівняння зображення поточного шару з попереднім. Було розроблено методи обробки зображень, які можуть розпізнавати та вимірювати характеристики, отримані з оптичних зображень під час процесу друку. Підтверджено зв'язок між оптичними характеристиками зразків нержавіючої сталі, які спостерігаються на місці, та механічними властивостями друкованої частини. Ґрунтуючись на дослідженні, автори вдосконалили алгоритми, пов'язані з виявленням функцій і дефектів, а також специфічні зв'язки між функціями та локальними пошкодженнями у виготовлених деталях.

Перевагами оптичних методів, заснованих на зображеннях, є їх безконтактність, швидке отримання зображення і простота реалізації. Однак ці

підходи в першу чергу ефективні для виявлення дефектів поверхні, тому їх необхідно поєднувати з іншими методами, щоб виявити більш глибокі структурні проблеми. Щоб отримати більш точні дані зображення, методи та інструменти повинні бути модифіковані для полегшення автоматичного вилучення інформації [24].

Рентгенівська комп'ютерна томографія. Рентгенівська комп'ютерна томографія (КТ) вважається одним з найпопулярніших методів неруйнівного контролю в різних областях. Компонентами системи рентгенівської КТ є джерело рентгенівського випромінювання, масив детекторів, які вимірюють ступінь ослаблення рентгенівського випромінювання вздовж ряду лінійних шляхів, а також обертання системи відносно об'єкт. Алгоритми реконструкції використовуються для поєднання 2D-зображень, відсканованих у 3D. Отримана 3D-модель містить інформацію щодо поверхневих і внутрішніх властивостей, а також механічних властивостей.

Основним принципом методу рентгенівської комп'ютерної томографії є ослаблення потужності рентгенівського випромінювання при проходженні його через досліджуваний об'єкт. Насправді взаємодія рентгенівського випромінювання з об'єктом інтересу включає численні складні явища, включаючи фотоефект, комптонівське розсіювання, релеївське розсіювання, утворення пар і утворення триплетів. Ці взаємодії спричиняють послаблення рентгенівського випромінювання, цією властивістю описується взаємозв'язок між властивостями матеріалу й об'єкта дослідження, а також закон Бір-Ламберта. Рентгенівська комп'ютерна томографія, яка використовується для виявлення дефектів, вимірювання щільності, аналізу розмірних властивостей, оцінки шорсткості поверхні та визначення розподілу пор та їхньої морфології, вже є звичним явищем у промисловості АМ, особливо щодо різноманітних застосувань у АМ. .

Що стосується звичайної рентгенівської КТ, документально підтверджено, що ця технологія є корисною для визначення морфології та розподілу пористості. Було виявлено, що пори в дисках, виготовлених

методом PBF, зазвичай не є сферичними. Результати також продемонстрували наявність тріщин, які зазвичай спостерігаються у зразках із високою пористістю. Методи сегментації зображень і їх аналізу повинні бути отримані з властивостей самого зображення. Атрибути мікротріщин і пористості в зразках з нержавіючої сталі були ретельно досліджені шляхом зміни рівня потужності лазера ( $P_0$ ). Для  $0,5P_0$  найбільший сферичний діаметр еквівалента пор, який було виявлено за допомогою рентгенівської комп'ютерної томографії, становив 340 мкм, тоді як для  $P_0$  і  $1,3P_0$  найбільші пори становили приблизно 40 мкм. При низьких витратах енергії лазерного випромінювання ділянки з нерівномірною щільністю відзначаються відсутністю початкового синтезу. При високих витратах енергії лазерного випромінювання зони з нерівномірною щільністю створюються турбулентною ванною розплаву. Створена тут пористість менша, ніж у випадку відсутності плавлення. Однак ця частина більш сприйнятлива до розвитку термальних тріщин у цій області. За допомогою синхротронної рентгенівської комп'ютерної томографії досліджено вплив потужності лазера на властивості дефектів і мікроструктуру зразків з нержавіючої сталі в 16. Порівняно зі звичайною рентгенівською комп'ютерною томографією синхротронна рентгенівська томографія продемонструвала значні переваги, включаючи підвищену контрастність, меншу кількість артефактів, просторову роздільну здатність менше 1 мкм, вищий SNR і більш високу швидкість отримання даних, які пояснюються підвищеною яскравістю променя, частковою когерентністю та керованістю експериментальної установки [20, 21]. Очевидно, що кількість дефектів значно збільшується, коли потужність лазера зменшується з 380 Вт до 200 Вт. Більші пори розташовані в основному біля кола циліндра, тоді як менші пори поширені по всьому об'єму. Крім того, була використана мікротомографія синхротронного випромінювання для перевірки розподілу пор і морфології компонентів з нержавіючої сталі на мікронному рівні під час розтягування в природному середовищі. Результати показали, що пористість вища в частині АМ, побудованої з вищою швидкістю, і розподіл пористості має більш

значний вплив на механізми руйнування, ніж виміряна об'ємна щільність. Крім того, синхротронна рентгенівська комп'ютерна томографія *in situ* була використана для визначення кількісної природи дефектів і розплавленої пули в процесі лазерного АМ. Механізми, відповідальні за утворення бризок і пористості під час лазерного АМ, були зрозумілі, вони включають міграцію пор, розчинення, дисперсії та розриви. Метод, описаний тут, може сприяти покращенню розуміння технології АМ шляхом вирішення поширених проблем, таких як пористість і бризки.

Надійність методу рентгенівської комп'ютерної томографії залежить від якості зображення, зокрема від контрастності та роздільної здатності зображення, обидва з яких є похідними від проникаючої здатності рентгенівського випромінювання, щонайменше на 10% шляху.

Енергія рентгенівського випромінювання, концентрація, наявність локальних розривів або неоднорідності впливають на силу проникнення цієї енергії. Коли рентгенівське випромінювання стикається з досліджуваним об'єктом, воно зменшується через різну щільність поглинання в матеріалах і ефектів розсіювання. Ці обмеження очевидні у великих кількостях і щільних матеріалах, виявлення дефектів за допомогою рентгенівської комп'ютерної томографії буде менш ефективним. Зокрема, більший розмір досліджуваного об'єкта може знизити роздільну здатність зображення, що, у свою чергу, обмежує максимально можливе збільшення сканування. Зменшення зменшення призводить до збільшення розміру сканованого вокселя, що негативно позначається на якості зображення. Крім того, матеріали високої щільності більш невідомі, ніж матеріали низької щільності, через знижену здатність проникати через рентгенівські промені. Таким чином, розмір об'єкта, який можна спостерігати, також обмежений щільністю матеріалу, що, як правило, вимагає довшого часу експозиції для досягнення більшого контрасту зображення.

Незважаючи на обмеження, широко поширений і надійний метод рентгенівської комп'ютерної томографії використовується для спостереження

за розподілом і формою пористості і тріщин, а також для визначення внутрішніх і поверхневих характеристик. Багато вчених порівнюють рентгенівську комп'ютерну томографію з іншими неінвазивними методами обстеження, такими як ультразвукове виявлення дефектів, щоб визначити ефективність і діапазон методу. У рентгенівських комп'ютерних скануваннях вирішальним є зменшення артефактів, важливе покращення низькоконтрастних зображень, а також використовуються алгоритми виділення ознак.

Тест на акустичну емісію. Акустична емісія (АЕ) – це пружні хвилі, які вивільнюються енергією під час локальних змін, пов'язаних з утворенням і поширенням тріщин, пластичністю, фазовими змінами та генерацією напружень. [22, 24]. АЕ тестування — це пасивний метод неруйнівного контролю, який включає два окремі компоненти: дефект, який служить джерелом енергії, і датчики, які збирають інформацію про процес генерації. Ця технологія обертається навколо генерації сигналів, збору даних, обробки даних і виявлення дефектів.

Сигнали АЕ мають ряд загальних властивостей, включаючи час наростання, енергію, амплітуду, тривалість і кількісне визначення. Значення та важливість кожного атрибута можуть бути змінені через різні типи недоліків. В результаті виявлення недоліків і визначення ознак цього методу засновані на прийомі та аналізі звуків АЕ. Метод АЕ досліджувався в багатьох дослідженнях, пов'язаних зі спостереженням за процесами та конкретними деталями в АМ.

Основними перевагами методу АЕ є здатність швидко розпізнавати різні активні дефекти та можливість досягти глобального виявлення без переривання виробництва. Однак одним із основних обмежень є чутливість до слабких сигналів і фонового шуму, які можуть негативно вплинути на вимірювання бажаних сигналів. У результаті необхідно розробити нові датчики, щоб збільшити збір даних. Крім того, існує необхідність у подальшій



еволюції різних методів обробки сигналів та їх включенні в інші методи моніторингу, такі як оптичне зображення.

Ультразвукове регулювання. Метод ультразвукового контролю (УЗК). це потужний інструмент, який виявляє та оцінює поверхневі, підповерхневі та внутрішні проблеми в різних матеріалах і структурах. Чутливість і роздільна здатність ультразвуку при виявленні недоліків зростає з частотою тестів, але також збільшується ослаблення сигналу, що призводить до зменшення глибини виявлення. Як правило, ультразвук поділяють на звичайний і вдосконалений варіанти (наприклад, фазовані решітки, лазерний ультразвук і ультразвук з повітряним зв'язком). Залежно від методу виявлення, тестування може проводитися в контактному або зануреному режимі. Ультразвукові хвилі можна класифікувати як об'ємні або спрямовані, найпоширенішим методом збудження та прийому є п'єзоелектричні перетворювачі. Інші методи збудження ультразвукових хвиль включають лазерний ультразвук [10, 15-17], електромагнітні акустичні перетворювачі (EMAP) [18], магнітострикційні перетворювачі [19, 20] та ємнісні мікромашинні ультразвукові перетворювачі (CMUT) [Цитата1]. На відміну від звичайного ультразвуку, який використовує один п'єзоелектричний кристал для генерування та отримання ультразвукових хвиль, ультразвукові зонди з фазованою решіткою мають кілька компонентів, які організовані за певним шаблоном, наприклад, лінійним, квадратним або круглим. Лазерний ультразвук заснований на проекції лазерного променя на поверхню об'єкта, що створює термічний удар або абляцію. Це призводить до швидкого розширення досліджуваної області і збудження ультразвукових хвиль. Іншою альтернативою контактному ультразвуку, яка усуває потребу в людській істоті, є ультразвук із повітряним зв'язком, ця технологія використовує повітря як середовище для спілкування замість контакту з людиною. Важливо визнати, що ультразвук із зв'язком з повітрям зазвичай не використовується для виявлення компонентів АМ через велику різницю в акустичному опорі між твердим об'єктом дослідження та повітрям, що призводить до значних втрат енергії: [12, 13] .

Імерсійний ультразвук використовувався [22] для розуміння механізму розвитку дефектів у міжшарових і міждоріжкових областях зразків (наприклад, відшарування або адгезія). Ультразвукове сканування А було проведено під час виробничого процесу АМ. Двопараметрична модель поширення хвилі використовувалася для дослідження взаємодії між компонентами АМ і записаними ультразвуковими даними. Ультразвуковий контроль є універсальним методом оцінки якості компонентів АМ, як в процесі виробництва, так і після його завершення. Під час випробувань ультразвукової матриці фаз оцінювалася її здатність до розпізнавання дефектів частин тіла, оброблених дуговим методом електронанесення з різним рівнем гігієни поверхні. Зонди з фазованою решіткою мають максимальний середній профіль 89,6 мкм, що спричинено шорсткістю поверхні. Крім того, були розпізнані штучні дефекти розміром від 2 мм до 5 мм, утворені свердлінням отворів з плоским дном, точно визначено їх розмір, форму та розташування. Через відсутність специфікацій і стандартів щодо перевірки фазових решіток у зразках EDM, метод калібрування та стратегія покрокової перевірки були включені в метод повного фокусування, ці методи потім використовуються для оцінки розміру і форму передбачуваних дефектів (наприклад, кульки з іншого матеріалу розміром 1-3 мм) у поєднанні з методом повного фокусування. Цей метод можна виконувати в режимі реального часу, під час сканування або в автономному режимі. Пізніше ультразвукове тестування фазових решіток було незалежно підтверджено рентгенівською комп'ютерною томографією, яка продемонструвала, що тестування фазових решіток здатне виявляти просвердлені отвори розміром від 0,6 мм до 1 мм в алюмінієвих деталях, виготовлених за допомогою процесу DED. . Було продемонстровано, що моніторинг процесів електроосадження в режимі реального часу можливий за допомогою тестування з фазованою решіткою, цю техніку можна інтегрувати у виробничий процес і надавати дані, які є реалістично відповідними та працюють із швидкістю обчислення, сумісною з додатками в режимі реального часу.

В області лазерної ультразвукової дефектоскопії [22] описано метод розпізнавання дефектів на основі лазерного ультразвуку, який є точним і здатним вимірювати ступінь пошкодження поверхні у виготовлених компонентах з нержавіючої сталі. Було запропоновано новий метод для швидкого визначення місця пошкодження за допомогою хвиль Релея та кругового сканування з подальшим растровим скануванням, яке фокусувало зони пошкодження в положення, яке дозволило б виявити пошкодження під поверхнею різних типів і розмірів. Для підвищення ефективності також використовується швидкий екран для підвищення ефективності [25], але його роздільна здатність обмежена порівняно зі звичайним точковим С-скануванням. Було запропоновано метод фокусування хвиль на поверхні для вирішення проблеми низького SNR, викликаного сигналами з шорсткої поверхні. Шорсткість поверхні має вирішальне значення для лазерного ультразвукового методу вимірювання, тому для згладжування поверхні перед вимірюванням зазвичай використовується шліфування. Лазерна ультразвукова система С-scan була розроблена та застосована для спостереження за дефектами поверхні зразків SLM з різною якістю поверхні. Для точного розрахунку довжини дефекту запропоновано метод автоматичного вимірювання з використанням максимального коефіцієнта кореляції та часу затримки. Додатково вивчався вплив шорсткості поверхні на розподіл потужності лазерного ультразвуку та вимірювання розмірів дефектів. Результати показали, що ця система здатна регулювати розмір отворів діаметром 50 мкм і глибиною 50 мкм. Важливо відзначити, що технологія лазерного ультразвуку має значну перевагу в онлайн-моніторингу високих температур під час процесу АМ через її безконтактний характер.

