

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

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «ОБґРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ  
ПО ВИГОТОВЛЕННЮ ДОВГОМІРНИХ ДЕТАЛЕЙ»

Виконав: студент VI курсу групи Маш-

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»  
(шифр і назва)

Ігор МОЗІЛЬ  
(Прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ  
(Прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2025

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

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.  
«28» лютого 2025 року

**ЗАВДАННЯ**  
на кваліфікаційну роботу студенту

МОЗІЛЬ Ігор Богданович

1. Тема роботи: «Обґрунтування параметрів роботи технологічної лінії по виготовленню довгомірних деталей»

Керівник роботи: Власовець Віталій Михайлович, д.т.н., професор  
Затверджена наказом по університету №140/К-с від 28.02.2025

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 1.12.2025 року

3. Вихідні дані до робіт: довідкова література, каталоги, методики використання технологій зварювання, вимоги до зварних з'єднань, інструкції з охорони праці.

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

4.1. Огляд інформаційних джерел

4.2. Основний розділ досліджень

4.3. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

4.4. Визначення ефективності використання робіт

Висновки і пропозиції

5. Перелік графічного ілюстраційного матеріалу:

Графічна частина до кваліфікаційної роботи оформляється у вигляді презентації.

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ     | Прізвище, ініціали та посада консультанта                                                   | Підпис, дата   |                  | Відмітка про виконання |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------|------------------------|
|            |                                                                                             | завдання видав | завдання прийняв |                        |
| 1, 2, 3, 4 | Власовець В.М., д.т.н., завідувач кафедри машинобудування                                   |                |                  |                        |
| 5          | Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва |                |                  |                        |

7. Дата видачі завдання «28» лютого 2025 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи               | Строк виконання етапів роботи | Відмітка про виконання |
|-------|---------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 1     | Вступ                                             | 28.02.25-25.04.25             | Виконано               |
| 2     | Огляд інформаційних джерел                        | 28.04.25-27.06.25             | Виконано               |
| 3     | Основний розділ досліджень                        | 30.06.25-29.08.25             | Виконано               |
| 4     | Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | 01.09.25-26.09.25             | Виконано               |
| 5     | Визначення ефективності використання робіт        | 29.09.25-31.10.25             | Виконано               |
| 6     | Оформлення пояснювальної записки                  | 03.11.24-14.11.25             | Виконано               |
| 7     | Оформлення графічної частини                      | 17.11.25-28.11.25             | Виконано               |

Студент \_\_\_\_\_ Ігор МОЗІЛЬ  
(підпис)

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

УДК 621.791.019:620.179:621.867

Обґрунтування параметрів роботи технологічної лінії по виготовленню довгомірних деталей. Мозіль Ігор Богданович. Кафедра машинобудування. Дубляни, Львівський НУВМБТ. 2025.

91 с. текст. част., 18 рис., 72 літературних джерел.

У кваліфікаційній роботі виконано системний огляд наукових джерел та нормативних документів щодо роботизованих технологічних ліній MIG/MAG зварювання. Проаналізовано особливості зварювання довгомірних деталей, механізми утворення основних дефектів і їх вплив на деформації та ресурс конструкцій з урахуванням вимог ISO 6520-1, ISO 5817 та суміжних стандартів.

Розвинуто підхід до аналізу сингулярності шестиосьових зварювальних робіт при виготовленні довгомірних деталей. Побудовано та верифіковано в Abaqus моделі з використанням техніки birth and death для оцінки тепловкладення, полів температур і потенційних зон дефектів. На цій основі сформовано практичні рекомендації щодо траєкторного планування, вибору конфігурацій робота і режимів MIG/MAG.

Розроблено комплекс організаційно-технічних заходів з охорони праці та безпеки роботизованого зварювання, включно із контролем зварювальних аерозолів, фізичних факторів і взаємодії людини з роботом. Проаналізовано роль міжнародних стандартів машинобезпеки, систем менеджменту та зварювальних стандартів для забезпечення безпеки персоналу й стійкості роботизованих зварювальних ліній у надзвичайних ситуаціях.

## ЗМІСТ

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП                                                                                                 | 6  |
| 1 ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ                                                   | 9  |
| 1.1. Загальний огляд технологічних ліній роботизованого зварювання                                    | 9  |
| 1.2. Особливості технології зварювання довгомірних деталей                                            | 16 |
| 1.3. Основні дефекти зварних з'єднань при зварюванні довгомірних деталей                              | 23 |
| 2 ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ                                                                          | 32 |
| 2.1 Проблема сингулярності при використанні зварювальних роботів для виготовлення довгомірних деталей | 32 |
| 2.2. Моделювання тепловкладення при роботизованому MIG/MAG зварюванні в середовищі Abaqus             | 44 |
| 2.3. Практичні рекомендації по усуненню ризику виникнення сингулярності при роботизованому зварюванні | 59 |
| 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ                                                   | 66 |
| 3.1. Охорона праці при використанні роботизованого зварювального обладнання                           | 66 |
| 3.2 Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому зварюванні                                       | 73 |
| ВИСНОВКИ                                                                                              | 80 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                                            | 75 |

## ВСТУП

Розвиток сучасного машинобудування супроводжується переходом до високопродуктивних, гнучких та енергоефективних виробничих систем, здатних забезпечити стабільну якість продукції в умовах зростання вимог до безпеки, надійності та екологічності. Особливе місце у такій трансформації посідають роботизовані комплекси дугового зварювання, які дозволяють автоматизувати операції, що традиційно належали до найбільш трудомістких, небезпечних та відповідальних. Для значної частини машинобудівної номенклатури характерною є наявність довгомірних елементів рам, балок, корпусів, трубопровідних та агрегатних вузлів, ресурс яких визначається якістю та довговічністю зварних з'єднань.

Процеси MIG/MAG, а особливо їхні високотехнологічні модифікації на кшталт СМТ, створюють можливість керованого тепловкладення, підвищення швидкості зварювання та зниження деформацій. Перехід від ручного дугового зварювання до роботизованих ліній забезпечує кратне зростання частки ефективного часу горіння дуги, скорочення допоміжних операцій, зменшення рівня браку та обсягу післяопераційної механічної обробки. Водночас із підвищенням ступеня автоматизації змінюється характер дефектності: випадкова складова, пов'язана з людським фактором, зменшується, проте зростає роль систематичних похибок програмування, кінематики та організації технологічного процесу.

Для довгих швів критичного значення набуває проблема сингулярності шестиосьових зварювальних роботів. Наближення до сингулярних конфігурацій призводить до різких змін фактичної швидкості та орієнтації пальника, що безпосередньо впливає на форму шва, локальне тепловкладення та повторювані зони концентрованих дефектів. Такі дефекти, класифіковані міжнародними стандартами, істотно знижують втомну міцність і ресурс зварних конструкцій. Для їхнього попередження необхідне цілісне поєднання раціонального траєкторного

планування, оптимізації конфігурацій робота і позиціонерів, вибору режимів MIG/MAG та запровадження систем онлайн моніторингу.

Сучасні програмні засоби скінченно-елементного аналізу, зокрема Abaqus, відкривають можливості моделювання тепловкладення та температурних полів у процесі роботизованого зварювання. Використання техніки сегментованої активації елементів дозволяє наближено відтворити реальну послідовність формування шва та оцінити вплив кінематичних особливостей траєкторії на розподіл температур і залишкових напружень. У поєднанні з вимогами міжнародних стандартів щодо безпеки машин, промислових роботів, зварювальних процесів та якості швів таке моделювання формує наукове підґрунтя для розроблення нових інженерних рішень.

У цьому контексті дослідження, спрямовані на комплексний аналіз тепловкладення, сингулярності роботів, дефектності та безпеки при роботизованому MIG/MAG і СМТ зварюванні довгомірних деталей, є актуальними як з точки зору підвищення технічного рівня виробництва, так і в контексті реалізації концепцій стійкого розвитку та промислової безпеки. Результати роботи мають практичне значення для проектування та модернізації роботизованих зварювальних ліній, орієнтованих на довготривалий ресурс і високу експлуатаційну надійність конструкцій.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні та розробленні науково-технічних підходів до підвищення якості, довговічності й безпеки роботизованого MIG/MAG зварювання довгомірних деталей з урахуванням тепловкладення, сингулярності руху роботів та вимог міжнародних стандартів.

Для досягнення мети необхідно:

1. Проаналізувати експериментально та чисельно вплив режимів MIG/MAG і СМТ та кінематики роботів на деформації, дефектність і ресурс довгомірних з'єднань;
2. Розробити і верифікувати в Abaqus моделі тепловкладення та сингулярних конфігурацій;

3. Сформувати практичні рекомендації щодо технологічних режимів, траєкторного планування, виробничої безпеки й онлайн контролю якості.

Об'єктом дослідження є роботизовані технологічні лінії MIG/MAG та CMT зварювання довгомірних металевих деталей і вузлів, що працюють в умовах змінних навантажень, деформацій і зовнішніх виробничих впливів.

Предметом дослідження є закономірності формування напружено-деформованого стану, дефектності та довговічності зварних з'єднань довгомірних деталей при роботизованому MIG/MAG і CMT зварюванні з урахуванням тепловкладення та сингулярності роботів.

Наукова новизна полягає у комплексному поєднанні фізичного експерименту, числового моделювання тепловкладення в Abaqus із застосуванням техніки birth and death та аналізу сингулярностей шестиосьових роботів для довгомірних швів, що дозволило встановити кількісні критерії впливу конфігурації робота й режимів MIG/MAG/CMT на деформації, дефектність і ресурс зварних з'єднань, а також розробити нові рекомендації з їх мінімізації.

## РОЗДІЛ I. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1. Загальний огляд технологічних ліній роботизованого зварювання

Технологічні лінії роботизованого зварювання довгомірних виробів формують сучасний рівень конкурентоспроможності машинобудівних підприємств, оскільки саме на цих операціях зосереджена значна частка трудомісткості, енерговитрат та ризиків виникнення прихованих дефектів. Для зварювання балок, рам, трубчастих елементів, корпусів та інших протяжних конструкцій у промисловості переважають процеси дугового зварювання плавким електродом у захисних газах, насамперед MIG/MAG (Gas Metal Arc Welding, GMAW), які легко механізуються та роботизуються [1; 2]. Ручне дугове зварювання покритими електродами використовується здебільшого для ремонтних або малосерійних операцій, однак за великої довжини швів воно поступається роботизованим рішенням за продуктивністю, стабільністю якості та відтворюваністю геометрії шва [2]. Тому саме порівняння роботизованих MIG/MAG ліній із традиційними ручними технологіями є ключовим для обґрунтування доцільності впровадження автоматизації на ділянках зварювання довгомірних виробів.

Типова технологічна лінія роботизованого зварювання довгомірних виробів включає промислового робота з шести або більшою кількістю ступенів вільності, позиціонери або роликові обертачі для маніпулювання деталлю, лінійні осі або порталні системи для збільшення робочої зони, джерело живлення MIG/MAG типу інверторного випрямляча, подаючий механізм дроту, блок подачі захисного газу, систему контролю траєкторії (датчики зору, seam tracking) та центральний контролер [2; 6]. У випадку довгих поздовжніх швів, наприклад при зварюванні балок або рам, найбільш доцільними є конфігурації з порталним роботом або

роботом на лінійній осі та синхронізованим обертанням або поступальним переміщенням виробу. Така побудова дозволяє забезпечити сталу швидкість зварювання вздовж усієї довжини шва, мінімізувати кількість зупинок для перепозиціонування та звести до мінімуму вплив людського фактора на повторюваність параметрів процесу [6; 7].