## 1.2. Методи неруйнівного контролю на основі машинного навчання

Машинне навчання (ML) використовується в багатьох дисциплінах, і зростає популярність поєднання ML з неруйнівним контролем. ML можна

класифікувати як контрольований або неконтрольований. Наприклад, SVM і CNN є типами машинного навчання, тоді як K-means і PCA є неконтрольованими. Крім того, існує кілька різних типів даних, які вводяться в алгоритм, ці типи даних використовуються для навчання машини.

Традиційний метод перевірки оптичного зображення – це ручний метод, який є неефективним і чутливим до помилок. Щоб покращити цей підхід, було досліджено використання CNN для автоматичного виявлення недоліків в АМ. Задokumentовано використання моделі CNN [15] для оптичних зображень для розпізнавання відсутності плавлення, тріщин і газової пористості. Результати показали, що модель CNN здатна розпізнавати дефекти в продуктах АМ. Гібридний метод CNN використовується для спостереження процесу DED за допомогою необроблених зображень [15]. Цей метод є автоматизованим: він автоматично вивчає часові та просторові характеристики зображень, які потребують мінімальної обробки. Такий підхід зменшує потребу в обробці зображень, спрощує процес вилучення характеристик і більше підходить для програм онлайн-моніторингу. Задokumentовано, що алгоритм CNN використовується для прямого підключення оптичних зображень до властивостей АМ за допомогою простого алгоритму ML, який враховує від одного до трьох оптичних зображень, що забезпечує швидке екранування решітки. Важливо те, що цей підхід ML є точним для оцінки ефективності продуктів, а не просто визнання наявності пошкоджень. Однак у цьому дослідженні не вдалося обговорити процес пошарового моніторингу під час процесу складання з використанням зображень, зібраних камерами в камері, які безпосередньо пов'язані з кінцевим продуктом (*ex situ*). Крім того, було запропоновано глибокий CNN із двома потоками, щоб відрізнити зображення, отримані під час процесу SLM, від тих, які були отримані в Інтернеті, це було зроблено для покращення моніторингу процесу та контролю якості. Розроблений метод мав 99,4% успіху у розпізнаванні наявності дефектів у SLM [23].

Інші методи виявлення об'єктів використовують CNN для розпізнавання дефектів. Одноетапний підхід, який переглядає лише один раз (YOLO), також пропонується в 25. Інші оптимізації YOLO-уваги, які є специфічними для виявлення невеликих недоліків (наприклад, поверхневих пор і невеликих включень розміром близько 1 мм.) у компонентах WAAM можна виконати за допомогою оптичних зображень як вхідних даних. Запропонована композиція моделі, яка включає магістральну мережу, функціональну пірамідальну мережу, кілька екземплярів пірамід, які просторово згруповані, і рівень виявлення, розширила здатність розпізнавати невеликі недоліки. Експериментальні результати показали, що цей підхід практичний для промислового виробництва WAAM з високим ступенем точності та ефективності.

У рентгеновській комп'ютерній томографії алгоритм K-means використовується для кластеризації цього типу тестування, яке не є руйнівним. Запропоноване рішення є ефективним для розпізнавання отворів та відсутності сплавлення розміром у кілька мікрометрів у зразках, створених за допомогою процесу SLM. Переваги автоматизованого характеру сегментації рентгеновських КТ-зображень для аналізу пористості були об'єднані з CNN для створення іменованого сегментатора, який може автоматично диференціювати пористість на зображеннях металу AM.

Подібно до використання CNN у попередніх прикладах неруйнівного контролю, поєднання CNN з тестуванням АЕ також становить значний інтерес для дослідників. Наприклад, сигнали, зареєстровані під час виявлення дефектів, були оцінені за допомогою методів ML, щоб розрізнити різні умови конструкції. Класифікаційний бал був отриманий із середнього значення пікової амплітуди та амплітуди центроїда, поділеної на частоту. Тоді CNN було використано для розпізнавання зміненого спектру світла для різних умов будівництва. Зрештою, були застосовані статистичні методи, щоб зв'язати ідентифікатори в сигналах АЕ з якістю інформації AM. Тестування АЕ дає різні результати для різних рівнів якості AM. Незважаючи на високий рівень

шуму, пов'язаного з машинами АМ, функції, які виділяються, можна виділити методами ML.

Вимірювання металевих компонентів із шорсткою поверхнею за допомогою ультразвуку залишається складним, оскільки поверхня зменшує SNR сигналу, що знижує ефективність ультразвуку. Використовували CNN, глибоку нейронну мережу (DNN) і MLP для ефективного збору інформації про пошкодження від ультразвукових хвиль малої потужності та вивчали ефективність цієї інформації в оцінці пористості у зразках, виготовлених SLM, із шорсткою поверхнею. Різні пористості мікронного розміру оцінювали за допомогою повністю пов'язаної DNN, яка була навчена на необроблених ультразвукових сигналах, записаних із зразків. Ця модель показала типову точність 93% для оцінки пористості. Результати продемонстрували, що пористість, оцінена попередньо навченою моделлю, узгоджується з пористістю, виміряною за допомогою звичайної акустичної мікроскопії, це продемонструвало потенціал ультразвукового виявлення на основі глибокого навчання, яке можна використовувати для оцінки пористості компонентів АМ. У лазерному ультразвуку сильний фоновий шум, пов'язаний із шорсткою поверхнею компонентів АМ, зменшує ймовірність виявлення за допомогою традиційного лазерного ультразвуку. Алгоритм усунення шумів, який використовує неконтрольоване машинне навчання (кластер K-means і автоматичний кодувальник), було розроблено та використано для покращення співвідношення сигнал/шум ультразвукових сигналів. Ефективність методу оцінювали за допомогою отворів на плоских поверхнях (середня товщина компонентів SLM 7,5 мкм). На основі інформації лазерний ультразвук був включений у комбінацію ML і SLM для виявлення дефектів поверхні виготовленої нержавіючої сталі. Властивості кожного ультразвукового сигналу були виділені за допомогою PCA з подальшою класифікацією цих сигналів за допомогою навченої ПНМ. Запропонований метод багатофункціональної візуалізації може значно підвищити якість зображень і здатність виявляти дефекти, він уникає традиційних зображень С-скану, які

мають лише амплітуду. Результати експерименту показали, що пори діаметром 50 мкм і 100 мкм можна спостерігати за допомогою зображення, отриманого С-сканером із високим SNR.

Також визнаються інші підходи до необов'язкового тестування, які застосовуються на АМ. Наприклад, вихрострумова дефектоскопія (ECT) використовує принцип електромагнетизму для оцінки пошкодження провідних матеріалів без руйнівного контролю шляхом вимірювання зміни індукованого вихрового струму в досліджуваному об'єкті [25-28]. ECT може бути придатним для використання на місці, а також для виявлення та опису пошкодження металевих виробів АМ. Вперше обладнання ECT було включено в машину DRM, яка відстежувала відносну кількість компонентів під час виробництва пошарово. Під час процедури компоненти з різною концентрацією оцінюються шар за шаром за допомогою системи ECT, яка встановлена на механічному пристрої. Крім того, використовувалися методи аналізу даних для ефективної диференціації та точного розрахунку відносної електропровідності та збільшення вимірних сигналів. Кілька вчених присвятили свої дослідження дослідженню пошарового механізму пошкодження зразків алюмінію, надрукованих методом WAAM з використанням ECT. Результати показали, що розроблений ECT здатний розпізнавати штучні дефекти глибиною до 5 мм і товщиною до 350 мкм при розташуванні зонда на відстані до 5 мм від досліджуваного об'єкта. Задokumentовано [17], що гетеродинний принцип більш ефективний для мінімізації зусиль, необхідних для метрологічних вимірювань, зберігаючи при цьому інформацію про пошкодження. Результати експерименту показали, що запропонований метод має можливість контролювати штучні дефекти на поверхні розміром 100 мікрометрів у зразках з нержавіючої сталі, надрукованих порошковим методом.

ECT відіграє значну роль у розпізнаванні як магнітних, так і немагнітних матеріалів на високих швидкостях, що досягають 150 метрів за секунду, без контакту з поверхнею матеріалу. Однак комерційні ECT здатні досліджувати

лише поверхневі та підповерхневі дефекти. Основний недолік використання EST на компонентах АМ пов'язаний із загальною шорсткістю поверхні, труднощі в диференціації сигналів тріщин від сигналів шуму ускладнюють розпізнавання частин.

Крім EST, капілярна дія використовується для розпізнавання поверхневих пошкоджень компонентів АМ. Цей метод тестування дуже чутливий до дефектів, які виявляються на поверхні, наприклад невеликих тріщин. Однак він не ідеальний для перегляду шорстких або пористих частин АМ, які не оброблені чи відполіровані. Окрім цього, методи неруйнівного контролю, такі як тестування на проникнення, рідко зустрічаються у виявленні друкованих чорнил компонентів АМ.

Крім того, методи NDT використовуються для обстеження та регулювання геометрії виробничого процесу. Дуже важливо розпізнати зв'язок між атрибутами геометрії та параметрами процесу. Розроблено метод неінвазивного контролю висоти шару в режимі реального часу за допомогою камери машинного зору, лазерного лінійного сканера та адаптивних нейронних мереж. Цей метод призначений спеціально для оцінки товщини окремих шарів у гострих точках під час багат шарового покриття. Результати експерименту показали, що висота шару була оцінена з точністю до 25,7 мкм, навіть якщо шари із середньою висотою 250 мкм були нанесені під різними кутами.

### 1.3. Визначення проблеми та подальших напрямків її вирішення

На основі оцінки, виконаної різними методами неруйнівного контролю, включаючи оптичний метод на основі зображень, рентгенівську комп'ютерну томографію, АЕ тестування, ультразвукові методи, інфрачервону термографію, методи на основі машинного навчання, вихрові струми та пенетрантний контроль.

Важливо розуміти, що жоден метод неруйнівного контролю не може виявити всі типи пошкоджень у надрукованих на 3D-принтерах деталях, але



комбінація методів може надати додаткову інформацію для оцінки автентичності деталі. Ці комбіновані підходи до неруйнівного контролю мають вирішальне значення для підвищення надійності перевірки різних типів дефектів, що, у свою чергу, дозволить розширити використання штучного інтелекту у виробництві критичних частин тіла. На основі цієї платформи створення функціональної та ефективної системи контролю пошкоджень має важливе значення для розробки технологій наступного покоління.

Тенденції автоматизації, які підвищують ефективність неруйнівного контролю, перераховані нижче.

Бездротова мережа датчиків. На вимірювання датчиків в АМ впливають зовнішні сили, такі як умови експлуатації або поведінка конструкції. Виміряні дані про датчики повинні відповідати стану процесів і компонентів. На практиці, залежно від різних процесів АМ та різних продуктів, які необхідно виявляти та контролювати, важливо вибрати відповідні датчики (наприклад, ті, що підходять для високих температур), кількість і розташування, а також визначити чутливість датчиків, точність, споживана потужність і джерело збудження. У продовженні еволюції мережі датчиків, що використовуються в АМ, слід запроваджувати інші інновації, такі як інтелектуальні матеріали.

Комбінування інформації. Якщо окремі датчики не відповідають стандартам виявлення АМ, можна об'єднати декілька різновидів датчиків. Дилема полягає в тому, як ефективно поєднати дані з різних датчиків. Правило об'єднання даних може застосовуватися на основі типу датчика, якості даних, середовища, що оточує програму, і рівня об'єднання даних. На низькому рівні інтеграції даних (тобто на рівні сигналу/пікселя) необроблені сигнали датчика та/або зображення збираються та комбінуються для перевірки та моніторингу прогресування процесів і продуктів АМ. Середній рівень (тобто шар ознак) — це середнє значення ознак, які витягуються з необроблених даних, зібраних датчиками. На високому рівні інтеграції даних (наприклад, на рівні рішення/символу) різні символи параметрів процесу з пов'язаними значеннями невизначеності агрегуються для отримання комбінованого

рішення. Як правило, надійні та потужні методи об'єднання даних орієнтовані в першу чергу на завдання (специфічний підхід АМ для конкретної мети).

Розробка розширених алгоритмів. Обробка сигналів у процесі виробництва, а також виявлення та визначення характеристик дефектів покладаються на передові комп'ютери. Оскільки розподіл дефектів розподілено випадковим чином і існує велика кількість різних типів дефектів, важко використати єдиний метод неруйнівного контролю для фактичного розпізнавання АМ. Тому надзвичайно важливо створити вдосконалені алгоритми, які можуть працювати з різними типами сигналів одночасно. Незалежно від того, чи це поєднання кількох традиційних методів неруйнівного контролю, чи суміш традиційних методів і гібридних алгоритмів машинного навчання, вони матимуть все більшу важливість в АМ. Наприклад, методи ML можуть підвищити точність виявлення та зменшити необхідність вимірювань ультразвукових даних. Крім того, передачу навчання та цифрових копій можна поєднати з методами неруйнівного контролю, щоб збільшити діапазон виявлення та ефективність.

Руйнівні випробування в режимі онлайн і на місці: руйнівні випробування важливі для АМ на кожному етапі, і режим перевірки повинен включати не лише геометричні деформації та внутрішні дефекти, а й мікроструктуру та зміни властивостей матеріалу. Однак доступні на даний момент методи неруйнівного контролю мають проблеми в АМ, особливо під час моніторингу виробничого процесу в режимі онлайн і на місці. Необхідно враховувати інші фактори, такі як зміни температури, розсіювання порошку, стан поверхні та інтеграція датчика. Коли онлайн і на місці методи ВАТ ефективно використовуються, вони можуть допомогти підтримувати та покращувати якість продуктів АМ, забезпечуючи миттєвий зворотний зв'язок щодо коригувальних дій у різних виробничих процесах.

ВАТ використовує роботизовану технологію в режимі реального часу. Наприклад, різні типи датчиків можна приєднати до роботизованих інструментів і рухатися разом із аркадним вогнем у поєднанні з раніше

згаданим об'єднанням даних і вдосконаленими методами оцінки процесу WAAM у реальному часі. Інший генератор частоти можна включити в систему, щоб забезпечити синхронізацію всіх пристроїв у реальному часі.

Система, яка автоматично коригує та коригує з миттєвим зворотним зв'язком. Ця система працює навколо даних датчиків, обробки даних за допомогою передових технологій, виявлення та опису дефектів, а також оцінки якості продукції. Ефективні методи боротьби з наслідками дефектів можна використовувати, виправляючи їх під час початкового огляду або прогнозуючи їх до їх появи. Тому для досягнення поставленої мети необхідно створювати системи автоматичної корекції та контролю в режимі реального часу. Реконструкція дефекту є похідною від згаданих вище вдосконалених алгоритмів. Дізнавшись про недолік, відповідні параметри друку, такі як швидкість і потужність лазера, можна змінити, щоб усунути недоліки наступного шару.

Таким чином, метою наших досліджень є автоматизація механічного процесу руйнівного та неруйнівного контролю за допомогою роботизованого промислового пристрою.

Для реалізації основної мети заходу необхідно було виконати наступні завдання:

- оцінити переваги використання роботів для проведення ненасильницького тестування;
- дослідити можливості ненасильницького управління за допомогою універсального автомата;

Встановити керівні принципи для підвищення ефективності процесу.

## РОЗДІЛ 2.

### ОБҐРУНТУВАННЯ, ВИБІР ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНСТРУМЕНТАРІЮ

#### 2.1. Устаткування для неруйнівного контролю

Для неінвазивного огляду частин тіла досліджено можливості використання високопродуктивного оптичного сканера KVM MetraSCAN 3D-R, побудованого на роботизованій платформі та призначеного для автоматизованого контролю якості. Його легко включити в будь-який виробничий процес, який триває в магазині. MetraSCAN 3D-R не тільки підвищує продуктивність, але й покращує точність перевірки всіх типів деталей, незалежно від розміру, форми, обробки чи відбивної здатності.

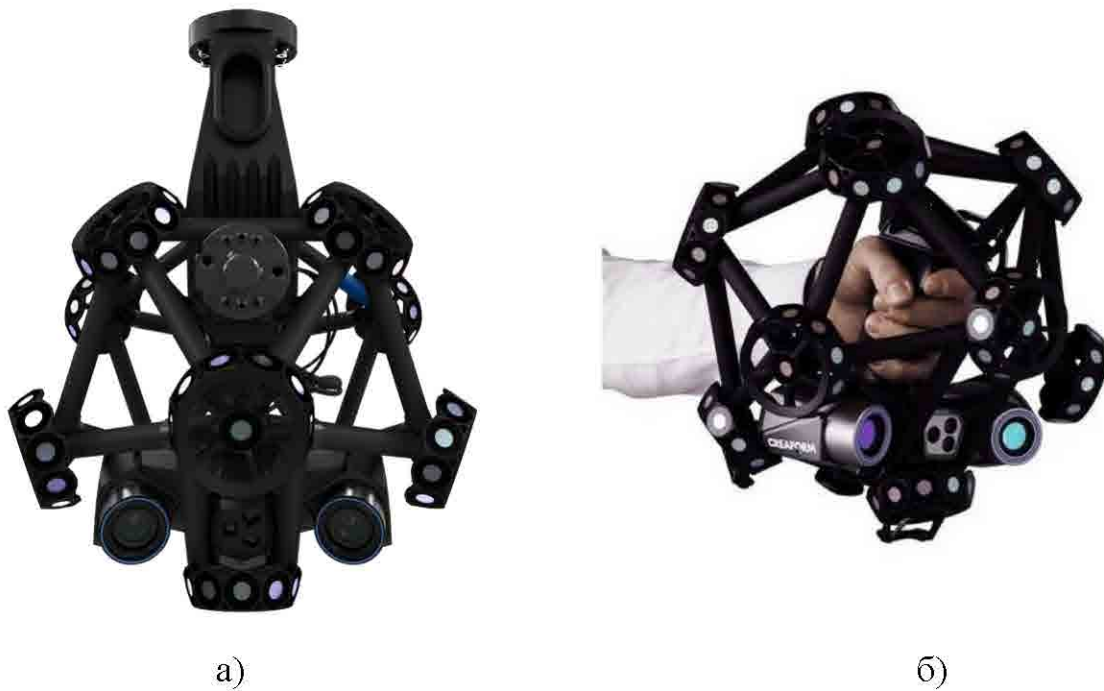


Рисунок 2.1. Метрологічний оптичний сканер

Атрибути цього типу сканера включають наступні атрибути.

Точність - 0,025 мм.

Об'ємна точність (розраховується виходячи з об'єму роботи - 9,1 м<sup>3</sup>)  
0,064 мм.

Об'ємна точність (розраховується виходячи з обсягу роботи - 16,6 м<sup>3</sup>)  
) 0,078 мм.

Похибка форми (сфера) – 0,025 мм.

Похибка площинності (площинність) – 0,045 мм

Приймальні випробування проводяться відповідно до VDI/VDE 2634, частина 3 та ISO 10360.

Точність вимірювання 0,015 мм.

Роздільна здатність сітки 0,050 мм.

Частота вимірювань становить 1 800 000 вимірювань в секунду.

Джерело світла має 45 синіх лазерних ліній світла.

Розмір сканованої області 310 x 350 мм.

Відстань 300 мм.

Глибина поля 250 мм/

MetraSCAN 3D поєднується з датчиком, який має дві камери C-Track, MetraSCAN BLACK Elite утворює систему, яка прив'язує положення 3D-сканера до об'єкта, що сканується. У поєднанні з HandyPROBE, портативною оптичною координатно-вимірювальною машиною (PCMM), ця система створює 3D-сканування та вимірювання для широкого спектру застосувань у метрології.

Приймальні випробування MetraSCAN 3D-R походять від VDI/VDE 2634 і проводяться в лабораторії, схваленій за стандартом ISO 17025, яка гарантує простежуваність міжнародних стандартів.

Щоб прискорити процес 3D-сканування, MetraSCAN 3D запускає 15 лазерних ліній, які перетинаються. Висока швидкість сканування 3D-технології пояснюється її швидким налаштуванням і підключенням, можливостями реального часу та швидким отриманням попередньо запакованих файлів.

Швидкість 3D-сканування не обмежується лише швидкістю вимірювання. Це залежить від набору параметрів: області сканування, кількості лазерних ліній, доступності та свободи пересування, що дозволяє швидко сканувати поверхню з різних ракурсів.

Велика зона спостереження, яка охоплює всі типи частин. 3D-сканер проектує 15 лазерних ліній по всій поверхні, що забезпечує йому чудову здатність вимірювати.

Побудова сітки в режимі реального часу. Зменшує час між скануванням і отриманням готових файлів.

Швидка установка - підготовка швидка: сканер готується до роботи трохи більше ніж за 5 хвилин.

Універсальний MetraSCAN 3D BLACK Elite можна використовувати для сканування компонентів різних розмірів і поверхонь у реальному часі. Він точно й без зусиль сканує як чорні, так і блискучі деталі будь-якої форми, геометрії чи атрибутів поверхні.

Завдяки використанню синього лазера він корисний для поверхонь, які сяють або відбивають світло.

RoboDK, попередньо ліцензована програма «офлайн-моделювання та програмування», була використана для відтворення процесів неруйнівного контролю.

Рама велосипеда з 10 ділянками зварювання, яка була обрана об'єктом зварювання, мала 10 ділянок.

Для керування оптичним вимірювальним пристроєм KVM MetraSCAN 3D-R було використано нове представлення промислового робота-маніпулятора UR-10e (рис. 2.2). Робот-маніпулятор UR10e має 6-осьову ефективність, витримує вагу 10 кг і має радіус дії 1300 мм. Відтворюваність роботизованої платформи UR10e становить 0,05 мм, а вага платформи становить приблизно 28,9 кг.

UR10e популярний у цих галузях, включаючи адитивне виробництво, дозування, дистанційне керування та зварювання.

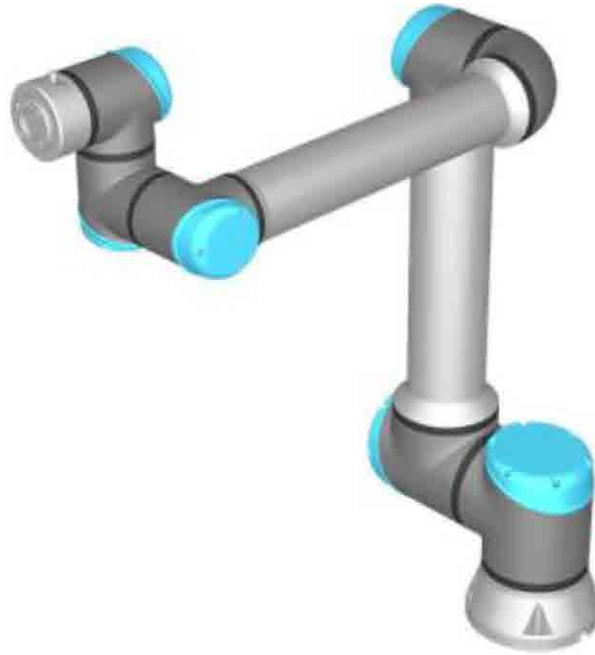


Рисунок 2.2 - Робот-маніпулятор

Керування роботом здійснювалось через шафу керування (рис.2.3)



Рисунок 2.3 – Шафа керування роботом

РОЗДІЛ 3  
ВИКОРИСТАННЯ РОБОТА РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА  
UNIVERSAL ROBOTS UR10E ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ  
КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ

3.1 Процес контролю

Як засіб оптичного контролю, який є неруйнівним, використовувався метрологічний оптичний сканер під назвою KVM MetraSCAN 3D-R, цей сканер був підключений до роботизованого маніпулятора під назвою універсальні роботи UR10e для сканування (рис.3.1).

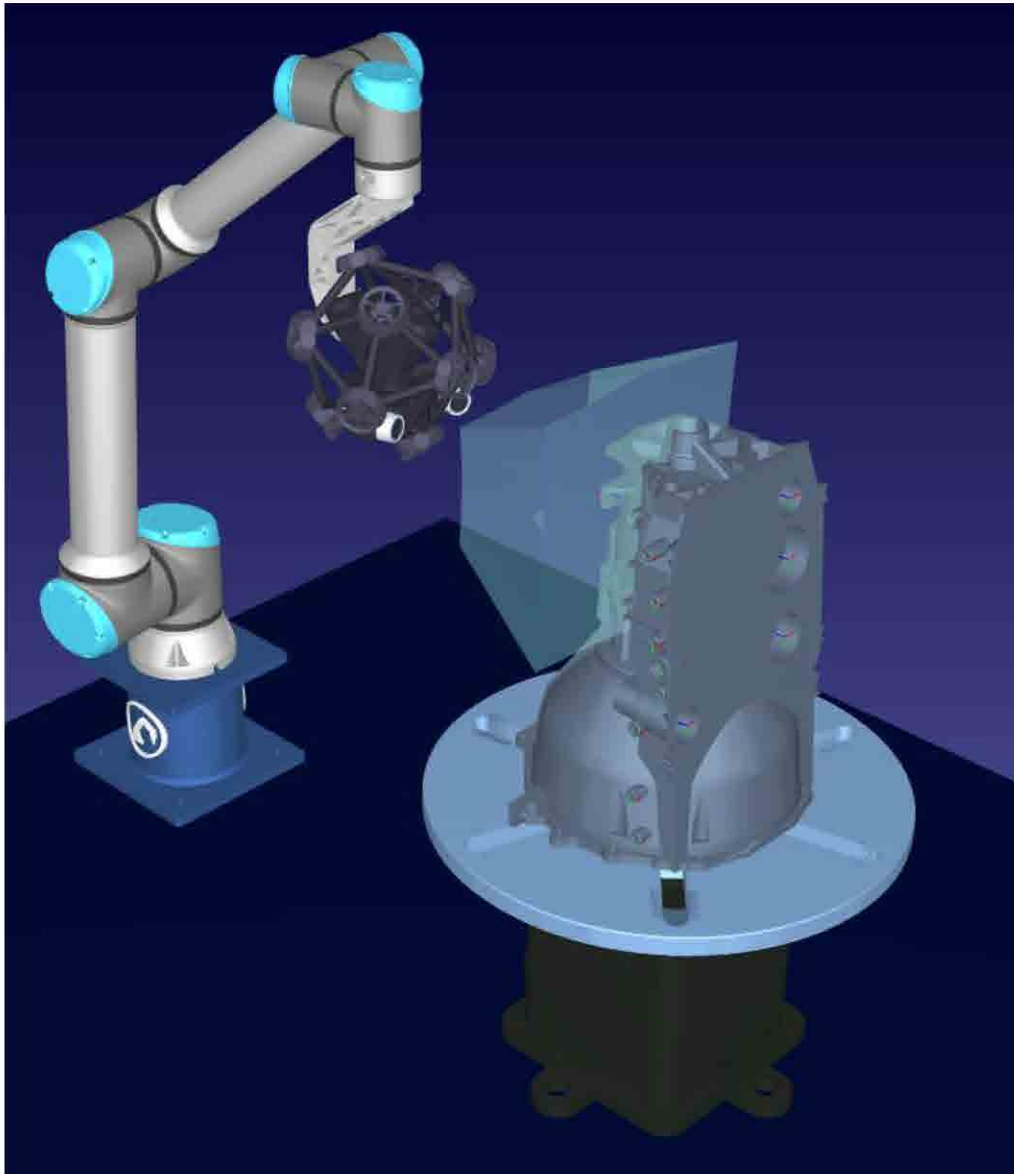


Рисунок 3.1 Загальний вигляд зони



Як контролер використовувався корпус, який був повністю відновлений процесом адитивного виробництва. Після ремонту корпус повинен мати відповідні розміри і не мати терморозривів.

Для автоматизації процесів контролю був застосований спеціальний адаптер, який дозволив використовувати метрологічну камеру в положенні, оптимальному для проведення контрольних заходів.