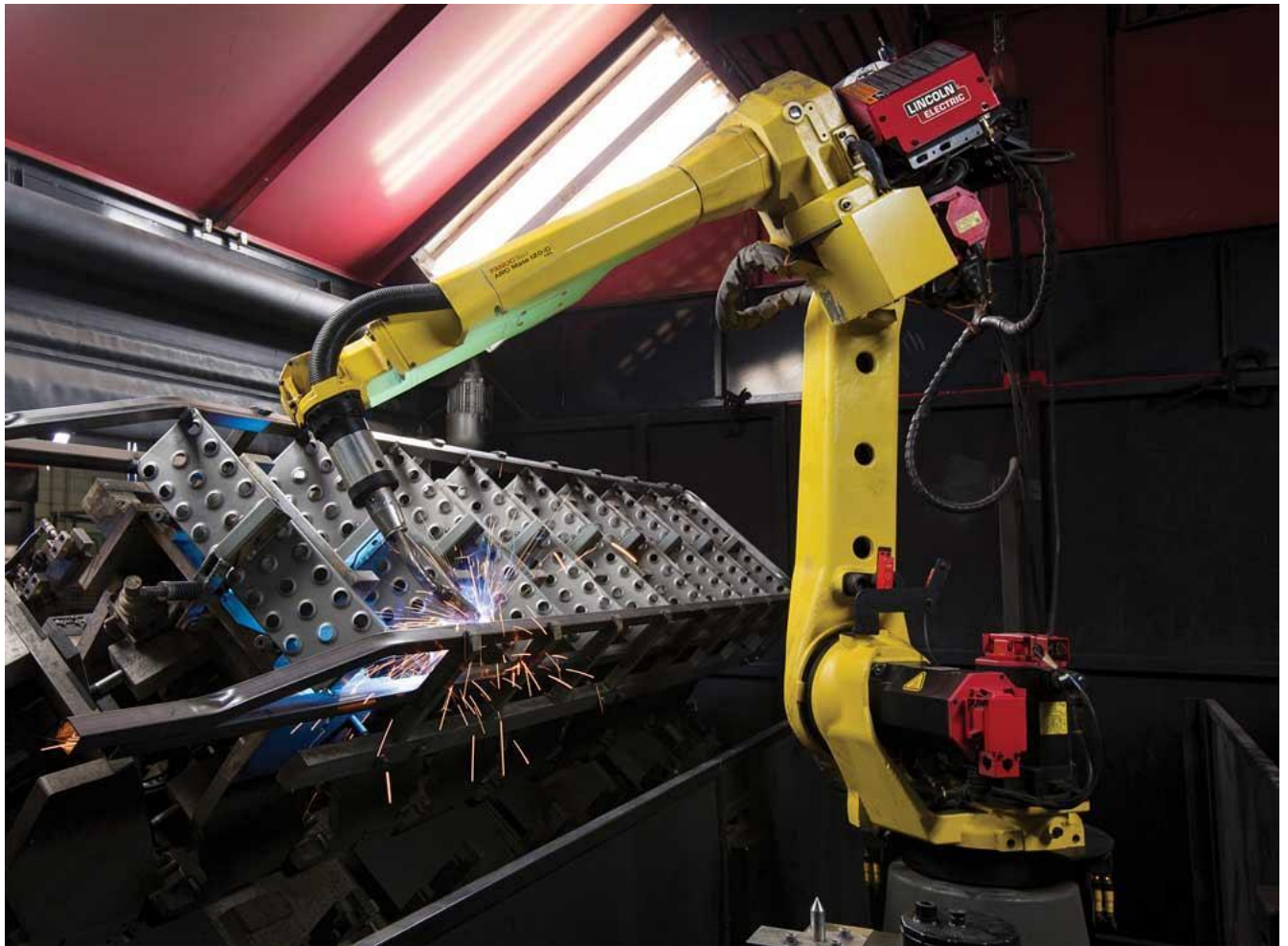


Рисунок 1.1 Роботизоване зварювання з використанням обертача

Процес роботизованого MIG/MAG зварювання базується на формуванні стійкої електричної дуги між неперервно поданим дротом електрода та основним металом у середовищі активних або змішаних газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{O}_2$  тощо) [1; 2]. На відміну від ручного зварювання покритими електродами, де довжина дуги, вильот електрода та положення пальника безперервно змінюються оператором, у роботизованому процесі всі кінематичні та електричні параметри задаються й

відтворюються автоматично. Стабільність швидкості подачі дроту, швидкості зварювання, вильоту електрода, витрати захисного газу та напруги дуги забезпечується замкненими контурами керування джерела живлення та системи приводу [1, 2]. Завдяки цьому досягається стабільний режим перенесення металу (коротке замикання, імпульсний, струменевий перенос), що визначає форму та глибину проплавлення, рівень розбризкування, геометрію валика та пористість шва [2, 5]. У зварювальних лініях для довгомірних виробів особливо важлива стабільність геометрії шва на всій довжині, що у ручному процесі значною мірою залежить від втоми зварника, тоді як роботизований процес зберігає сталі параметри протягом усього циклу.

Особливе місце серед роботизованих варіантів GMAW посідає процес СМТ (Cold Metal Transfer), який реалізує низькоенергетичний режим перенесення металу з контрольованим коротким замиканням і зворотно-поступальним рухом дроту [3–5]. Суть СМТ полягає в тому, що джерело живлення та привід подачі дроту синхронізовано керують струмом і відкатом дроту під час кожного циклу короткого замикання. У момент відриву краплини струм суттєво зменшується, що різко знижує миттєве тепловкладення. Це забезпечує меншу ширину зони термічного впливу, зменшення розбризкування та кращу формоутворюваність шва на тонких і середніх товщинах [3, 4]. Експериментальні дослідження показують, що порівняно з традиційним МАГ процесом СМТ забезпечує більш дрібнозернисту структуру металу шва, меншу схильність до гарячих тріщин та поліпшення ударної в'язкості при еквівалентній або вищій міцності [3, 4]. Для довгомірних виробів це означає можливість підвищення швидкості зварювання без погіршення якості та зменшення деформацій, що безпосередньо впливає на довговічність конструкції.

Порівняння продуктивності роботизованого MIG/MAG зварювання з традиційним ручним дуговим зварюванням доцільно виконувати з урахуванням кількох ключових показників. До них належать частка “arc-on time” (реального часу

горіння дуги) у структурі змінного часу, середня швидкість зварювання, швидкість наплавлення, рівень браку та переробок, обсяг післяопераційної механічної обробки, енергоспоживання на одиницю довжини шва [2, 7]. Для ручного зварювання покритими електродами типові значення частки часу горіння дуги становлять лише 15–25 відсотків від тривалості зміни, оскільки значна частина часу витрачається на заміну електродів, очищення шва, перепозиціонування, контроль кромek [2]. Для роботизованих GMAW станцій, що працюють у автоматичному режимі, arc-on time може досягати 60–80 відсотків за рахунок безперервної подачі дроту, автоматичного відстеження шва та мінімізації допоміжних операцій [2, 7]. Це безпосередньо трансформується у 2–3 разове зростання продуктивності при одночасному зниженні частоти дефектів та стабілізації геометричних розмірів швів.

Технологічні лінії роботизованого зварювання довгомірних виробів, оснащені СМТ джерелами живлення, дають змогу поєднати високу швидкість зварювання з істотним зниженням тепловкладення. Дослідження виконані для вуглецевих та алюмінієвих сплавів, показують, що при переході від традиційного МАG до СМТ за однакової товщини металу можливо зменшити лінійну енергію на 20–30 відсотків при незмінній або дещо вищій швидкості зварювання [3; 4]. Зниження тепловкладення призводить до зменшення ширини зони перегріву, збереження більш сприятливої феритно-перлітної або дрібнодендритної структури, зменшення залишкових напружень і деформацій [2–4]. У практичному вимірі це означає зменшення потреби у правленні та механічній обробці після зварювання, скорочення тривалості виробничого циклу та підвищення розмірної стабільності виробів, що особливо важливо для довгих балок, рам та корпусів, де навіть невеликі прогини чи скручування призводять до труднощів при складанні і монтажі.

Продуктивність зварювання безпосередньо пов'язана з якістю шва, а через неї з втомною міцністю та довговічністю деталей. Як показують численні дослідження в галузі проектування зварних конструкцій, саме геометрія шва, наявність підрізів,

пор, непроварів та внутрішніх дефектів формує локальні концентрації напружень, які визначають ресурс при циклічному навантаженні [2; 5]. Роботизовані лінії забезпечують стабільне положення пальника щодо шва, відтворюваність кута нахилу, вильоту електрода та швидкості зварювання, що зменшує розкид параметрів проплавлення та підсилення валиків [2; 6]. У поєднанні з СМТ процесом, який знижує розбризкування та утворення підрізів, це призводить до формування більш гладкого переходу між металом шва і основним металом та зменшення ефективного коефіцієнта концентрації напружень. Таким чином, підвищення продуктивності за рахунок автоматизації та низькоенергетичних режимів не лише не погіршує, а, як правило, покращує довговічність зварних вузлів, за умови правильного вибору режимів і контролю якості [3; 4].

Для кількісної ілюстрації відмінностей у продуктивності розглянемо спрощений інженерний приклад зварювання поздовжнього кутового шва довжиною  $L = 6$  м на рамі з низьковуглецевої сталі товщиною 6 мм. Порівнюються три варіанти процесу: ручне дугове зварювання покритим електродом, роботизоване традиційне MAG зварювання та роботизоване СМТ зварювання. Припустимо, що середня швидкість зварювання для ручного процесу становить  $v_1 = 0,25$  м/хв, для роботизованого MAG  $v_2 = 0,60$  м/хв, для роботизованого СМТ  $v_3 = 0,80$  м/хв, що відповідає типовим діапазонам для філе-швів на сталях середньої товщини [2–4]. Час власне зварювання визначається співвідношенням  $t_{\text{звар}} = L / v_{\text{звар}}$ . Для ручного процесу  $t_{1\text{звар}} = 6 / 0,25 = 24$  хв, для роботизованого MAG  $t_{2\text{звар}} = 6 / 0,60 \approx 10$  хв, для СМТ  $t_{3\text{звар}} = 6 / 0,80 = 7,5$  хв.

Оскільки чистий час горіння дуги становить лише частину загального циклу, врахуємо коефіцієнт використання дуги  $k$ , який відображає частку часу зварювання у загальному часі операції. Для ручного зварювання прийmemo  $k_1 = 0,25$ , для роботизованого MAG  $k_2 = 0,65$ , для роботизованого СМТ  $k_3 = 0,70$ , що відповідає наведеним у літературі інтервалам arc-on time для ручних і роботизованих процесів

[2; 7]. Тоді повний час циклу  $t_{\text{ц}} = t_{\text{звар}} / k$ . Отримаємо для ручного зварювання  $t_{1\text{ц}} = 24 / 0,25 = 96$  хв, для роботизованого MAG  $t_{2\text{ц}} \approx 10 / 0,65 \approx 15,4$  хв, для СМТ  $t_{3\text{ц}} = 7,5 / 0,70 \approx 10,7$  хв. Таким чином, перехід від ручного процесу до роботизованого MAG зменшує час циклу приблизно у 6 разів, а застосування СМТ додатково скорочує його ще приблизно на 30 відсотків порівняно з традиційним MAG.