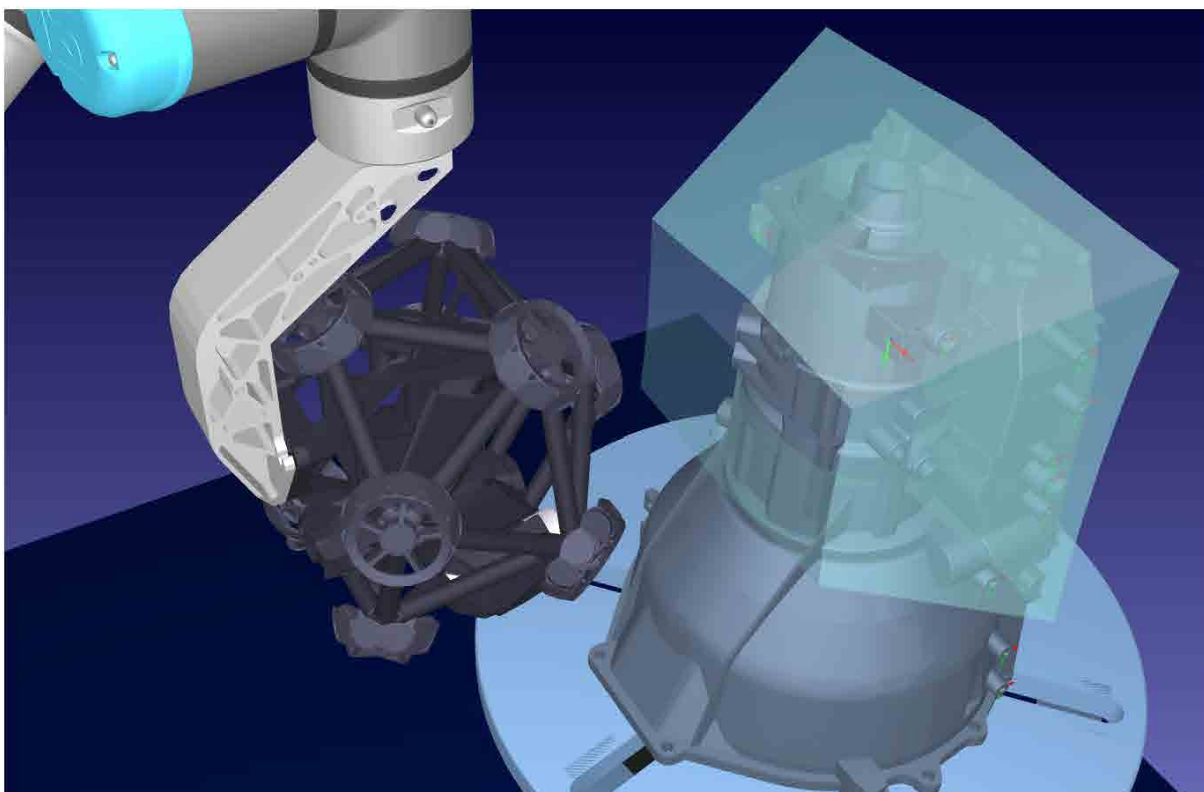


Рисунок 3.2 Кріплення метрологічної камери.

Перед початком використання камери було зафіксовано положення інструменту відповідно до системи координат (рис. 3.3). Розташування є

ТИПОВИМИ ДЛЯ ОСНОВНИХ НАЛАШТУВАНЬ.

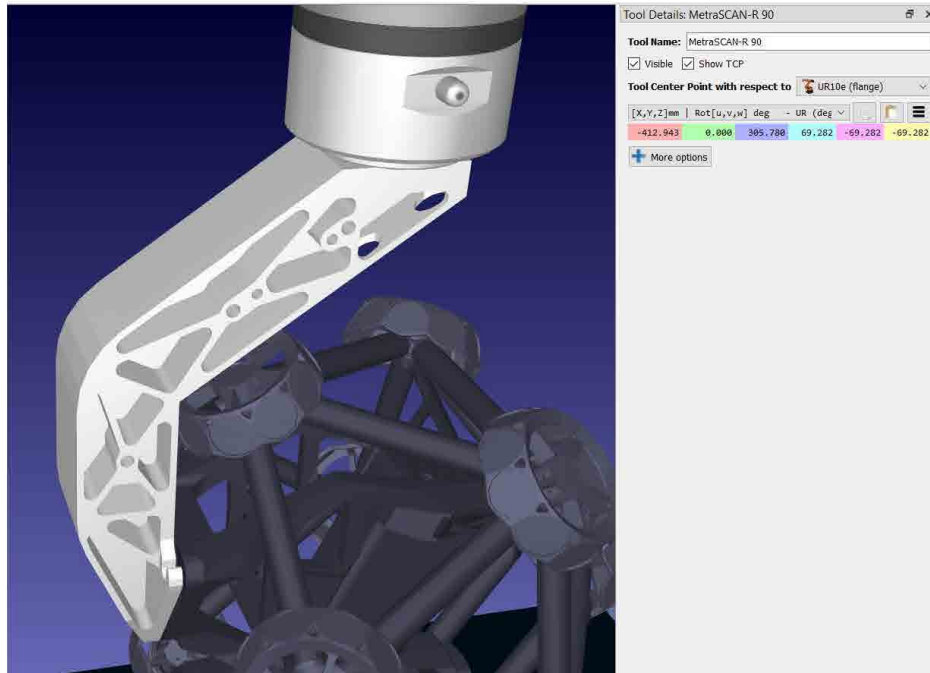


Рисунок 3.3 Встановлення системи координат.

Використання камери та поворотного столу, прикріпленого до корпусу для неруйнівного контролю, полегшує сканування всього продукту (див. рис. 3.4).

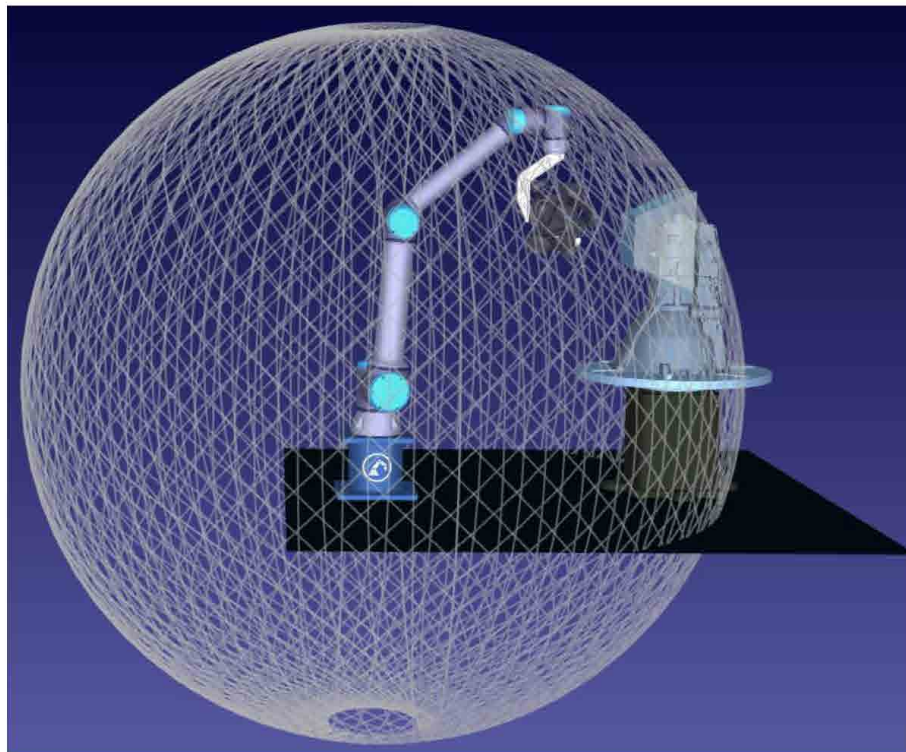
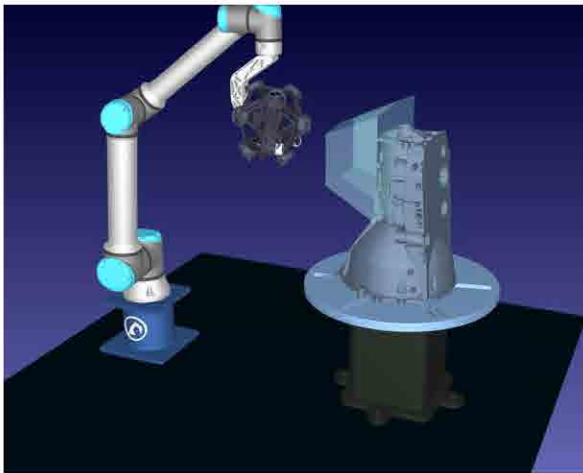
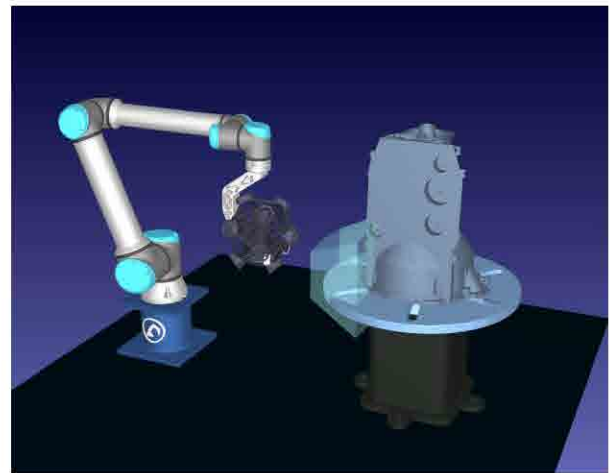


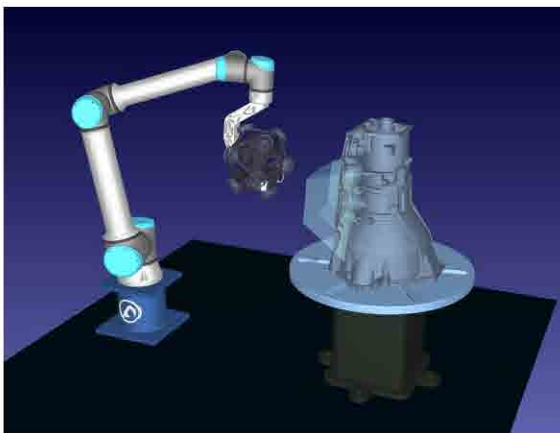
Рисунок 3.4 Загальний вигляд зони



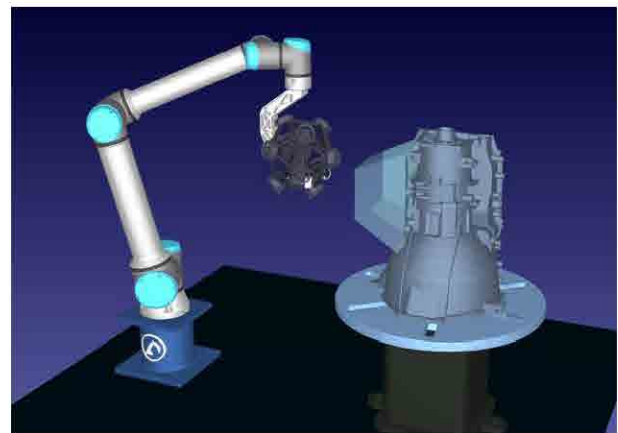
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.5 Результат роботи програми

### 3.2 Програмування робота для використання метрологічної камери при неруйнівному контролі корпусної деталі

Процес офлайн-програмування роботів-маніпуляторів UR-10e від Universal Robots включає створення, симуляцію та налаштування програм для роботів за допомогою спеціального програмного забезпечення без необхідності фізичного доступу до робота.

Спочатку створювали віртуальну робочу зону (рис.3.1-3.4). Для цього імпортували моделі робота, камери, механізму обертання. Встановлювали робота у віртуальному середовищі відповідно до реального розташування.

Визначили зони доступу та обмеження руху для робота (див.рис.3.4).

На етапі програмування рухів та задач визначали ключові точки руху робота (захват деталей, обробка, відпускання), налаштовували траєкторії між точками для плавного та ефективного руху (див. рис. 3.5).

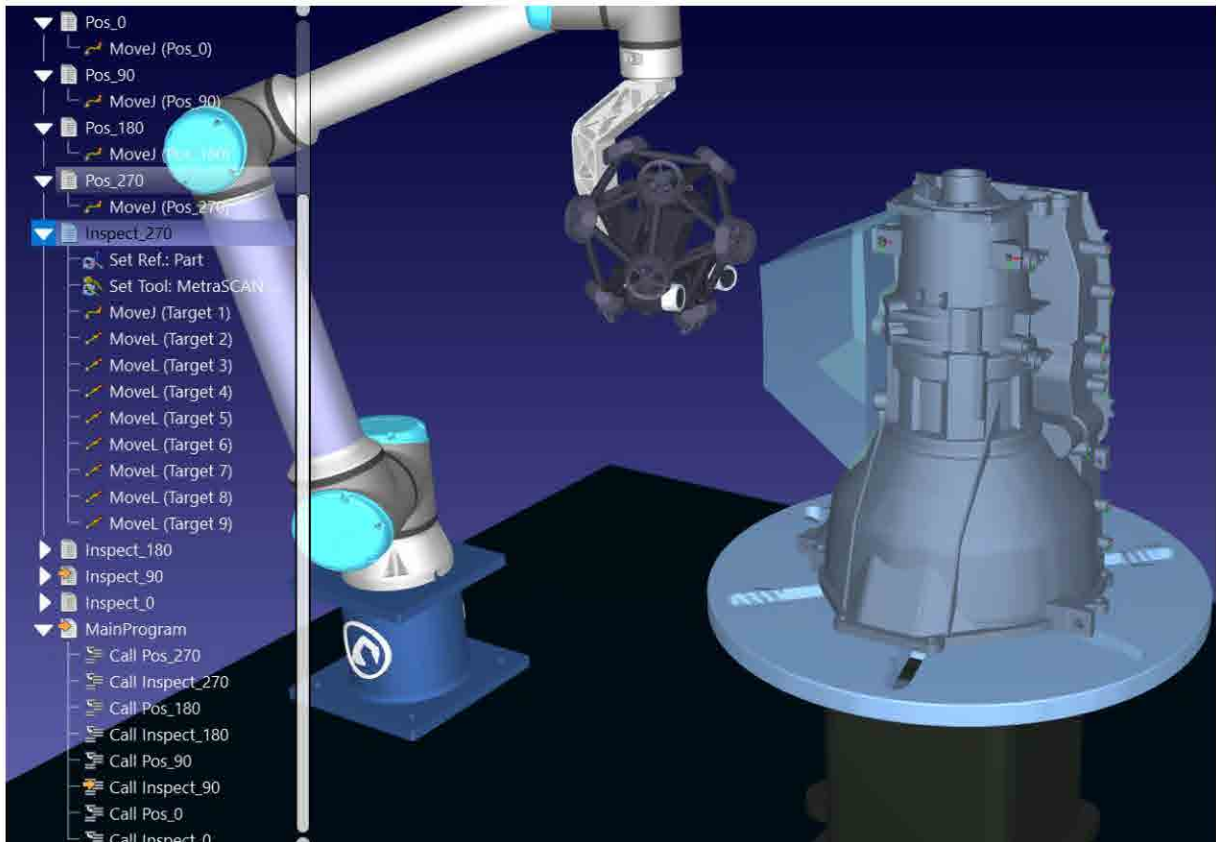


Рисунок 3.5 Налаштування підпрограм.

Після відпрацювання рухів візуалізатор спостерігав за роботом у віртуальному просторі.

Під час фази налагодження проблеми з програмою були виявлені та вирішені під час фази моделювання, команди та траєкторії були змінені для підвищення ефективності та скорочення часу, необхідного для виконання. Після остаточного налагодження програму готують до використання роботизованого компілятора та транспортування її в призначену область.

Для контролю якості матеріалу основи перед нанесенням покриття виконали перевірку з використанням камер машинного зору.

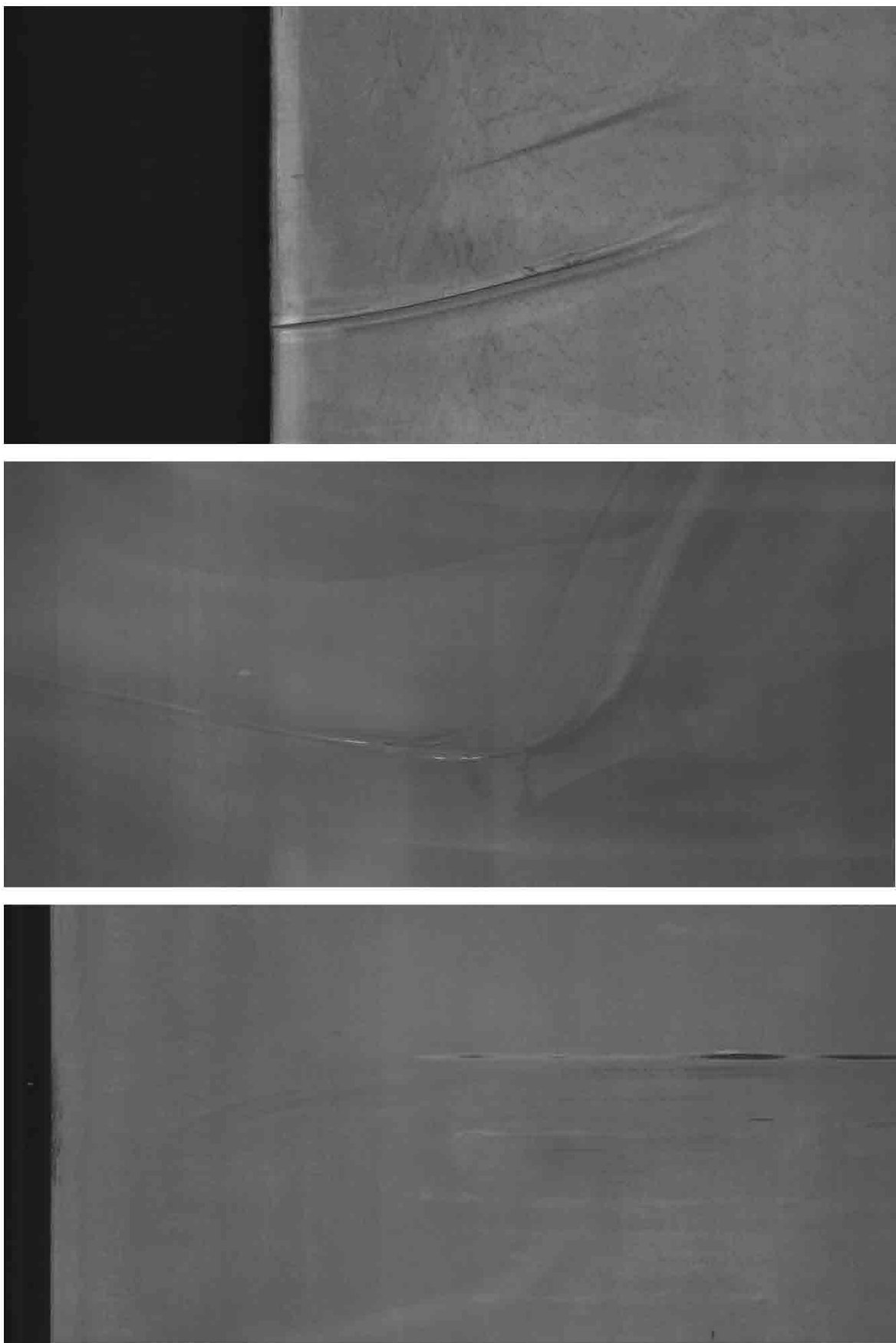


Рисунок 3.6 Основні дефекти перед фарбуванням - CREASE –  
ЗАЛОМ МЕТАЛУ

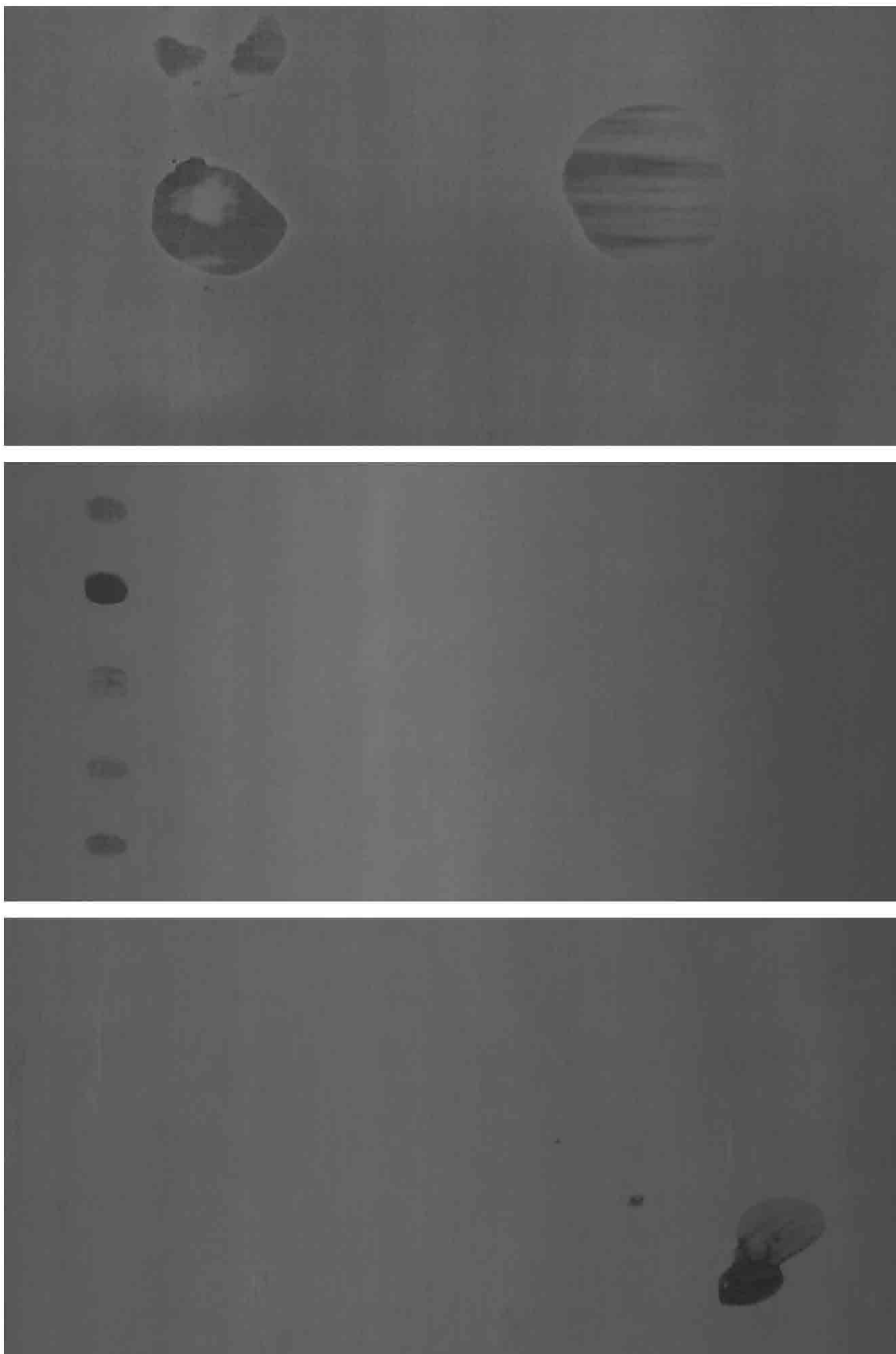


Рисунок 3.7 Основні дефекти перед фарбуванням - OIL SPOT –  
ПЛЯМА ОЛИВИ

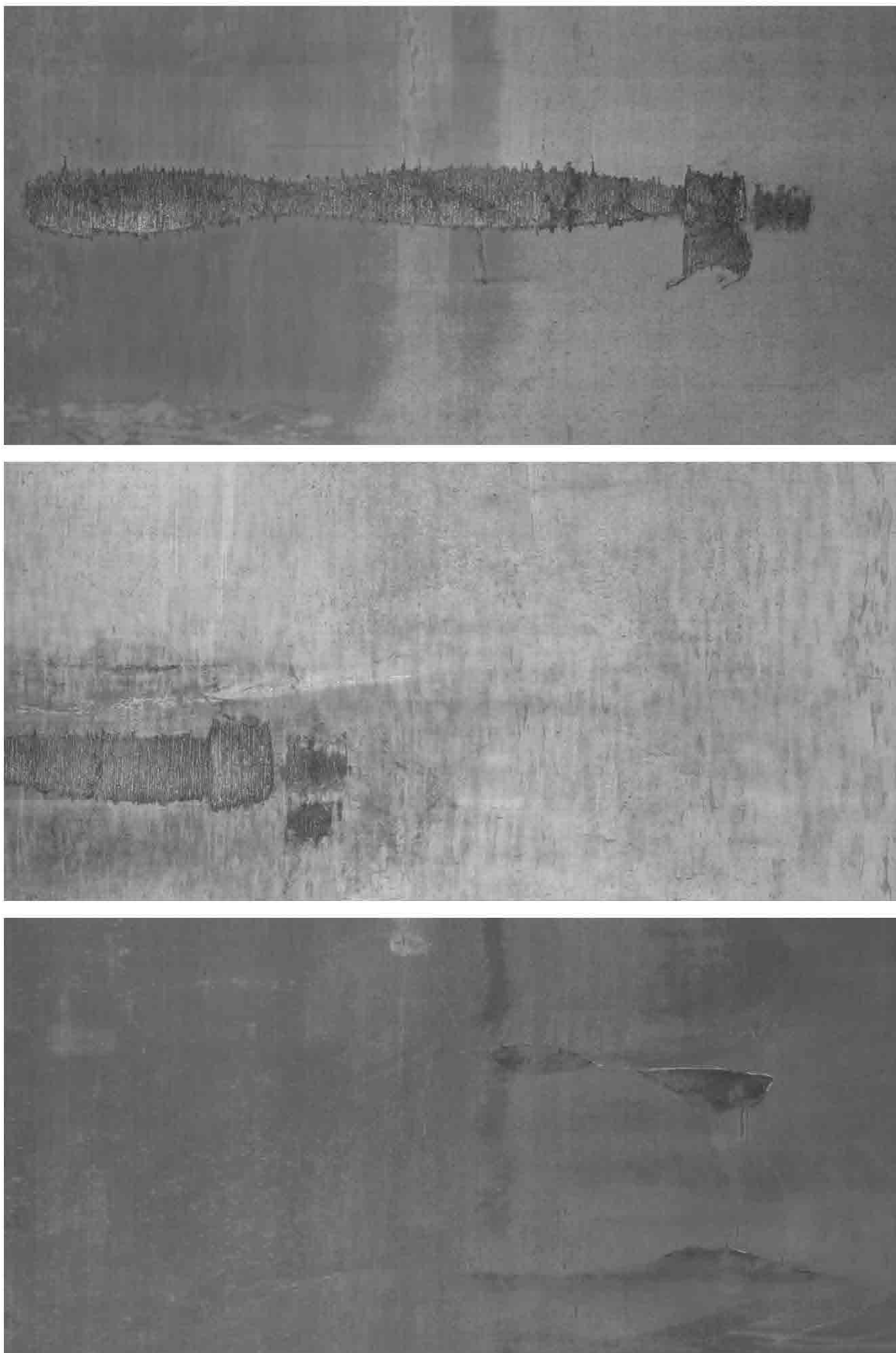


Рисунок 3.8 Основні дефекти перед фарбуванням - ROLLED PIT –  
ДЕФЕКТ ВІД ВАЛЬЦУВАННЯ