Якщо уявити, що протягом однієї восьмигодинної зміни необхідно зварити  $N$  однакових рам, то при ручному процесі максимально можливе число виробів  $N_1 \approx 480 / 96 = 5$ , тоді як при роботизованому MAG  $N_2 \approx 480 / 15,4 \approx 31$ , а при СМТ  $N_3 \approx 480 / 10,7 \approx 44$ . Наведені оцінки є наближеними, але добре демонструють порядок зростання випуску виробів при переході до роботизованих технологій. Водночас слід враховувати, що для ручного зварювання характерні вищі рівні розбризкування, більша ймовірність утворення підрізів, непроварів та змінної геометрії шва [2]. Це призводить до збільшення обсягів зачищення швів, механічної обробки та переробок, що додатково збільшує реальний час циклу та погіршує прогнозованість якості. Для роботизованого MAG, а тим більше СМТ процесу, рівень браку та переробок є істотно нижчим, тому фактична продуктивність лінії ще більше віддаляється від ручної технології.

З точки зору експлуатаційної надійності обладнання важливим є не лише скорочення часу виготовлення виробу, а й зменшення розкиду властивостей швів у партії. У ручному процесі навіть за дотримання середнього рівня якості варіація у глибині проплавлення, ширині шва та наявності мікродефектів між окремими виробами суттєва, що призводить до різного запасу міцності при циклічному навантаженні [2; 5]. Роботизовані лінії, завдяки прогнозованій кінематиці, стабільним режимам та можливості онлайн контролю параметрів дуги, забезпечують значно тісніше групування характеристик швів навколо номінального значення [6; 7]. Для довгомірних виробів, де поздовжні шви визначають жорсткість та несучу здатність всієї конструкції, це означає підвищення передбачуваності

ресурсу та зниження ймовірності передчасних відмов у найбільш навантажених перерізах.



Рисунок 1.2 Роботизований зварювальний комплекс з додатковими 2-ма осями

Додатковий ефект роботизації пов'язаний зі зниженням питомих енерговитрат. Завдяки вищому коефіцієнту використання дуги, відсутності “холостих” витрат часу на заміну електродів, оптимізації траєкторій руху робота та можливості застосування енергоефективних режимів, таких як СМТ, сумарна електроенергія, витрачена на одиницю довжини шва, зменшується, попри вищу миттєву потужність джерела [3; 4; 7]. Зі зменшенням тепловкладення скорочується обсяг деформацій, а отже і потреба у механічному правленні, що додатково зменшує енергетичне та трудове навантаження на виробництво. Таким чином, зростання продуктивності на роботизованих лініях безпосередньо поєднується із

підвищенням якості швів, зменшенням розкиду їхніх властивостей та покращенням експлуатаційної довговічності зварних конструкцій.



Рисунок 1.3 Особливості технології зварювання довгомірних деталей

### 1.2 Особливості технології зварювання довгомірних деталей

Зварювання довгомірних деталей є однією з найскладніших задач у машинобудуванні, оскільки сукупний вплив теплових деформацій по всій довжині швів призводить до суттєвих відхилень форми, залишкових напружень та втрати точності геометрії конструкцій [8, 9]. На відміну від коротких елементів довжиною до 1-1,5 м, де деформації часто локалізуються в зоні шва та можуть компенсуватися у межах однієї операції механічної обробки, довгомірні вироби типу балок, рам, поздовжніх елементів корпусів машин, рам причепів або несучих елементів обладнання переробних виробництв накопичують поздовжню усадку та прогини по

всій довжині. Це безпосередньо впливає на взаємне положення базових поверхонь, точність складання і, відповідно, на надійність та довговічність обладнання [8, 10].

Фізична природа деформацій при зварюванні довгомірних виробів пов'язана з нерівномірним нагріванням і охолодженням металу, що зумовлює термічне розширення у зоні дуги та подальшу усадку при охолодженні. Характеристикою, що узагальнює тепловий вплив, є лінійна енергія зварювання  $q$ , яка для процесу MIG/MAG визначається як  $q = \eta \cdot U \cdot I / v$ , де  $\eta$  – ККД процесу,  $U$  – напруга дуги,  $I$  – зварювальний струм,  $v$  – швидкість зварювання [10, 11]. Для довгих швів збільшення  $q$  має подвійний негативний ефект: зростає ширина зони термічного впливу та величина залишкових розтягувальних напружень, а також підвищується сумарна поздовжня усадка, яка пропорційна довжині шва. Експериментальні дослідження підтверджують майже лінійний зв'язок між тепловкладенням та індексом деформації, що робить контроль  $q$  ключовим інструментом керування формоутворенням довгомірних елементів [11, 12].

Особливість довгомірних деталей полягає у високій гнучкості та значній відносній довжині, унаслідок чого навіть невелика кутова деформація або різниця поздовжньої усадки між протилежними краями викликає помітне викривлення по всій довжині. Для коротких елементів типу кронштейнів, вкладок, ребер жорсткості похибка часто обмежується десятими долями міліметра і легко коригується механічною обробкою. Для довгих профілів, рам і балок відхилення в 5-10 мм призводять до перекосів при складанні, підclinювання рухомих вузлів, нерівномірного розподілу навантаження у підшипниках і, як наслідок, до прискореного зносу та зниження ресурсу [8, 9]. Тому саме для довгомірних конструкцій впровадження роботизованих ліній MIG/MAG з контрольованим тепловкладенням та жорсткими схемами закріплення є критично важливим для забезпечення геометричної точності.

Роботизовані лінії зварювання довгомірних виробів зазвичай будуються на базі шестикоординатного промислового робота з додатковими зовнішніми осями у вигляді порталів або лінійних напрямних, а також позиціонерів типу «голівка-хвіст» або роликових стендів, які підтримують деталь по всій довжині [10]. Конструкція таких ліній відрізняється від осередків для коротких деталей тим, що забезпечує розподілене закріплення, можливість повороту всього виробу для зварювання у переважно нижньому положенні, компенсацію власної маси деталі та мінімізацію прогину під час зварювання. На рисунку 1.2 доцільно показати схему роботизованої лінії з довгомірним виробом на двоопорному позиціонері з проміжними підтримками і зварювальним роботом, змонтованим на лінійній осі, що пересувається вздовж шва. Така конфігурація дозволяє зберігати оптимальний кут нахилу пальника, сталі параметри дуги та сталі умови тепловідведення по всій довжині шва.

Технологічна відмінність роботизованого MIG/MAG зварювання довгомірних деталей від ручного полягає у набагато вищій стабільності дуги, точності підтримання швидкості переміщення та можливості програмного обмеження тепловкладення. Сучасні синергетичні джерела живлення забезпечують керовані режими розпилювального переносу, імпульсні та кратерні програми, а також режими з пониженою енергією дуги, зокрема Cold Metal Transfer (CMT) [12, 13]. У CMT за рахунок керування дротоподачею та струмом у фазі короткого замикання досягається суттєве зниження середнього струму та тепловкладення порівняно з традиційними короткодуговими або імпульсними MIG/MAG режимами, при цьому забезпечується стабільний переніс крапель та мінімальний розбризк. Для довгомірних швів це означає зменшення ширини зони термічного впливу, поверхневої опуклості валика та сумарної поздовжньої усадки [11, 12].



Рисунок 1.4 Технологія роботизованого СМТ зварювання

У роботизованих лініях ефект зниження деформацій досягається поєднанням декількох рішень. По-перше, застосовується жорстка система базування з багатоточковими затискачами, що розподіляє затискні зусилля та обмежує вільні ступені деформації деталі. По-друге, використовується раціональна послідовність накладання швів із дзеркальним або блоково-зворотним порядком, яка мінімізує сумарний згинальний момент від усадки окремих швів [8, 10]. По-третє, параметри процесу підбираються так, щоб тепловкладення не перевищувало критичних значень, при яких для даної товщини і геометрії з'являється втрачання стійкості у вигляді прогину чи викривлення панелі [11]. У режимах СМТ та імпульсного MIG/MAG це дозволяє знизити деформації на 40-70 % порівняно з традиційними високострумовими режимами [11, 12].

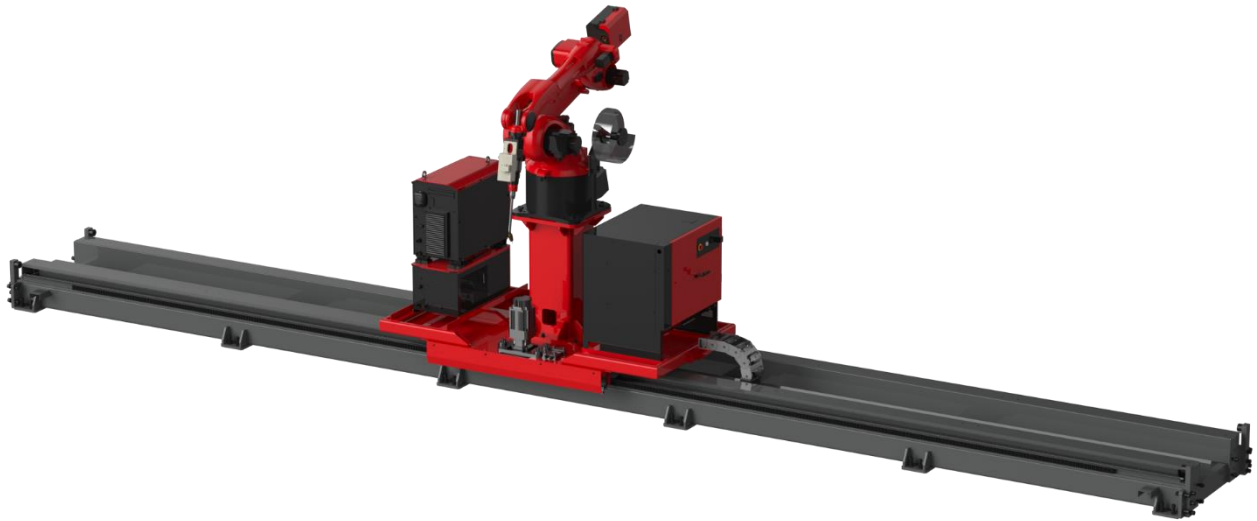


Рисунок 1.5 Семиосьова наземна робоча станція зварювального робота

Для порівняння рівня деформацій можна розглянути типовий випадок зварювання поздовжнього шва у листовій конструкції товщиною 6 мм та довжиною 6 м. Для ручного процесу MIG/MAG у вуглецевих сталях при використанні суцільного дроту діаметром 1,2 мм та швидкості зварювання 0,3-0,4 м/хв лінійна енергія становить приблизно 0,8-1,0 кДж/мм, що відповідає коефіцієнту поздовжньої усадки близько 1,0 мм/м шва [10, 11]. Для роботизованого імпульсного MIG/MAG з вищою швидкістю 0,5-0,6 м/хв та оптимізованим режимом переносу металу  $q$  знижується до 0,6-0,7 кДж/мм, а усадка до 0,6 мм/м. Для СМТ, де середній струм і тепловкладення ще нижчі,  $q$  може знаходитись у діапазоні 0,3-0,5 кДж/мм, при цьому коефіцієнт поздовжньої усадки  $k_L$  зменшується до 0,3 мм/м [12-14].