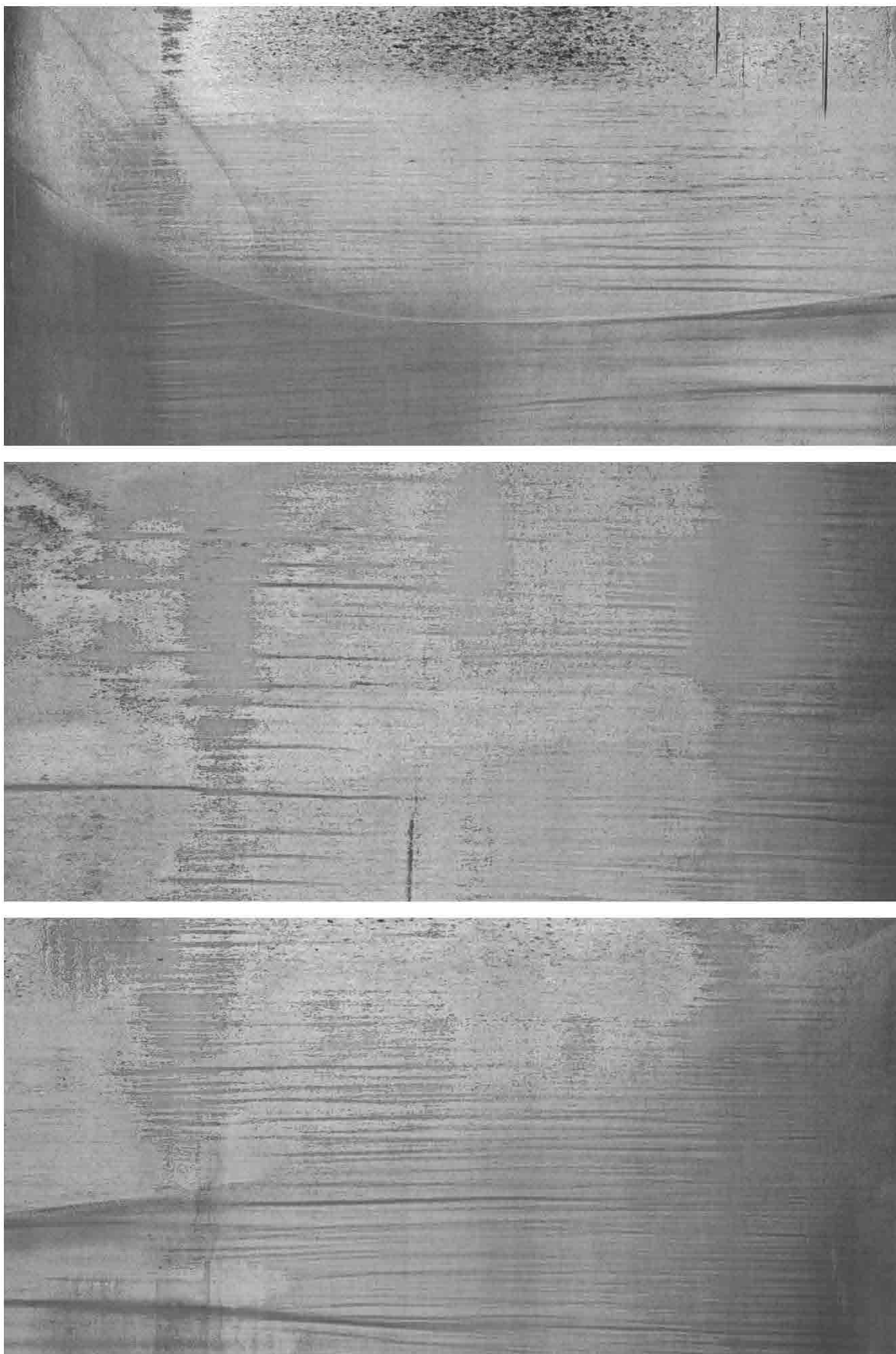


Рисунок 3.9 Основні дефекти перед фарбуванням - WAIST FOLDING  
– ДЕФЕКТ ПРОКАТУВАННЯ



Для досліджень та тренування моделі глибокого навчання використали сервіси AWS (рис.3.10)

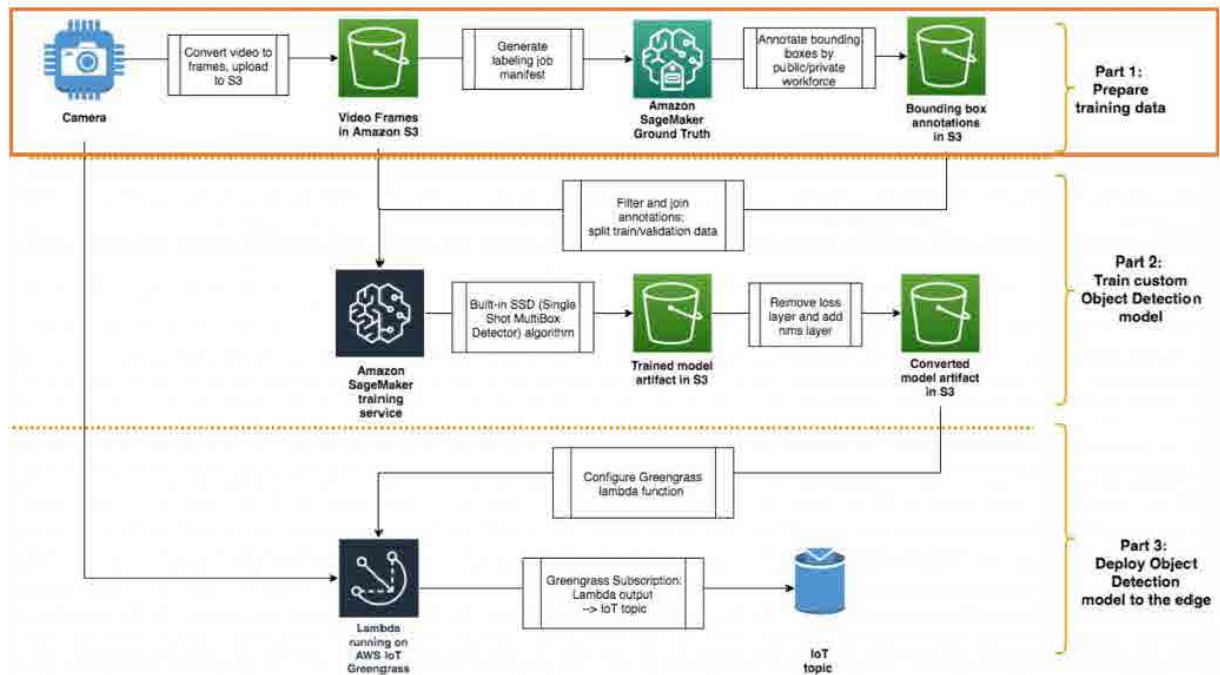


Рисунок 3.10 Сервіси AWS використані для обробки даних

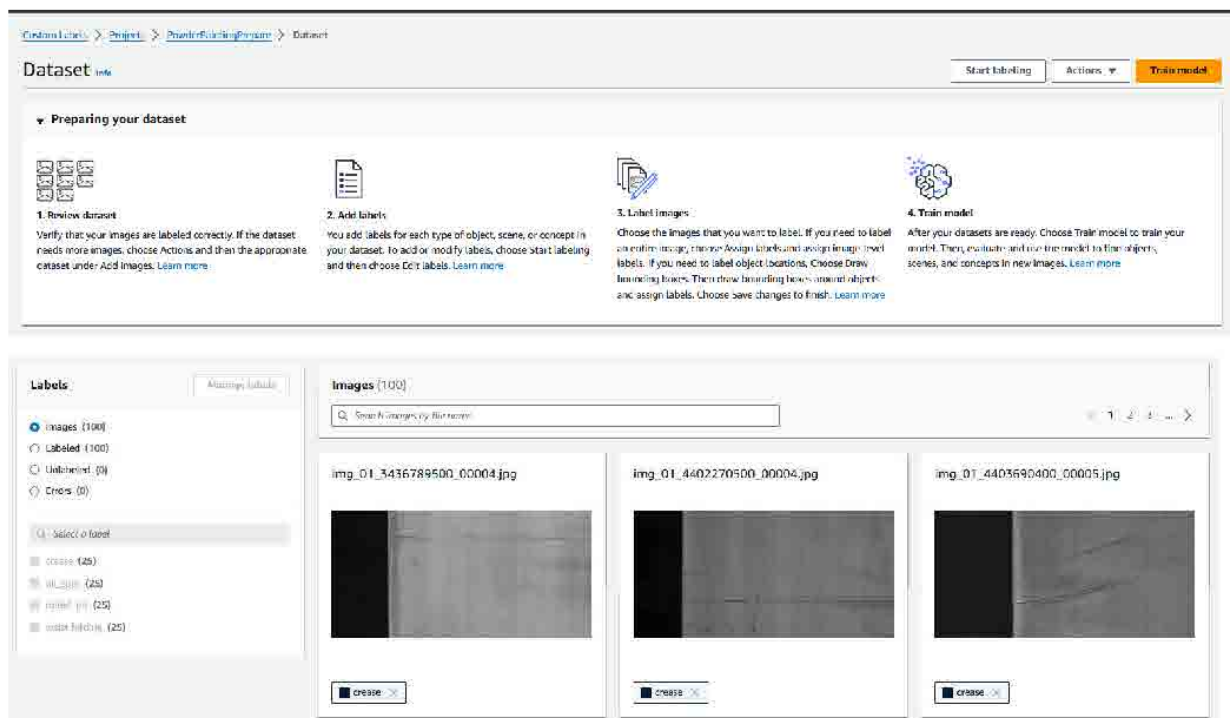


Рисунок 3.11 Позначення дефектів

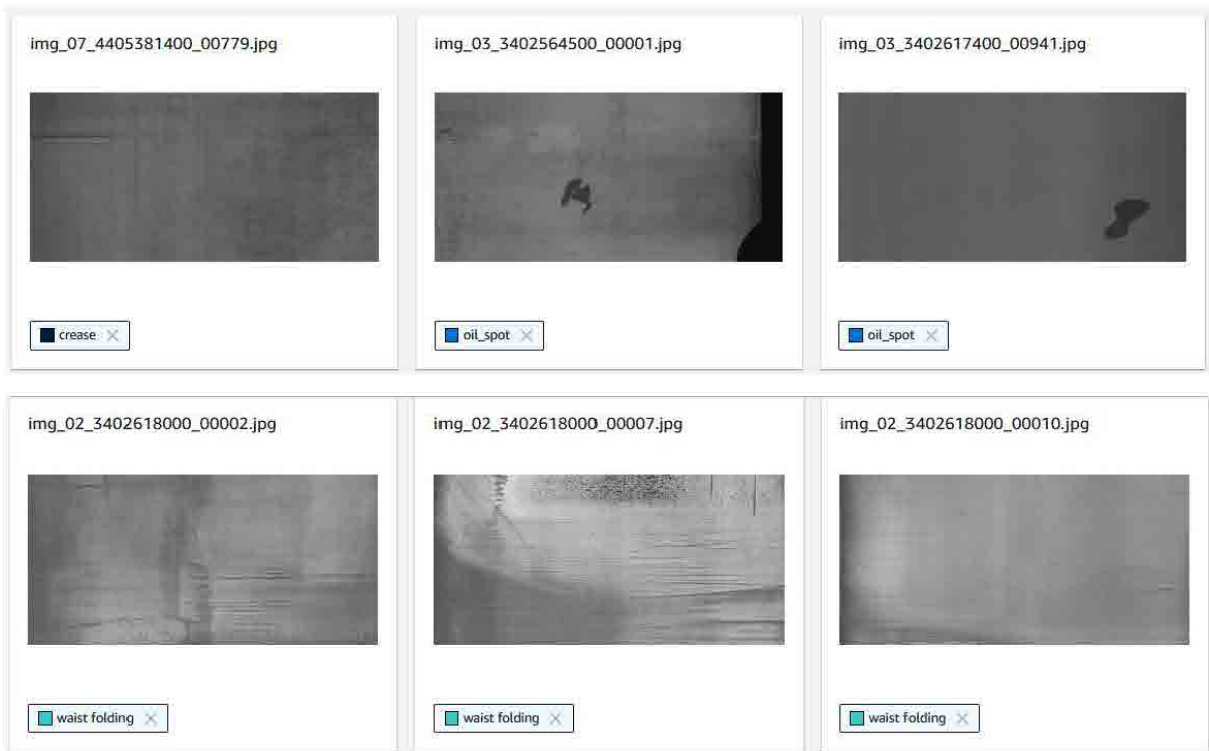


Рисунок 3.12 Завантаження та розмітка знімків, що відповідають різним дефектам

PowderPaintingPrepare.2024-12-15T22.45.42.info Delete model

[Evaluation](#)
[Model details](#)
[Use model](#)
[Tags](#)

**Evaluation**

The Evaluation tab shows the testing results for your trained model. This helps you understand the overall performance of your model. To view the results for an image, choose the View test results button.

**Evaluation results** View test results

<b>F1 score</b> 0.949	<b>Average precision</b> 0.958	<b>Overall recall</b> 0.950
<b>Date completed</b> December 15, 2024 Trained for 7.13 hours	<b>Training dataset</b> 4 labels, 80 images	<b>Testing dataset</b> 4 labels, 20 images

**Per label performance (4)**

Q: sand/cases

Label name	F1 score	Test images	Precision	Recall	Assumed threshold
crease	0.889	5	1.000	0.800	0.387
oil_spot	1.000	5	1.000	1.000	0.198
oil_spot	1.000	5	1.000	1.000	0.288
waist folding	0.909	5	0.833	1.000	0.285