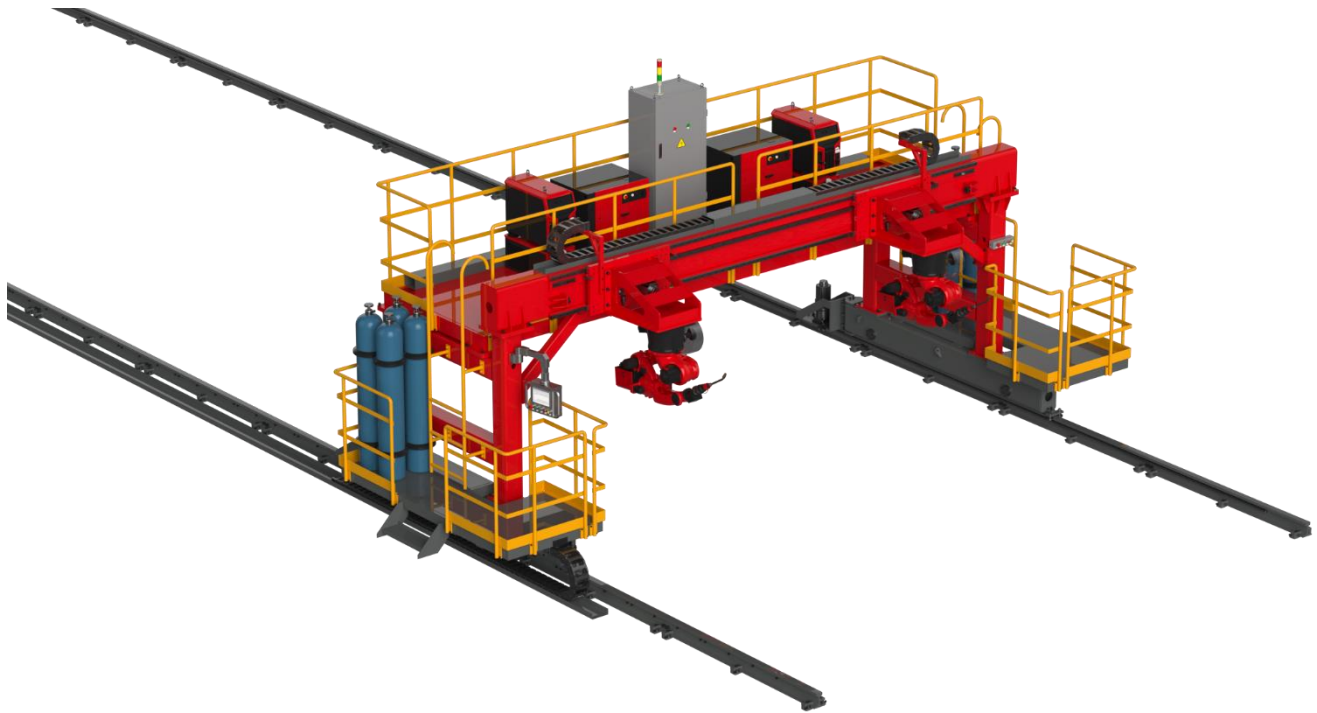


Рисунок 1.6 Двороботна станція з двома роботами на рейковій опорі

Для довгомірної панелі, закріпленої з одного боку вздовж лінії шва та вільної з протилежного боку, поздовжня усадка у зоні шва спричиняє вигин деталі у площині, перетворюючи її у дугу. При інженерних оцінках таку картину деформації можна описати моделлю балки з постійною кривизною. Якщо поздовжня усадка уздовж зварного шва дорівнює  $\Delta L$ , а відстань між зварним швом та протилежним вільним краєм панелі становить  $b$ , то кривизна  $\kappa$  приблизно дорівнює  $\kappa \approx \Delta L / (L \cdot b)$ , де  $L$  – довжина виробу. Максимальний прогин у середині панелі при такій схемі згину можна оцінити залежністю  $w_{\max} \approx \kappa \cdot L^2 / 8 = \Delta L \cdot L / (8 \cdot b)$  [8, 11].

Розглянемо довгомірну панель шириною  $b = 0,3$  м і довжиною  $L = 6$  м, у якій виконується один поздовжній шов уздовж однієї кромки. Для ручного MIG/MAG при  $k_L = 1,0$  мм/м сумарна поздовжня усадка складатиме  $\Delta L_{\text{руч}} = k_L \cdot L = 1,0 \cdot 6 = 6$  мм, або 0,006 м. Підставляючи у формулу, одержимо максимальний прогин  $w_{\max, \text{руч}} \approx 0,006 \cdot 6 / (8 \cdot 0,3) = 0,036 / 2,4 \approx 0,015$  м, тобто близько 15 мм. Такий прогин для багатьох рам і корпусів перевищує допустимі значення і потребує додаткового правлення або розточування базових поверхонь.

Для роботизованого імпульсного MIG/MAG з  $k_L = 0,6$  мм/м сумарна усадка становитиме  $\Delta L_{\text{роб}} = 0,6 \cdot 6 = 3,6$  мм, або 0,0036 м. Відповідно максимальний прогин буде  $w_{\text{max,роб}} \approx 0,0036 \cdot 6 / (8 \cdot 0,3) = 0,0216 / 2,4 \approx 0,009$  м, тобто приблизно 9 мм. Це вже ближче до типових допусків на прямолінійність для багатьох машинобудівних конструкцій, однак у відповідальних вузлах може все ще вимагати локального виправлення.

Для СМТ-режиму при  $k_L = 0,3$  мм/м маємо  $\Delta L_{\text{СМТ}} = 0,3 \cdot 6 = 1,8$  мм, або 0,0018 м, а максимальний прогин  $w_{\text{max,СМТ}} \approx 0,0018 \cdot 6 / (8 \cdot 0,3) = 0,0108 / 2,4 \approx 0,0045$  м, тобто приблизно 4,5 мм. У більшості випадків така деформація вже укладається у вимоги до геометричної точності без додаткового правлення, особливо якщо поєднується з правильно розробленою схемою закріплення і симетричним порядком накладання швів. На рисунку 1.3 доцільно подати графік залежності максимального прогину довгомірної панелі від коефіцієнта поздовжньої усадки для трьох розглянутих технологій.

Отримані оцінки демонструють, що перехід від ручного процесу до роботизованого імпульсного MIG/MAG дає зниження прогину приблизно на 40%, а застосування СМТ у роботизованому виконанні зменшує деформацію більш ніж утричі. З погляду експлуатаційної надійності це означає зменшення перекосів при складанні, рівномірніший розподіл навантаження у підшипниках та опорах, зниження рівня додаткових згинальних моментів у місцях кріплення обладнання [8, 9, 15]. Для зварних рам, що працюють під динамічними і змінними навантаженнями, зменшення залишкових напружень та деформацій безпосередньо підвищує втомну міцність, оскільки в зонах концентрації напружень зменшується амплітуда циклічних напружень і ймовірність зародження тріщин [8, 11].

Крім вибору енергетично ощадливого режиму, для довгомірних виробів важливу роль відіграють технологічні рішення щодо розташування швів, їхньої симетрії та розподілу по перерізу деталі. Застосування двосторонніх симетричних

швів, зустрічного зварювання від середини до кінців, попереднього монтажу тимчасових ребер жорсткості та стяжок дозволяє керовано формувати поле залишкових напружень і компенсувати усадку. Роботизовані комплекси дають змогу реалізувати складні послідовності проходів, які вручну повторити практично неможливо, що забезпечує відтворюваність результатів від деталі до деталі [10, 13]. Для коротких деталей ці заходи менш критичні, оскільки деформації локальні й можуть бути виправлені після зварювання, тоді як для довгомірних конструкцій саме технологія формування швів визначає кінцеву геометрію та ресурс виробу.

### 1.3. Основні дефекти зварних з'єднань при зварюванні довгомірних деталей

Якість зварних з'єднань довгомірних деталей безпосередньо визначає експлуатаційну надійність рам, балок, несучих елементів корпусів машин та обладнання переробних виробництв. На відміну від коротких елементів, де дефекти часто мають локальний характер, у довгомірних виробах навіть поодинокі недопустимі дефекти або незначне, але систематичне відхилення геометрії шва накопичуються по довжині та формують зони концентрації напружень, що суттєво знижують втомну міцність та ресурс конструкцій. Міжнародні стандарти ISO 6520-1 та ISO 5817 визначають номенклатуру геометричних несплошностей у зварних з'єднаннях і встановлюють допустимі рівні для різних класів якості, зокрема для з'єднань, що працюють у втомних і відповідальних умовах [16; 17]. Саме в межах цих нормативних підходів доцільно аналізувати характер дефектів у швах, отриманих методом роботизованого MIG/MAG зварювання довгомірних деталей, у порівнянні з традиційними режимами ручного дугового зварювання.

Згідно з ISO 6520-1, усі несплошності у зварних швах поділяються на зовнішні, внутрішні та геометричні, а також класифікуються за типами, такими як пори та газові включення, шлакові включення, непровари, тріщини, підрізи, надмірний або недостатній підсил шва, зміщення кромки, коливання ширини та

форми валика [16; 27]. Стандарт ISO 5817 встановлює три рівні якості В, С і D для сталей і сплавів, при цьому рівень В відповідає найжорсткішим вимогам для з'єднань, що працюють у режимах втоми, ударних навантажень або при низьких температурах [17; 26]. Для довгомірних виробів, які, як правило, сприймають циклічні та комбіновані згинально-крутильні навантаження, вимоги до допустимих розмірів підрізів, непроварів, пористості та тріщин, як правило, відповідають рівням В або С, що істотно підвищує чутливість до будь-яких відхилень процесу зварювання.

У традиційних режимах ручного дугового зварювання (SMAW, напівавтоматичне GMAW) формування дефектів значною мірою пов'язане з людським фактором. Помилки в утриманні пальника або електрода, нестабільна швидкість переміщення, нерівномірний вильот електрода, змінний кут нахилу та відстань до виробу призводять до коливань тепловкладення і глибини проплавлення, що збільшує ймовірність утворення підрізів, непроварів, пор та шлакових включень [18; 19]. Для довгих швів у цьому випадку характерний випадковий, але частий розподіл локальних дефектів уздовж довжини, що робить контроль якості вимірювально складним, а повторюваність властивостей швів від виробу до виробу низькою.

Роботизовані процеси MIG/MAG істотно змінюють картину утворення дефектів. З одного боку, цифрові джерела живлення, стабільна подача дроту, відтворювані траєкторії руху та сталі значення вильоту електрода, кута нахилу пальника і швидкості зварювання суттєво зменшують розкид параметрів дуги. Це знижує ймовірність випадкових дефектів, таких як епізодичні непровари, ізольовані пори, локальні підрізи, що типові для ручного процесу [18; 21]. З іншого боку, помилки програмування, некоректна калібровка ТСП, неточне базування довгомірної деталі або неадекватні параметри режиму призводять до появи систематичних дефектів, які можуть повторюватися по всій довжині шва. Таким

чином, роботизоване зварювання зменшує випадкову складову дефектності, але вимагає набагато жорсткіших вимог до попереднього налаштування технології.

Однією з найбільш критичних груп дефектів для довгомірних швів є непровари та недостатня глибина проплавлення, що за класифікацією ISO 6520-1 відповідає групі 4xx [16]. Для швів, виконаних вручну або в напівавтоматичному режимі, такі дефекти виникають через надто високу швидкість переміщення, неправильний кут нахилу пальника, неякісну підготовку кромek чи забруднення поверхні. Експериментальні дослідження показують, що у традиційних ручних процесах ймовірність локальних непроварів у корені або на боковій стінці шва значно збільшується при відхиленні швидкості на 15-20 відсотків від оптимального діапазону, а також при зменшенні струму та напруги від номінальних значень [18; 19; 22].

У роботизованому MIG/MAG зварюванні параметри струму, напруги, швидкості подачі дроту та швидкості зварювання підтримуються з високою точністю, що в нормальних умовах урівноважує ризик утворення непроварів. Однак у разі некоректної траєкторії, коли фактична позиція пальника зміщена відносно стику, або у разі поганої калібровки TCP, непровар набуває систематичного характеру. У довгому кутовому шві це може означати часткове заповнення лише одного плеча кутника з формуванням зони неплавлення на протилежній стінці на значному протязі. Роботи GMAW-процесу показують, що навіть при оптимальних електричних параметрах відхилення кута пальника на 10-15 градусів від розрахункового та зміна положення дуги відносно стику на декілька міліметрів істотно впливають на форму валика і глибину проплавлення; для роботизованих систем це означає, що помилка програмування може відтворюватися на десятках метрів шва [21; 24].

Пористість та газові включення, які ISO 6520-1 відносить до групи 2xx, також мають іншу природу в роботизованому процесі порівняно з ручним [16; 19]. У

ручних режимах основними причинами пористості є зволоження флюсу або покриття електродів, забруднення кромek мастилом чи іржею, нестабільна подача захисного газу. Роботизоване MIG/MAG зварювання використовує захисні гази стабільної витрати, а траєкторія пальника є відтворюваною, що зменшує випадкові коливання газового захисту. Водночас для довгих швів критичною стає стабільність подачі газу на всій довжині маршрутів шланг-пакетів, а також відсутність турбулентних зон та нещільностей у зонах поворотів, особливо при зварюванні вертикальних та стельових швів. Дослідження роботизованих GMAW-систем показують, що при стабільних параметрах подачі газу пористість суттєво зменшується, однак при надто високих швидкостях зварювання та надмірно великій відстані від сопла до виробу може виникати локальне "підсмоктування" повітря, що призводить до утворення групових пор по довжині шва [18–20].

Підрізи та дефекти форми валика належать до групи геометричних несплошностей ISO 6520-1 і розглядаються ISO 5817 як один з ключових критеріїв приймання швів, що працюють в умовах втоми [16–17; 22]. Підріз формується як поздовжня виїмка біля основи шва і різко підвищує локальний коефіцієнт концентрації напружень, зменшуючи втомну міцність з'єднання. У ручному зварюванні підрізи часто пов'язані з надто високим струмом, довгою дугою та неправильною технікою ведення шва. У роботизованому MIG/MAG процесі ризик підрізу пов'язаний, насамперед, із завищеною швидкістю зварювання, завеликим напругою і струмом при фіксованому вильоті електрода, а також із некоректно вибраним вектором руху пальника відносно кромek. При переході до високопродуктивних режимів, коли підприємство намагається максимально збільшити швидкість зварювання довгих швів, підрізи можуть стати типово систематичним дефектом, якщо коректно не підібрано поєднання струму, напруги, індуктивності та траєкторії коливань [18; 21; 25].

Важливу роль відіграє також використання низькоенергетичних процесів, зокрема Cold Metal Transfer. СМТ, завдяки контрольованому короткому замиканню та зниженому середньому тепловкладенню, зменшує схильність до підрізів і розбризкування і поліпшує формоутворення шва, особливо на тонких і середніх товщинах [23]. Однак надмірне зниження тепловкладення у довгих швах може призвести до недостатньої глибини проплавлення і появи непроварів, якщо не забезпечено правильне поєднання струму, швидкості та підготовки кромки. Таким чином, перехід до СМТ, як показують огляди сучасних досліджень, повинен супроводжуватися ретельним підбором параметрів і додатковим контролем кореня шва, особливо в поздовжніх стиках довгомірних конструкцій [23].

Зв'язок між продуктивністю, якістю шва та довговічністю деталей в умовах роботизованого MIG/MAG зварювання є нелінійним. З одного боку, збільшення швидкості зварювання, коефіцієнта використання дуги та інтенсивності роботи роботизованих осередків дозволяє істотно знизити собівартість та час виготовлення довгомірних деталей. Дослідження з оптимізації параметрів роботизованого GMAW показують, що при переході від консервативних до оптимізованих режимів за допомогою математичних моделей або нейромереж можна досягти підвищення швидкості зварювання на 20-40 відсотків при збереженні або навіть покращенні рівня дефектності [21; 25]. З іншого боку, надмірне підвищення продуктивності шляхом збільшення швидкості без адекватного контролю тепловкладення та стабільності дуги призводить до різкого зростання частоти непроварів, підрізів та коливань геометрії шва. У термінах довговічності це означає зниження втомної міцності та скорочення ресурсу конструкцій за рахунок формування небажаних зон концентрації напружень [22].

Важливо, що дефекти шва і залишкові напруження діють спільно. Як показано в класичних працях з аналізу зварних конструкцій, тріщини, непровари та підрізи у поєднанні з розтягувальними залишковими напруженнями сприяють

зародженню та поширенню втомних тріщин, а також зниженню стійкості елементів до втрати стійкості [22; 30]. Для довгомірних деталей, де напружений стан часто є згинальним або крутильно-згинальним, поєднання навіть невеликих геометричних дефектів із залишковими напруженнями може зменшити ресурс у декілька разів. Тому роботизована технологія, яка поєднує стабільний режим дуги, оптимізовану послідовність накладання швів та контроль деформацій, дає змогу одночасно підвищувати продуктивність і довговічність за умови системного керування дефектністю.

Окремим специфічним аспектом якості швів при роботизованому зварюванні є вплив кінематичних особливостей робота, зокрема сингулярностей, на стабільність процесу. Сингулярність шестикоординатного робота виникає, коли геометричне розташування ланок стає таким, що для заданої швидкості руху інструмента необхідні практично нескінченні швидкості окремих обертальних осей. У разі ліктьової сингулярності центр зап'ястя робота опиняється у площині, що проходить через осі другого та третього суглобів, тобто рука фактично "випрямляється" [25; 31]. Сучасні контролери обмежують швидкість у таких зонах, однак це супроводжується різкими змінами миттєвої швидкості ТСР, можливою втратою точності орієнтації пальника та коливаннями реальної швидкості зварювання від заданої [25; 27].

Для довгомірних вертикальних швів вплив сингулярності може бути особливо критичним. Розглянемо приклад зварювання вертикального вгору кутового шва на рамі висотою 2,5 м, коли робот рухається знизу вгору вздовж стійки. Вихідний технологічний режим передбачає процес MIG/MAG з напругою  $U = 22$  В, струмом  $I = 220$  А, коефіцієнтом корисної дії процесу  $\eta \approx 0,8$  та швидкістю зварювання  $v = 0,35$  м/хв. Лінійна енергія процесу при цьому дорівнює  $q = \eta \cdot U \cdot I / v \approx 0,8 \cdot 22 \cdot 220 / 0,35 \approx 11\,000 / 0,35 \approx 31\,400$  Дж/м або 0,314 кДж/мм, що відповідає

прийнятному значенню для вертикального шва на сталі середньої товщини з урахуванням вимог до якості рівня С за ISO 5817 [17; 18].

При наближенні до певної висоти, наприклад 1,7 м, геометрія розташування робота відносно деталі така, що розв'язок обертань суглобів проходить поблизу ліктьової сингулярності. Контролер, намагаючись дотриматися заданої швидкості ТСР, обмежує швидкість окремих осей, унаслідок чого фактична швидкість переміщення пальника тимчасово знижується до  $v' \approx 0,20$  м/хв у ділянці довжиною близько 100 мм. При незмінних значеннях напруги, струму та ККД лінійна енергія у цій локальній зоні збільшується до  $q' \approx 0,8 \cdot 22 \cdot 220 / 0,20 \approx 11\,000 / 0,20 \approx 55\,000$  Дж/м або 0,55 кДж/мм, тобто майже в 1,8 разу більше. У вертикальному вгору положенні це призводить до надмірного розплавлення основного металу, збільшення опуклості валика та ризику підрізу по верхній границі шва, а також до підвищеної схильності до утворення гарячих тріщин у кратерах [18; 22; 29].

Одночасно зі зменшенням швидкості можливе неконтрольоване відхилення кута нахилу пальника та вильоту електрода, оскільки керування положенням ТСР у зоні сингулярності стає менш стійким. Це посилює асиметрію форми шва, створюючи локальні зони надмірного тепловкладення на одній зі стінок і потенційні зони непровару на протилежній. Після проходження сингулярної області робот, навпаки, може короткочасно прискоритися до швидкостей, що перевищують задану, щоб наздогнати траєкторію, що спричинить локальне зниження тепловкладення і підвищений ризик непровару на наступній ділянці шва. У результаті по висоті вертикального шва формується характерний "профіль" дефектів: зона надмірного підсилу та можливих підрізів у ділянці зниженої швидкості та зона непровару на ділянці компенсуючого прискорення. Для довгомірних несучих елементів, які працюють у складному напруженому стані, такі локальні зміни геометрії та властивостей шва можуть стати зародковими зонами

втомного руйнування або місцями втрати жорсткості при динамічних навантаженнях.

Практика показує, що уникнення сингулярностей при роботизованому зварюванні довгих вертикальних швів вимагає інтегрованого підходу до проєктування траєкторій. До ключових заходів належать оптимальний вибір базового положення робота та виробу, зміна орієнтації деталі для виконання швів у положеннях, максимально віддалених від сингулярних зон, а також використання додаткових осей (лінійної направляючої, поворотних позиціонерів), що розширює робочий простір без необхідності проходити через конфігурації з поганою умовністю [20; 24; 31]. Додатково застосовуються офлайн моделювання та кінематичний аналіз, які дозволяють виявити потенційні сингулярні положення ще на етапі програмування та скорегувати траєкторії до реального запуску лінії. З погляду якості швів це прямо пов'язано з можливістю підтримувати стабільні значення швидкості зварювання, кута пальника та вильоту електрода на всій довжині вертикального шва, що мінімізує ризик утворення систематичних дефектів.

Ефективне використання роботизованих ліній зварювання довгомірних деталей потребує також впровадження систем онлайн моніторингу та діагностики процесу. Сучасні підходи передбачають застосування датчиків напруги та струму дуги, оптичних або інфрачервоних камер, а також алгоритмів обробки сигналів, зокрема вейвлет-аналізу, для виявлення характерних аномалій, що відповідають появі пористості, нестабільності переносу металу або відхиленню пальника від шва [20; 29]. Для довгомірних швів це особливо важливо, оскільки дає змогу виявити систематичні дефекти на ранній стадії і зупинити процес до того, як буде виготовлено велику партію деталей з однаковими недопустимими несплошностями. Поєднання роботизації, інтелектуальних систем контролю та обґрунтованих за ISO 5817 критеріїв приймання дозволяє досягати високої

продуктивності без компромісу щодо безпечності та довговічності конструкцій [17; 19; 20].

У якості ілюстративного матеріалу до підрозділу доцільно використати три рисунки, які підкреслюють наведені положення. Перший рисунок може відображати схему класифікації основних дефектів швів відповідно ISO 6520-1 з прикладами підрізів, пористості, непроварів та надмірного підсилю на макрошліфах кутових та стикових швів; відповідні зображення доцільно шукати в колекціях технічних ілюстрацій на ресурсах типу Wikimedia Commons або у навчальних матеріалах виробників зварювального обладнання. Другий рисунок доцільно присвятити порівнянню макроструктури та геометрії шва для ручного та роботизованого MIG/MAG зварювання довгомірної деталі, зокрема можна підібрати фотографії або схеми з сайтів Fronius, ABB або KUKA, де показані приклади стабільного роботизованого шва та шва з характерними дефектами. Третій рисунок може відображати кінематичну схему шестикоординатного робота в околі ліктьової сингулярності під час зварювання вертикального шва, з поясненням зміни орієнтації ланок, що зручно ілюструвати на основі інженерних діаграм та схем з відкритих джерел, присвячених аналізу сингулярностей промислових роботів.