Рисунок 3.13 Результати тренування моделі

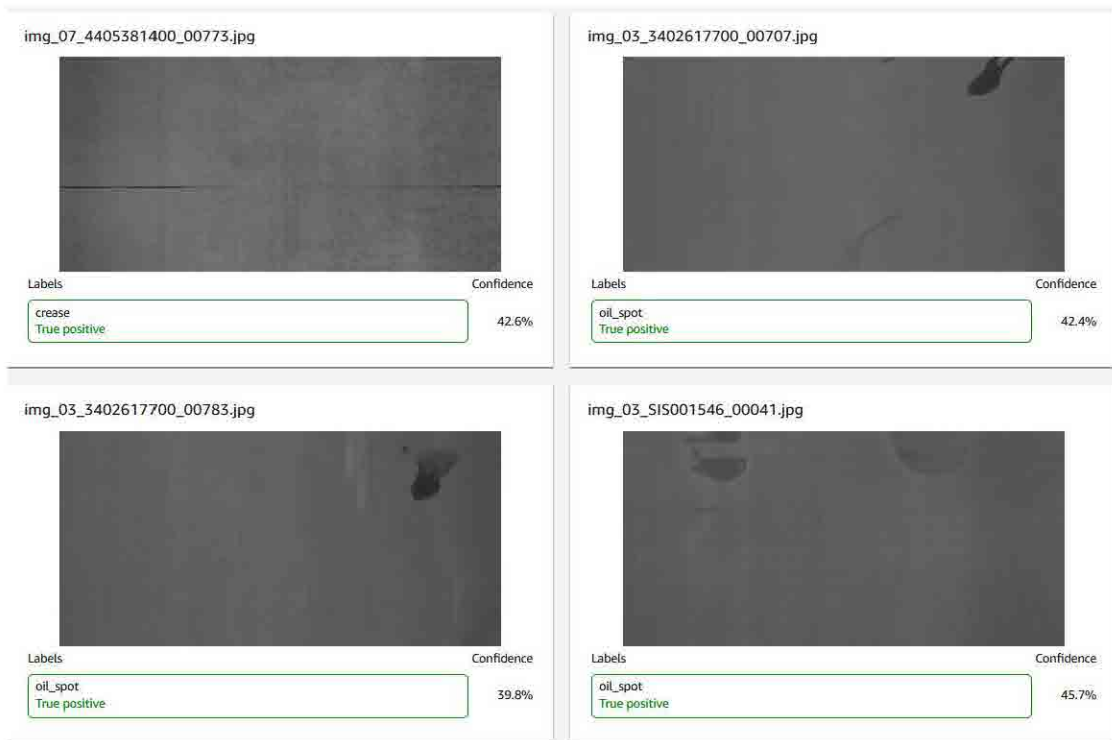


Рисунок 3.13 Результат роботи – дефекти розпізнані

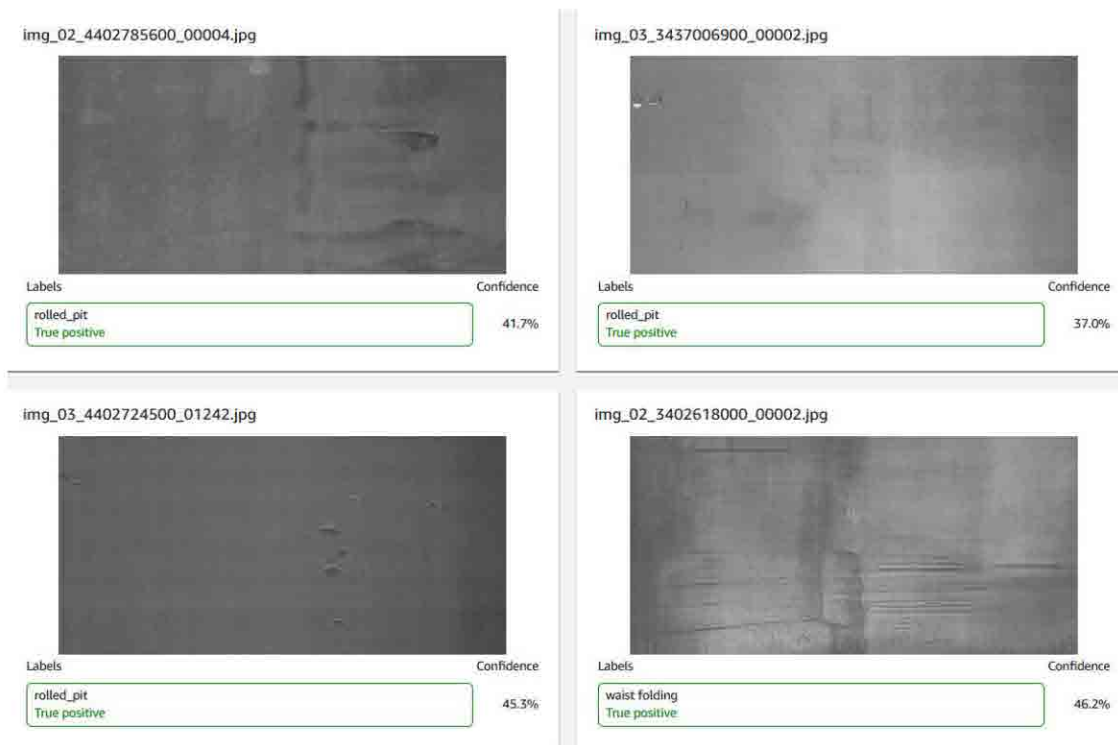


Рисунок 3.14 Ідентифікація дефектів

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Охорона праці при використанні промислових роботів

Роботи обладнані низкою вбудованих функцій безпеки та електричними інтерфейсами безпеки для під'єднання інших пристроїв і додаткових захисних пристроїв. Кожна функція та інтерфейс безпеки постійно контролюються згідно з EN ISO13849-1:2008.

Використання параметрів конфігурації безпеки, що відрізняються від параметрів, визначених оцінкою ризиків, виконаною складальником системи, може призвести до небезпек, що непереборні в достатній мірі, або до ризиків, що недостатньо знижені.

Використання та налаштування функцій та інтерфейсів, пов'язаних з безпекою, повинні виконуватися відповідно до оцінки ризиків, яку збирач системи виконує для певного додатка робота.

У разі виявлення роботом несправності або порушення в системі безпеки, наприклад, унаслідок обриву одного з дротів у ланцюзі аварійної зупинки, несправності датчика положення або порушення межі пов'язаної з безпекою функції, відбувається зупинка категорії 0. Найгірше значення часу від виявлення помилки до зупинки робота наведено наприкінці цього розділу. Цей час слід узяти до уваги в рамках оцінки ризику, яку виконує складальник системи.

Робот забезпечений низкою функцій безпеки, які можуть використовуватися для обмеження руху його зчленувань і Центральної точки інструменту (ЦТІ). ЦТІ являє собою центральну точку фланця приєднання з додаванням зміщення ЦТІ.

Час зупинки системи безпеки являє собою час від виникнення збою або порушення функції, пов'язаної з безпекою, до моменту, коли робот переходить до повної зупинки і задіюються механічні гальма. Вимірювання виконуються за такої конфігурації робота:

- Висування: 100% (маніпулятор робота повністю висунутий у горизонтальній площині).
- Швидкість: Обмеження швидкості ЦТІ системи безпеки встановлюється на описане обмеження.
- Корисне навантаження: максимальне дозволене корисне навантаження для робота, прикладене до ЦТІ (8 та 16 кг).

Найгірше значення часу для зупинки категорії 0 у разі порушення обмежень безпеки або інтерфейсів наведено в такій таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Швидкість зупинки робота при спрацюванні датчиків захисту

Межа швидкості ЦТІ, м/сек	Максимальний час зупинки, мс
1.0 m/s	450
1.5 m/s	500
2.0 m/s	550
1.5 m/s	600
3.0 m/s	650

У разі наближення маніпулятора робота до межі безпеки розширене програмне забезпечення управління шляхом знизить його швидкість або запустить програму зупинки. Отже, порушення меж відбудеться тільки у виняткових випадках. Але в разі порушення межі система безпеки виконає зупинку категорії 0.

В середньому час визначення загрози датчиками робота складають 100-250 мс, а час реакції та зупинки 1100-1250мс.

#### 4.2 Безпека у надзвичайних умовах

Забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях під час використання зварювальних роботів є критично важливим для захисту працівників, обладнання та об'єкта. Надзвичайні ситуації можуть включати перебої в

електропостачанні, механічні несправності або інші несподівані події. Нижче наведені ключові заходи безпеки та протоколи, які слід впровадити:

### 1. Перебої в електропостачанні (блекаути)

Встановлення UPS. Використання джерела безперебійного живлення для забезпечення резервного живлення контролера робота та основних систем під час блекауту. Це дозволяє здійснити безпечне вимкнення.

Аварійне відключення живлення (EPO). Необхідно переконатись, що робот має кнопку аварійного відключення живлення, яка негайно відключає живлення робота у разі надзвичайних ситуацій.

Контрольоване вимкнення. Впровадження процедур для контрольованого вимкнення зварювального робота під час перебоїв у електропостачанні. Це мінімізує ризик пошкодження робота та оброблюваної деталі.

Резервне копіювання даних. Регулярне резервне копіювання робочих даних та програм робота для запобігання втраті даних під час перебоїв у електропостачанні.

Процедури відновлення живлення.

Протоколи перезапуску. Встановлення протоколів для безпечного перезапуску робота після відновлення електропостачання, включаючи перевірку систем та калібрування.

-Навчання операторів. Навчання операторів тому, як діяти під час перебоїв у електропостачанні та правильним процедурам при відновленні живлення.

### 2. Механічні несправності

Профілактичне обслуговування. Планування регулярного обслуговування для інспекції та сервісу механічних компонентів робота з метою запобігання несподіваним несправностям.

Заміна компонентів. Своєчасна заміна зношених або пошкоджених частин.

Розташування кнопок аварійної зупинки. Забезпечення легкого доступу до кнопок аварійної зупинки навколо робочої зони робота. Ці кнопки повинні негайно зупинити всі рухи робота.

### 3. Пожежна безпека та небезпечні випари

Вогнегасники. Оснащення території відповідними вогнегасниками та забезпечення їх легкого доступу.

Системи пожежогасіння. Розгляд можливості встановлення автоматичних систем пожежогасіння, особливо в зонах, де виконується зварювання.

Пожежні тренування. Проведення регулярних пожежних тренувань для забезпечення того, щоб всі працівники знали, як безпечно евакуюватися.

Витяжка випарів. Встановлення ефективних систем витяжки випарів та вентиляції для видалення небезпечних випарів та газів, що утворюються під час зварювання.

Моніторинг. Використання сенсорів для моніторингу якості повітря та виявлення небезпечних рівнів випарів.

### 4. Протоколи безпеки та навчання

Плани безпеки. Розробка та впровадження комплексних планів безпеки, які включають процедури для різних надзвичайних ситуацій.

Знаки безпеки. Розміщення чітких знаків, що вказують на аварійні виходи, кнопки аварійної зупинки та інше обладнання безпеки.

### 5. Резервні та захисні системи

Резервні системи. Впровадження резервних систем для критичних функцій робота, щоб забезпечити безперебійну роботу під час незначних несправностей.

Контролери безпеки. Використання контролерів безпеки, які можуть керувати надзвичайними ситуаціями та забезпечувати безпечну роботу робота.

Системи міжблокування. Встановлення систем міжблокування на дверях, захисних огорожах та інших захисних бар'єрах для запобігання доступу до робочої зони робота під час його роботи.

Механізми захисту від відмов. Проектування системи з механізмами захисту від відмов, які переходять у безпечний стан у разі несправності.

#### 6. Комунікація та моніторинг

Системи тривоги. Встановлення систем тривоги для сповіщення персоналу про надзвичайні ситуації, такі як перебої в електропостачанні, пожежі або механічні несправності.

Протоколи комунікації. Встановлення чітких протоколів комунікації для повідомлення та реагування на надзвичайні ситуації.

Моніторинг у реальному часі. Використання систем моніторингу в реальному часі для відстеження продуктивності робота та раннього виявлення аномалій.

Віддалений моніторинг. Впровадження можливостей віддаленого моніторингу, щоб дозволити керівникам контролювати операції та швидко реагувати на надзвичайні ситуації.

Забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях під час використання зварювальних роботів вимагає комплексного підходу, що включає належне обладнання, регулярне обслуговування, ефективні протоколи безпеки, всебічне навчання операторів та постійний моніторинг. Впровадження цих заходів дозволяє захистити працівників, зберегти обладнання та підтримувати безпечне робоче середовище навіть під час несподіваних подій, таких як перебої в електропостачанні або механічні несправності.



## РОЗДІЛ 5

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОБОТІВ ДЛЯ  
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Для використання робота UR-10e визначали похідні умови.

Швидкість, з якою робот виконує перевірку, у одиницях за хвилину (мм/хв) приймаємо рівною  $S = 100$  мм/хв).

Середня довжина траєкторії перевірки  $L = 100$  мм.

Кількість окремих зон перевірок  $N = 6$  траєкторій.

Час, необхідний для налаштування робота для неруйнівного контролю приймаємо  $T_{\text{нал}} = 7$  хв, хоча він буде суттєво залежати від особливостей рамної конструкції, зварювального матеріалу, режимів обробки.

Час, необхідний для позиціонування робота для зварювання окремої траєкторії приймаємо рівним  $T_{\text{поз}} = 10$  с.

Час, необхідний для остаточних налаштувань після перевірки  $T_{\text{ост.нал}} = 2$  хв.

Розрахуємо час перевірки для кожної траєкторії ( $T_{\text{звар.}}$ ):

$$T_{\text{ндт}} = \frac{L}{S}, \quad (1)$$

де

$L$  - довжина зони перевірки, мм.

$S$  - швидкість перевірки, мм/хв.

Для корпусної деталі:

$$T_{\text{ндт}} = \frac{L}{S} = \frac{100}{200} = 0,5 \text{ хв.}, \quad (2)$$

Розрахуємо загальний час перевірки ( $T_{\text{заг.ндт.}}$ ):

$$T_{\text{заг.ндт*963}} = T_{\text{звар}} \times N, \quad (3)$$

де  $N$  – кількість зон перевірки, шт.

$$T_{\text{заг.зон.}} = \frac{0,5\text{хв}}{\text{траекторій}} \times 10 = 5\text{хв.}, \quad (4)$$

Розрахуємо загальний час позиціонування ( $T_{\text{поз}}$ ):

$$T_{\text{поз.}} = T_p \times N, \quad (4)$$

де  $T_p$  - час позиціонування на траекторію у хвилинах.

Конвертуємо час позиціонування у хвилини:

$$T_p = \frac{10 \text{ сек}}{60} = 0,1667\text{хв}, \quad (5)$$

Для нашого прикладу:

$$T_{\text{заг.поз.}} = 0,1667 \text{ хв.} \frac{\text{траекторію}}{\text{траекторію}} \times 10 = 1,667\text{хв.}, \quad (6)$$

Виконаємо розрахунок загального часу ( $T_{\text{total}}$ ):

$$T_{\text{заг}} = T_{\text{нал}} + T_{\text{заг.ндт.}} + T_{\text{заг.поз.}} + T_{\text{ост.нал.}}, \quad (7)$$

$$T_{\text{заг}} = 5\text{хв.} + 5\text{хв.} + 1,667\text{хв.} + 2\text{хв.} = 13,667\text{хв}, \quad (8)$$

Таким чином загальний час, необхідний для перевірки корпусу, включаючи налаштування, процес перевірки позиціонування та остаточні налаштування, становить приблизно 14 хвилин. Цей розрахунок допомагає

стандартизувати час перевірки для планування та розкладу у виробничих умовах.

Як показує практичний досвід використання роботів такий час приблизно в 5 разів менший, ніж при використанні для контролю людини.

Впровадження робота у виробництво може значно вплинути на різні аспекти виробництва, включаючи продуктивність, вартість, якість та ефективність. Для кількісної оцінки цих ефектів використаємо формули та метрики.