## РОЗДІЛ II ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Проблема сингулярності при використанні зварювальних роботів для виготовлення довгомірних деталей

Підвищення рівня автоматизації зварювання довгомірних деталей із використанням 6-осьових промислових роботів істотно змінює характер формування якості швів. Для таких виробів типові значні довжини поздовжніх і кільцевих швів, робота в різних просторових положеннях та складні траєкторії руху пальника.

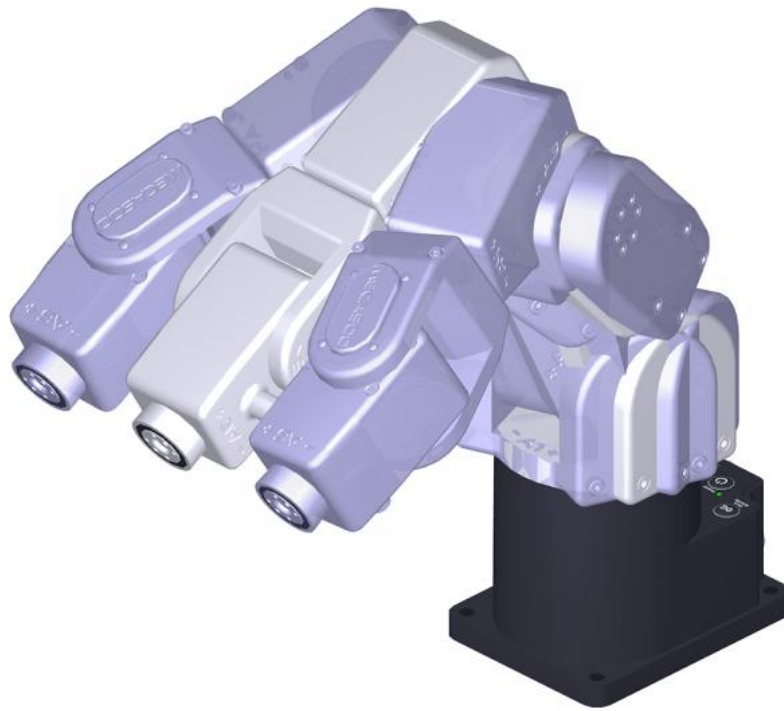


Рисунок 2.1 Переміщення ТСР робота в декартовій системі координат

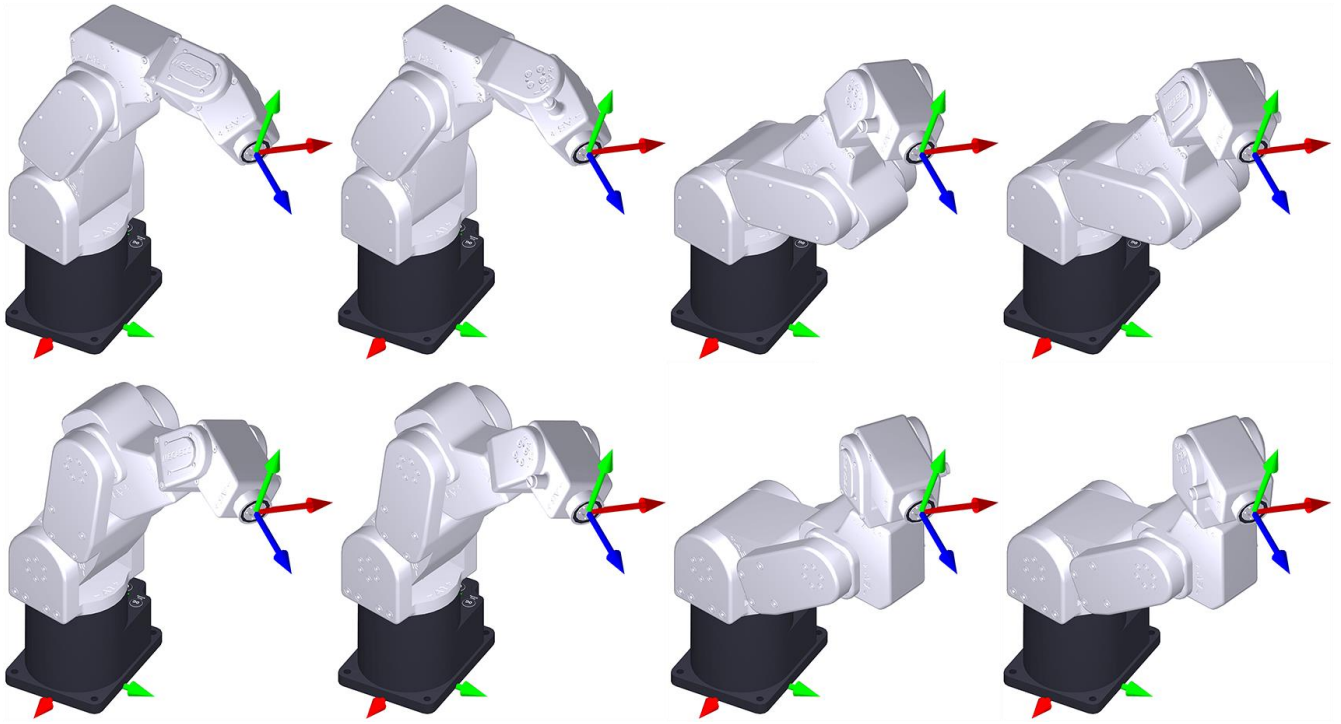


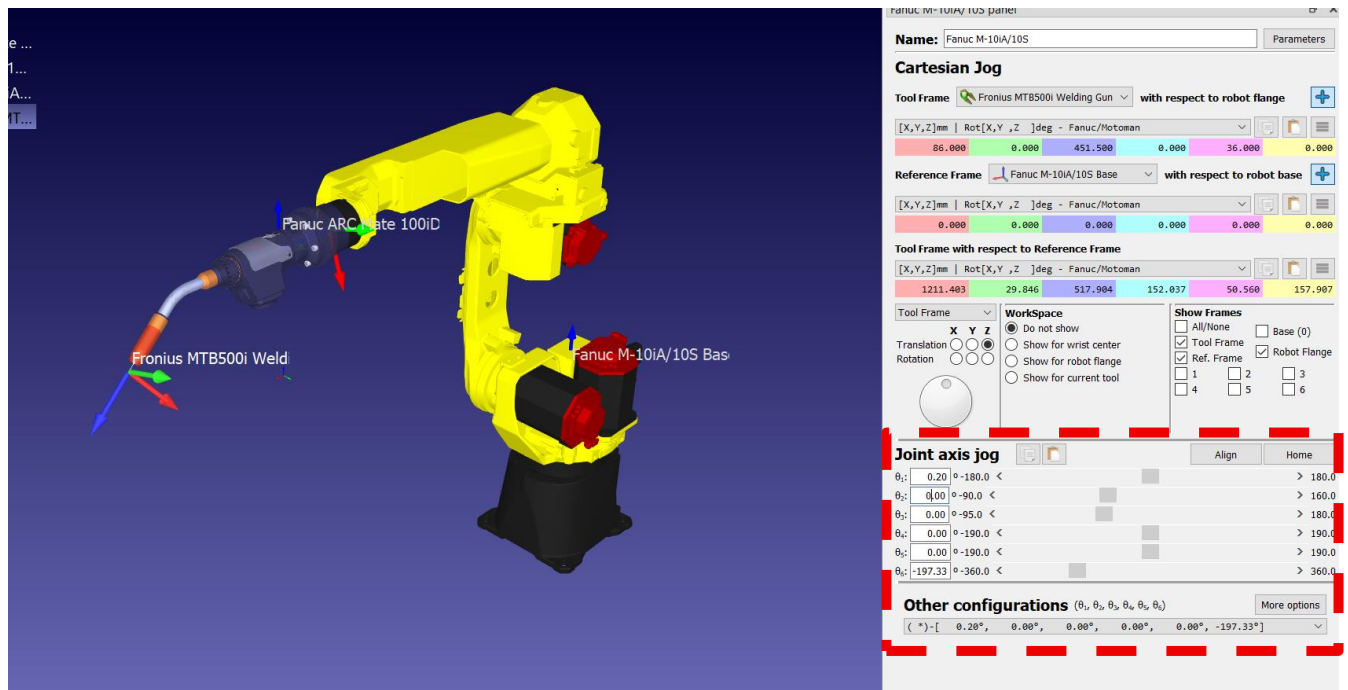
Рисунок 2.2 Приклад положення кінцевого виконавчого механізму, що відповідає восьми різним наборам положень суглобів

У цих умовах критичним фактором стає проблема сингулярності роботизованого маніпулятора, тобто таких конфігурацій, за яких робочий орган робота втрачає один або кілька ступенів свободи та не може вільно переміщатися у заданому напрямку [27–29]. У зоні сингулярності або поблизу неї виникають різкі зміни миттєвої швидкості переміщення пальника, відхилення орієнтації пальника від номінальної, збільшення похибки відстеження траєкторії. Для процесу роботизованого MIG/MAG зварювання довгих швів це безпосередньо призводить до появи дефектів, які описуються міжнародними нормативними документами ISO 6520-1 та ISO 5817, і негативно впливає на довговічність і надійність зварних конструкцій [31, 32].

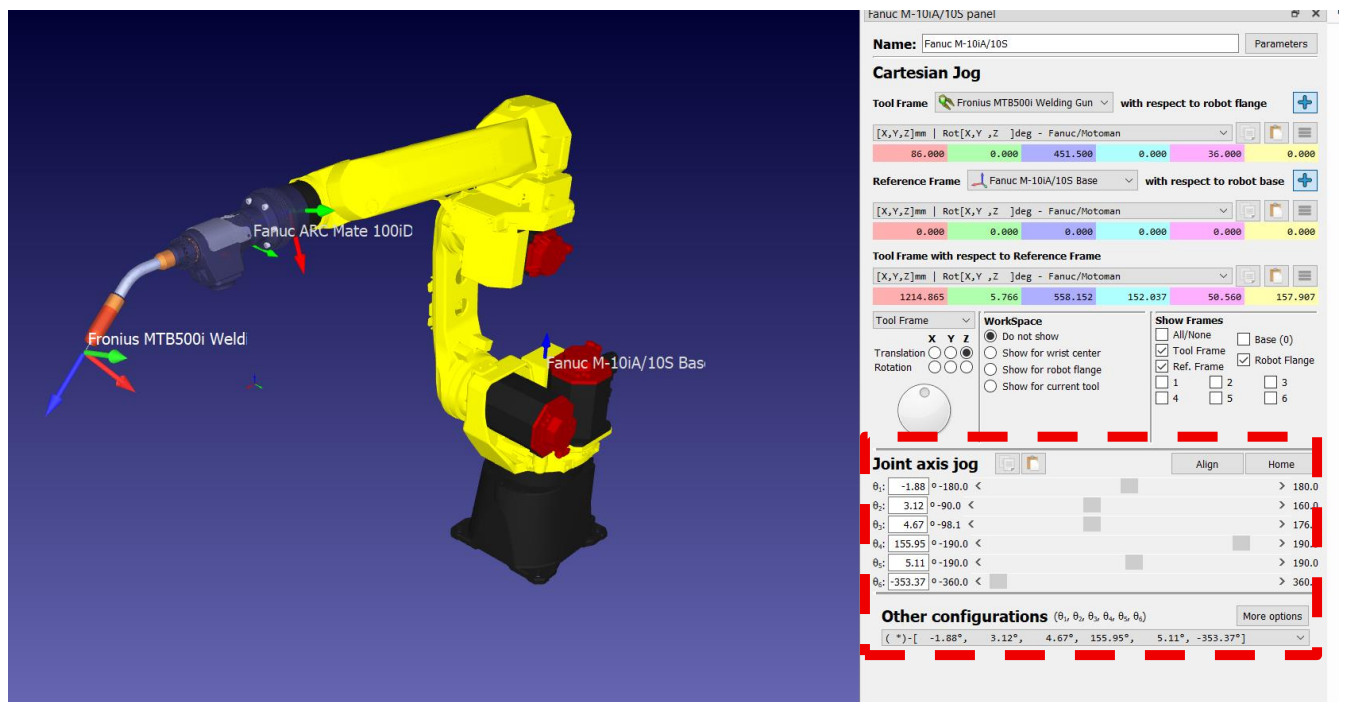
Промисловий робот може керуватися у двох просторах: просторі суглобів та декартовому просторі. У просторі суглобів задається набір кутів повороту або лінійних переміщень окремих ланок, і кожна вісь рухається до цільового значення

незалежно. У декартовому просторі оператор або офлайн-програма задають положення і орієнтацію інструмента, а також тип траєкторії, наприклад пряма лінія вздовж шва, дуга або складна поверхнева крива. Для реалізації такого руху контролер розв'язує задачу оберненої кінематики та оберненої швидкісної кінематики, що для 6-осьового маніпулятора описується співвідношенням  $v = J \cdot \dot{q}$  та  $\dot{q} = J^{-1} \cdot v$ , де  $v$  є вектором декартових швидкостей робочого органа,  $\dot{q}$  вектором швидкостей осей, а  $J$  матрицею Якобі [27, 28]. Коли визначник матриці Якобі наближається до нуля, матриця стає виродженою; це означає, що для деяких напрямків руху неможливо знайти допустимі швидкості осей, і маніпулятор втрачає один ступінь свободи. Саме така конфігурація й називається сингулярністю, а її досягнення чи наближення до неї особливо критичне під час безперервного зварювання довгих швів.

У реальному зварювальному виробництві повна зупинка робота при виході на сингулярність трапляється рідко, оскільки виробники контролерів реалізують механізми захисту. Найпоширеніший із них полягає у різкому обмеженні максимальної швидкості окремих осей та, як наслідок, у суттєвому зменшенні фактичної швидкості переміщення ТСП у межах декартової траєкторії [28, 29]. Інші варіанти включають автоматичну зміну конфігурації, наприклад перехід із положення "no-flip" до "flip" зап'ястя, або легке відхилення від номінальної траєкторії з метою обійти сингулярну область [27]. Для операцій роботизованого MIG/MAG зварювання довгомірних виробів подібні корекції означають зміну швидкості зварювання, кута нахилу пальника, вильоту електрода та довжини дуги, що безпосередньо впливає на форму валика, глибину проплавлення, ширину зони термічного впливу та, зрештою, на тип і розмір дефектів, регламентованих ISO 6520-1 та обмежених рівнями якості за ISO 5817 [31, 32].



a)

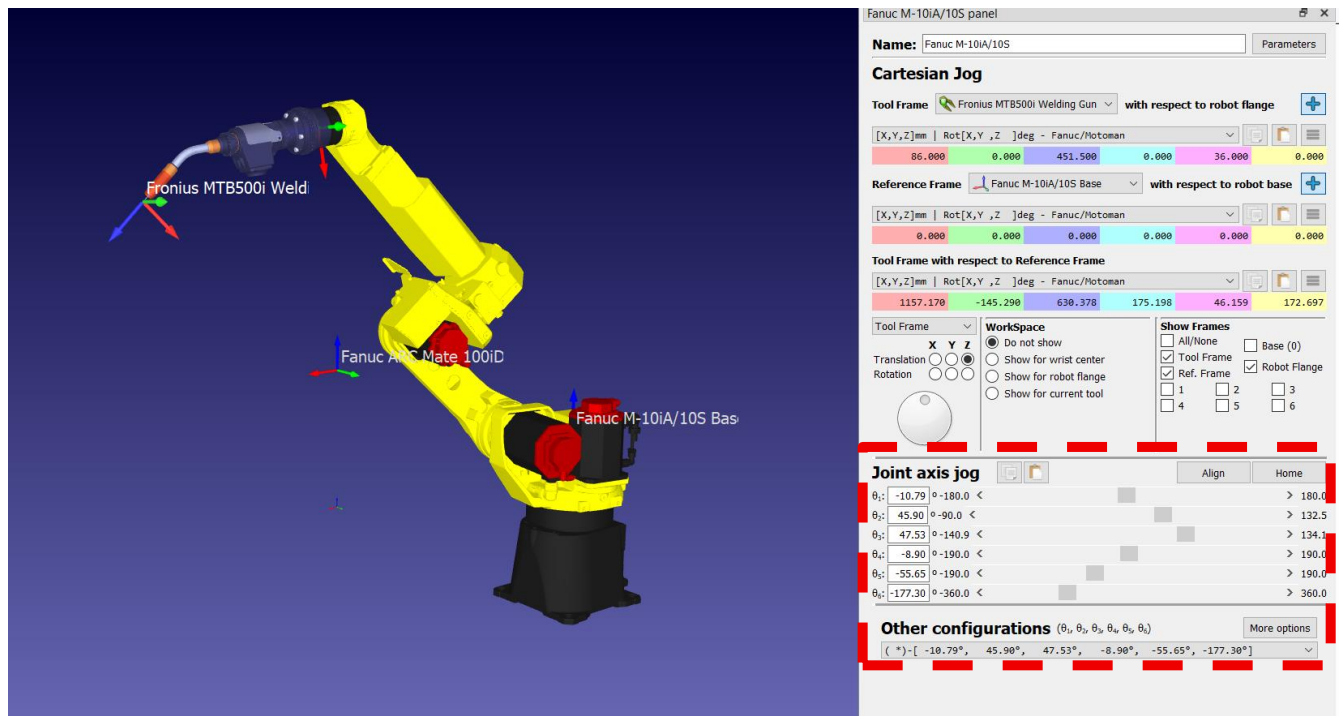


б)

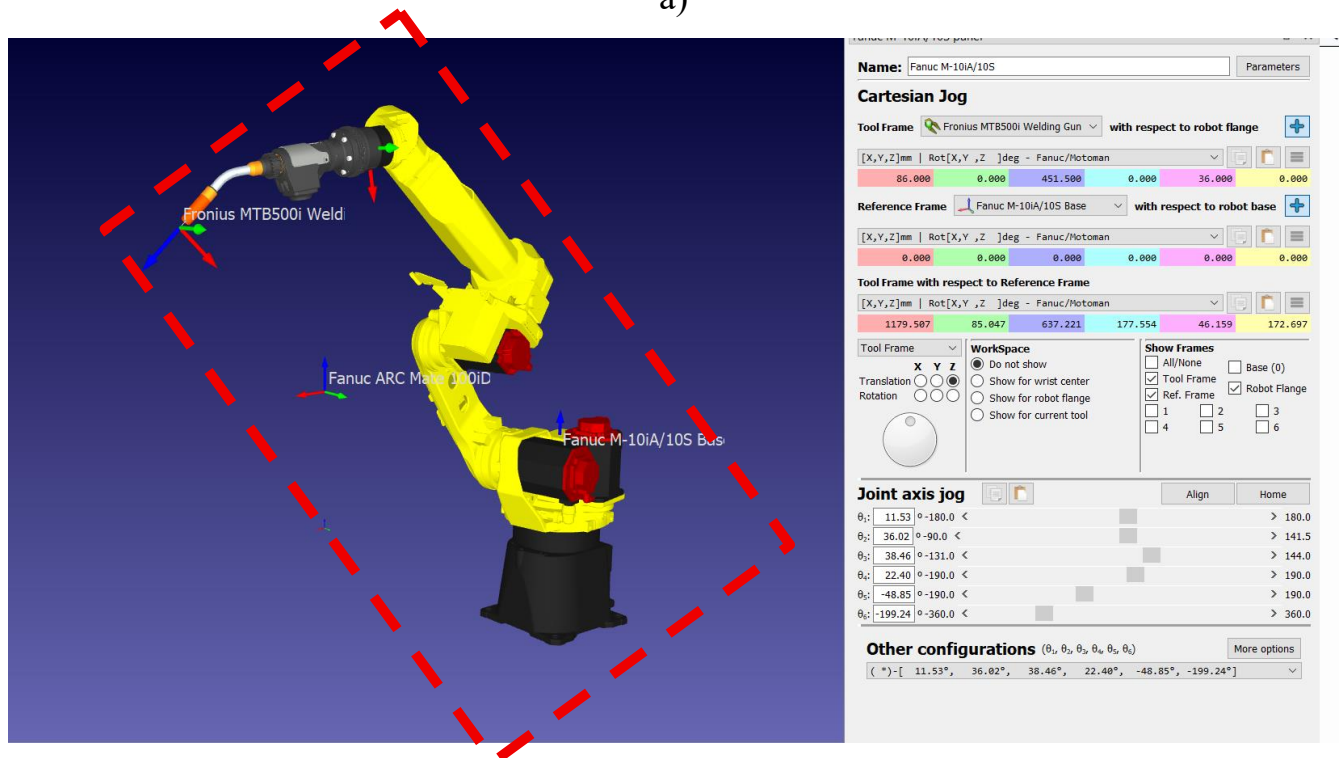
Рисунок 2.3 Сингулярність зап'ястя при лінійному переміщенні робота по осі Х зварювального пальника в декартовому просторі на 10 мм з похідної точки (а) до кінця шва (б). Вісь 4 змінила свою позицію з  $0^{\circ}$  до  $156^{\circ}$  за 1 сек.

Класична архітектура більшості 6-осьових зварювальних роботів, побудована за типом UR-подібних конструкцій, передбачає наявність трьох основних типів сингулярностей: зап'ясткова, ліктьова та плечова [27, 29]. Зап'ясткова сингулярність виникає, коли осі суглобів, що формують орієнтацію зап'ястя, стають співпадаючими або паралельними, частіше за все коли кут обертання середнього суглоба зап'ястя прямує до нуля. У цій конфігурації нескінченно багато комбінацій кутів осей дають одну й ту саму орієнтацію інструмента, що призводить до деградації керованості та різких змін кутових швидкостей [27]. Ліктьова сингулярність реалізується, коли ланки "плече" та "передпліччя" практично витягнуті в одну лінію, тобто центр зап'ястя лежить у площині, що проходить крізь осі другого та третього суглобів. Плечова сингулярність пов'язана з розташуванням центру зап'ястя у площині, що містить вісь першого суглоба та паралельна осі другого. У всіх цих випадках втрата одного ступеня свободи відображається на можливості плавного і безперервного ведення пальника вздовж зварного шва, особливо якщо шов довгий і проходить через зони, близькі до геометричного центру робота або до межі його робочого простору [27–29].

При зварюванні довгомірних деталей робот, як правило, працює в декартовому режимі руху вздовж шва, щоб забезпечити рівномірну швидкість та постійну орієнтацію пальника відносно стику. Коли траєкторія проходить поблизу сингулярної конфігурації, контролер, з одного боку, намагається виконати задану декартову швидкість, а з іншого, змушений обмежувати швидкості осей, які виходять на недопустимо великі значення. Результатом є або різке зменшення фактичної швидкості зварювання на ділянці шва, або тимчасова втрата точності орієнтації і відхилення ТСП від лінії шва на кілька міліметрів [27, 33].