**Підвищення продуктивності.** Продуктивність можна виміряти у вигляді випуску продукції за одиницю часу. Впровадження робота дозволяє розрахувати підвищення продуктивності за наступною формулою:

$$P_{\text{прод.}} = \left( \frac{P_{\text{роб.}} - P_{\text{ручн.}}}{P_{\text{ручн.}}} \right) \times 100, \quad (9)$$

де  $P_{\text{роб.}}$  – випуск продукції (корпусів) з використанням контролю роботом (одиниць/день);  $P_{\text{ручн.}}$  - випуск продукції (корпусів) при ручному використанні НДТ без використання робота (одиниць/день).

**Економія витрат.** Економію витрат можна розрахувати, порівнюючи загальні витрати до і після впровадження робота.

$$E_{\text{витр.}} = (E_{\text{труд.витр.}} + E_{\text{зменш.деф.}} + E_{\text{мат.}}) - V_{\text{варт.робота}}, \quad (10)$$

де  $E_{\text{труд.витр.}}$  - економія на трудових витратах (зменшення витрат на робочу силу завдяки автоматизації);  $E_{\text{зменш.деф.}}$  - економія від зменшення дефектів (економія завдяки зменшенню дефектів і повторної обробки);  $E_{\text{мат.}}$  – економія матеріалів (економія завдяки більш ефективному використанню матеріалів);  $V_{\text{варт.робота}}$  - вартість робота (початкові інвестиції та витрати на обслуговування робота).

**Рентабельність інвестицій (ROI).** ROI є ключовим показником для оцінки фінансової вигоди від впровадження зварювального робота.

$$ROI = \left( \frac{E_{\text{чист.економ.}}}{I_{\text{заг.інвест.}}} \right) \times 100, \quad (11)$$

де  $E_{\text{чист.економ.}}$  – чиста економія (загальна економія від підвищення продуктивності та зниження витрат);  $I_{\text{заг.інвест.}}$  – загальні інвестиції (початкова вартість робота та будь-які додаткові витрати на впровадження).

**Зменшення циклу часу.** Цикл часу – це загальний час, необхідний для завершення одного циклу неруйнівного контролю. Впровадження робота може значно зменшити цикл часу.

$$T_{\text{цикл}} = \left( \frac{T_{\text{цикл.ручн}} - T_{\text{цикл.роб}}}{T_{\text{цикл.ручн}}} \right) \times 100, \quad (12)$$

де  $T_{\text{цикл.ручн}}$  – тривалість циклу часу без впровадження робота;  $T_{\text{цикл.роб}}$  – тривалість циклу часу з впровадженням промислового робота для неруйнівного контролю;

**Поліпшення якості.** Поліпшення якості можна виміряти шляхом зниження рівня дефектів.

$$Q = \left( \frac{Q_{\text{рів.деф.ручн}} - Q_{\text{рів.деф.робот}}}{Q_{\text{рів.деф.ручн}}} \right) \times 100, \quad (13)$$

де  $Q_{\text{рів.деф.ручн}}$  – рівень дефектів без робота, %;  $Q_{\text{рів.деф.робот}}$  – рівень дефектів з роботом, %

**Загальна ефективність обладнання (OEE).** OEE – це міра того, наскільки ефективно використовується виробнича операція. Вона враховує доступність, продуктивність та якість.

$$OEE = (D_{\text{доступність}} + Pr_{\text{продуктивність}} + Q_{\text{якість}}), \quad (10)$$

де  $D_{\text{доступність}}$  – доступність (частка запланованого часу, протягом якого обладнання доступне для роботи);  $Pr_{\text{продуктивність}}$  - продуктивність (наскільки добре обладнання працює у порівнянні з його максимальною потужністю);  $Q_{\text{якість}}$  - якість (частка якісних одиниць продукції у порівнянні з загальною кількістю виробленої продукції).

Розрахуємо ефективність впровадження промислового робота UR-10 для перевірки корпусної деталі.

Випуск без робота: 100 одиниць/день

Випуск з роботом: 150 одиниць/день

Економія на трудових витратах: 50000/місяць

Економія від зменшення дефектів: 20000/місяць

Економія матеріалів: 10000/місяць

Вартість робота бувшого у використанні: 400,000 (початкові інвестиції) + 40000/рік (обслуговування)

Цикл часу без робота: 10 хвилин/одиниця

Цикл часу з роботом: 5 хвилин/одиниця

Рівень дефектів без робота: 5%

Рівень дефектів з роботом: 2%

Для розрахунку OEE

Доступність: 90%

Продуктивність: 85%

Якість: 98%

**Підвищення продуктивності:**

$$P_{\text{прод.}} = \left( \frac{150-100}{100} \right) \times 100 = 50\% \quad (9)$$

**Економія витрат:**

$$E_{\text{витр.}} = (50000 + 20000 + 10000) - \left( \frac{400000}{12} + \frac{40000}{12} \right) = 80000 - 18340 = 43334 \text{ грн на місяць.}$$

**Рентабельність інвестицій (ROI).**

$$ROI = \left( \frac{(50000+20000+10000) \times 12 - 200000 - 20000}{100000 + 10000} \right) \times 100 = 236\% \quad (11)$$

**Зменшення циклу часу.**

$$T_{\text{цикл}} = \left( \frac{10-5}{10} \right) \times 100 = 50\%, \quad (12)$$

**Поліпшення якості.**

$$Q = \left( \frac{5-2}{5} \right) \times 100 = 60\%, \quad (13)$$

**Загальна ефективність обладнання (OEE).**

$$OEE = (0,90 \times 0,85 \times 0,98) = 74,9\% \quad (14)$$

Таким чином виконано розрахунок економічної ефективності використання промислового робота для неруйнівного контролю.

## ВИСНОВКИ

1. Запропоновано спосіб автоматизації операцій неруйнівного контролю з використанням робота маніпулятора. В якості засобу неруйнівного контролю використали метрологічний оптичний сканер КВМ MetraSCAN 3D-R який був поєднаний для сканування роботом маніпулятором Universal Robots UR10e.

2. Виконали оффлайн програмування робота для сканування на наявність дефектів корпусної деталі, поновленої методом адитивного виробництва.

Виконаний розрахунок ефективності від впровадження промислового робота UR-10 для неруйнівного контролю дозволив встановити наступне. Ефективність від впровадження дозволяє досягти зменшення циклу часу на перевірку одного виробу на 50% при підвищенні якості на 60%. Продуктивність виробництва підвищується на 50%, а економія складає 43 тис.грн. на місяць на одному пості неруйнівного контролю. В той же час загальна ефективність використання обладнання складає 74,9%, що вказує на можливість суттєвої оптимізації за рахунок зменшення простоїв обладнання та підвищення його продуктивності. Показник рентабельності інвестицій демонструє високу самоокупність інвестицій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цмоць І. Г. Вдосконалення системи управління мобільною робототехнічною системою / І. Г. Цмоць, Р. О. Ткаченко, І. Є. Ваврук // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. - 2013. - Вип. 67. - С. 158-162
2. Пукач А. І. Розроблення моделі на основі мереж Петрі для системи проектування мобільних робототехнічних систем / А. І. Пукач, В. М. Теслюк // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. - 2013. - Вип. 69. - С. 101-108.
3. Leung CLA, Marussi S, Atwood RC, et al. In situ X-ray imaging of defect and molten pool dynamics in laser additive manufacturing. *Nat Commun.* 2018;9(1):1355. doi: 10.1038/s41467-018-03734-7.
4. Chen Y, Peng X, Kong L, et al. Defect inspection technologies for additive manufacturing. *Int J Extreme Manuf.* 2021;3(2):022002. doi: 10.1088/2631-7990/abe0d0.
5. Koester L, Taheri H, Bigelow T, et al. Nondestructive testing for metal parts fabricated using powder based additive manufacturing. *Mater Eval.* 2018;76:514–524.
6. Everton S, Dickens P, Tuck C, et al. Using laser ultrasound to detect subsurface defects in metal laser powder bed fusion components. *Jom.* 2018;70:378–383. doi: 10.1007/s11837-017-2661-7.
7. Liu ZZ, Han QQ, Zhang ZH, et al. Design of a novel crack-free precipitation-strengthened nickel-based superalloy and composites for laser powder bed fusion. *Virtual Phys Prototyp.* 2023;18(1):2224769. doi: 10.1080/17452759.2023.2224769.
8. Yu W, Xiao Z, Zhang X, et al. Processing and characterization of crack-free 7075 aluminum alloys with elemental Zr modification by laser powder bed fusion. *Mater Sci Addit Manuf.* 2022;1(1):4. doi: 10.18063/msam.v1i1.4.



9. Chauveau D. Review of NDT and process monitoring techniques usable to produce high-quality parts by welding or additive manufacturing. *Weld World*. 2018;62:1097–1118. doi: 10.1007/s40194-018-0609-3.
10. Chua ZY, Ahn IH, Moon SK. Process monitoring and inspection systems in metal additive manufacturing: status and applications. *Int J Precis Eng Manuf Green Technol*. 2017;4:235–245. doi: 10.1007/s40684-017-0029-7.
11. Everton SK, Hirsch M, Stravroulakis P, et al. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials*. 2016;95:431–445.
12. Taheri H, Shoaib MRM, Koester LW, et al. Powder-based additive manufacturing-a review of types of defects, generation mechanisms, detection, property evaluation and metrology. *Int J Addit Subtract Mater Manuf*. 2017;1(2):172–209.
13. Mandache C. Overview of non-destructive evaluation techniques for metal-based additive manufacturing. *Mater Sci Technol*. 2019;35(9):1007–1015. doi: 10.1080/02670836.2019.1596370.
14. Sreeraj PR, Mishra SK, Singh PK, et al. A review on non-destructive evaluation and characterization of additively manufactured components. *Prog Addit Manuf*. 2022;7:225–248. doi: 10.1007/s40964-021-00227-w.
15. Ramírez IS, Márquez FPG, Papaelias M. Review on additive manufacturing and non-destructive testing. *J Manuf Syst*. 2023;66:260–286. doi: 10.1016/j.jmsy.2022.12.005.
16. Chen X, Kong F, Fu Y, et al. A review on wire-arc additive manufacturing: typical defects, detection approaches, and multisensor data fusion-based model. *Int J Adv Manuf Technol*. 2021;117:707–727. doi: 10.1007/s00170-021-07807-8.
17. Serrati DSM, Machado MA, Oliveira JP, et al. Non-destructive testing inspection for metal components produced using wire and arc additive manufacturing. *Metals*. 2023;13(4):648. doi: 10.3390/met13040648.

18. Shaloo M, Schnall M, Klein T, et al. A review of non-destructive testing (NDT) techniques for defect detection: application to fusion welding and future wire arc additive manufacturing processes. *Materials*. 2022;15(10):3697. doi: 10.3390/ma15103697.
19. Du Pleaais A, Yadroitsev I, Yadroitsava I, et al. X-ray microcomputed tomography in additive manufacturing: a review of the current technology and applications. *3D Print Addit Manuf*. 2018;5(3):227–247. doi: 10.1089/3dp.2018.0060.
20. Li ZR, Wu DL, Zhou JF, et al. Advances in online detection technology for laser additive manufacturing: a review. *3D Print Addit Manuf*. 2023;10(3):467–489. doi: 10.1089/3dp.2021.0049.
21. Honarvar F, Varvani-Farahani A. A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultrasonics*. 2020;108:106227. doi: 10.1016/j.ultras.2020.106227.
22. Lu QY, Wong CH. Additive manufacturing process monitoring and control by non-destructive testing techniques: challenges and in-process monitoring. *Virtual Phys Prototyp*. 2018;13(2):39–48. doi: 10.1080/17452759.2017.1351201.
23. ISO/ASTM 52900:2021. Standard terminology for additive manufacturing -- general principles -- terminology. West Conshohocken (PA, USA): ASTM International; 2021.
24. Bankong B, Abioye T, Olugbade T, et al. Review of post-processing methods for high-quality wire arc additive manufacturing. *J Appl Psychol*. 2023;39(2):129–146.
25. Gong X, Zeng D, Groeneveld-Meijer W, et al. Additive manufacturing: a machine learning model of process-structure-property linkages for machining behavior of Ti–6Al–4V. *Mater Sci Add Manuf*. 2022;1(6):1–16.
26. Savinov R, Shi J. Microstructure, mechanical properties, and corrosion performance of additively manufactured CoCrFeMnNi high-entropy

alloy before and after heat treatment. *Mater Sci Addit Manuf.* 2023;2(1):42. doi: 10.36922/msam.42.

27. Sing SL, Huang S, Yeong WY. Effect of solution heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion produced cobalt-28chromium-6molybdenum. *Mater Sci Eng A.* 2020;769:138511. doi: 10.1016/j.msea.2019.138511.

28. Xue P, Zhu L, Xu P, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of in-situ synthesized Ni<sub>2</sub>CrCoNb<sub>0.16</sub> multi-principal element alloy manufactured by directed energy deposition. *Mater Sci Eng A.* 2023;862:144398. doi: 10.1016/j.msea.2022.144398.

29. Chen H, Meng X, Chen J, et al. Wire-based friction stir additive manufacturing. *Addit Manuf.* 2023;70:103557.

30. Kumar S, Kar A. A review of solid-state additive manufacturing processes. *Trans Indian Natl Acad Eng.* 2021;6(4):955–973. doi: 10.1007/s41403-021-00270-7.

31. Li W, Yang K, Yin S, et al. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: a review. *J Mater Sci Technol.* 2018;34(3):440–457. doi: 10.1016/j.jmst.2017.09.015.

32. Liu M, Kumar A, Bukkapatnam S, et al. A review of the anomalies in directed energy deposition (DED) processes & potential solutions-part quality & defects. *Procedia Manuf.* 2021;53:507–518. doi: 10.1016/j.promfg.2021.06.093.

33. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Compos Part B Eng.* 2018;143:172–196. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

34. Svetlizky D, Zheng B, Vyatskikh A, et al. Laser-based directed energy deposition (DED-LB) of advanced materials. *Mater Sci Eng A.* 2022;840:142967. doi: 10.1016/j.msea.2022.142967.

35. Tuncer N, Bose A. Solid-state metal additive manufacturing: a review. *Jom*. 2020;72(9):3090–3111. doi: 10.1007/s11837-020-04260-y.
36. Xie R, Shi Y, Liu H, et al. A novel friction and rolling based solid-state additive manufacturing method: microstructure and mechanical properties evaluation. *Mater Today Commun*. 2021;29:103005. doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.103005.