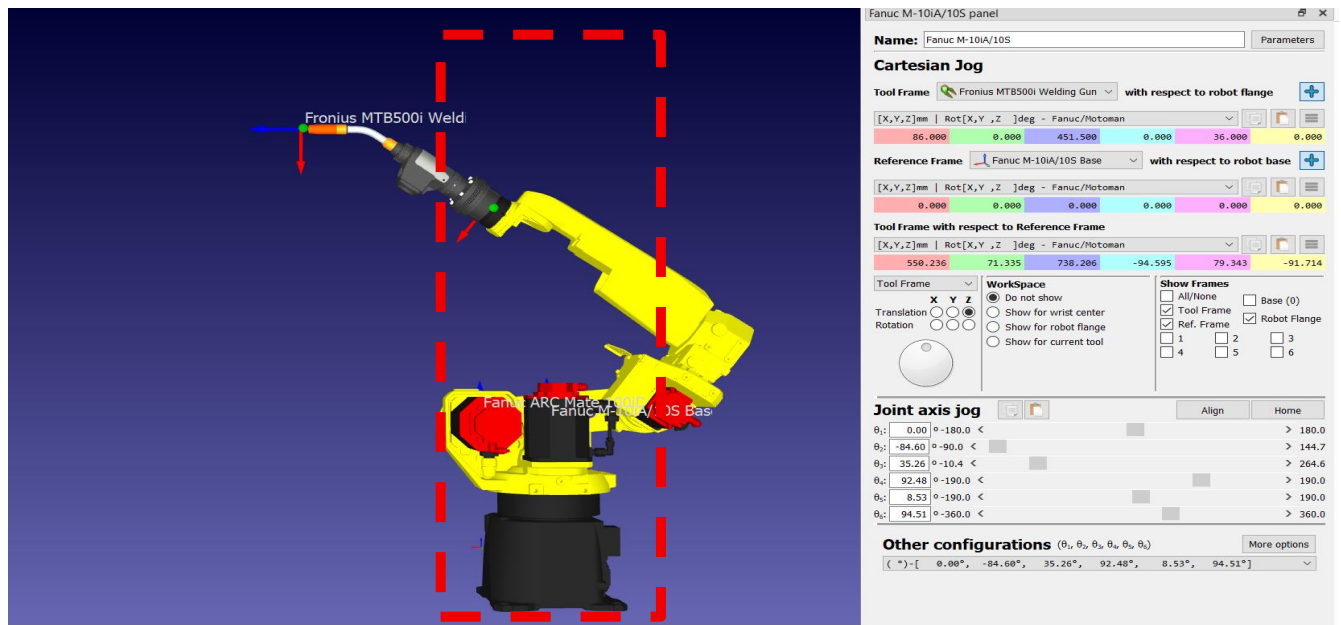


a)

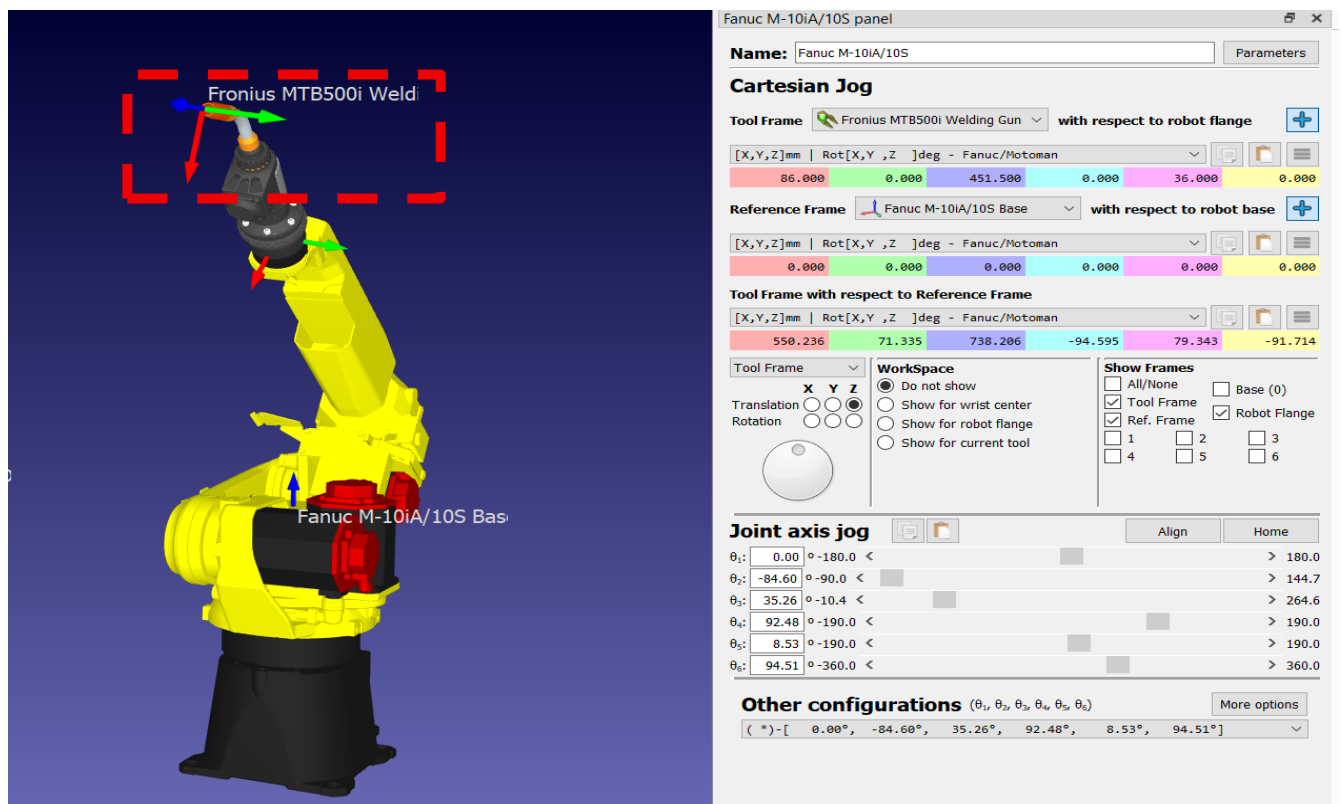


б)

Рисунок 2.4 Сингулярність ліктьова при лінійному переміщенні робота по осі X зварювального пальника в декартовому просторі на 10 мм з похідної точки (а) до кінця шва (б). Переміщення робота заблоковано в кінці зварювання заблоковано.



a)



б)

Рисунок 2.3 Сингулярність плеча при лінійному переміщенні робота по осі Y зварювального пальника в декартовому просторі на 10 мм з похідної точки (а) до кінця шва (б) практично заблоковано.

Для процесу MIG/MAG це означає зміну лінійної енергії зварювання, перерозподіл тепловкладення та зміну взаємодії крапель металу електрода з ванною, що призводить до утворення дефектів з груп "непровар" (група 4 за ISO 6520-1), "підріз" та "коливання ширини шва і підсилу" (група 5), а також до локального збільшення пористості [31, 32].

Особливість зварювання довгомірних швів полягає в тому, що сингулярні зони можуть повторюватися від проходу до проходу, формуючи систематичний характер дефектів. На відміну від ручного дугового зварювання, де розкид параметрів визначається людським фактором, у роботизованих системах помилка траєкторії або конфігурації у зоні сингулярності відтворюється однаково на кожній деталі [26, 33]. Якщо, наприклад, плечова сингулярність виникає на висоті близько середини вертикального шва на рамі, то для всієї серії рам саме у цій зоні формуватимуться підрізи або локальні непровари, що буде виявлено під час неруйнівного контролю, наприклад ультразвуковою або рентгенографічною дефектоскопією [30–32]. Таким чином, сингулярність стає не лише кінематичною, а й технологічною проблемою.

Характер дефектів, які утворюються в зоні сингулярності, суттєво залежить від просторового положення шва. У нижньому положенні (позиція PA за ISO 6947) коливання швидкості та кута нахилу пальника частіше призводять до зміни ширини та висоти валика, локальних переплавів та невеликих підрізів, однак сили тяжіння сприяють стабілізації ванни і частково "маскують" вплив нестабільності руху [31]. У горизонтальному кутовому положенні (PB) можливе формування асиметричного шва з недостатнім проплавленням однієї стінки при відхиленні пальника, зокрема якщо у зоні сингулярності зростає кут між віссю пальника та бісектрисою кута шва. У вертикальному положенні (PF або PG) вплив сингулярності найбільш критичний, оскільки навіть короточасне зниження швидкості спричиняє перегрів ванни, стікання металу, підрізи по верхній межі шва, а також збільшення ширини та

опуклості валика [30, 35]. Для стельових швів (РЕ) будь-яка нестабільність швидкості та орієнтації може призвести до випадання крапель металу, утворення кратерів і локальних непроварів у корені шва.

Зап'ясткова сингулярність у процесі зварювання довгих швів проявляється передусім через втрату стійкого керування орієнтацією пальника. Коли осі двох обертальних суглобів зап'ястя стають співпадаючими або майже співпадаючими, будь-яке невелике задання кутової швидкості навколо осі, нормальної до площини цих осей, вимагає дуже великих швидкостей від цих суглобів [27–29]. Контролер, обмежуючи ці швидкості, фактично вимушений "заморозити" орієнтацію пальника або змінити її не так, як передбачено програмою. У зварювальному процесі це проявляється у тимчасовому відхиленні кута нахилу пальника, зміні кута атаки відносно напрямку шва, зміщенні вильоту електрода. Відповідно формуються подрізи, асиметричні валики, локальні зони недостатнього проплавлення однієї з кромок, що за ISO 5817 найчастіше відповідає переходу від рівня якості В або С до рівня D чи відбраковці [31, 32].

Ліктьова сингулярність пов'язана із конфігурацією, коли "плече" і "передпліччя" робота майже витягнуті в пряму лінію. У цій ситуації невеликі переміщення TCP в напрямках, ортогональних до цієї лінії, вимагають дуже великих кутових швидкостей на осях 2 і 3. Під час зварювання довгомірних деталей це найчастіше трапляється, коли виріб розміщено на відносно великій відстані від основи робота, наприклад при зварюванні довгої рами або балки на роликовому стенді [26, 29]. Якщо траєкторія зварювання проходить через ділянку, де центр зап'ястя наближається до площини осей 2 і 3, то будь-яке прагнення контролера зберегти задану декартову швидкість призводить до піків кутових швидкостей і, як наслідок, до тимчасового падіння фактичної швидкості зварювання або до "скачкоподібних" змін положення пальника. Ці ефекти проявляються у чергуванні ділянок шва з нормальною структурою та ділянок з перегрівом або недогрівом

металу, неоднорідністю ширини шва, локальними зонами пористості та невідповідностями за геометричними критеріями ISO 5817 [30–32].

Плечова сингулярність, яка виникає, коли центр зап'ястя наближається до площини осей 1 і 2, особливо небезпечна для вертикальних швів на довгих деталях, розташованих близько до основи робота. У цій конфігурації робот фактично втрачає здатність рухатися в напрямку осі другого суглоба без великих поворотів першої та інших осей, що означає різкі змінні компоненти кутових швидкостей при спробі виконати рівномірний рух вздовж шва [27, 29]. Для MIG/MAG зварювання це обертається неможливістю утримувати сталу швидкість та положення пальника, що спричиняє систематичне формування дефектів у певних ділянках шва, наприклад у середній частині вертикального ребра жорсткості на рамі.

Для кількісної ілюстрації впливу сингулярності на якість вертикального шва розглянемо довгомірний кутовий шов на стійці рами висотою 2,4 м. Роботизований комплекс з шестивісевим маніпулятором та джерелом MIG/MAG зварює вертикальний вгору кутовий шов у положенні PF. Номінальний режим процесу: напруга  $U = 21$  В, струм  $I = 210$  А, коефіцієнт корисної дії  $\eta = 0,8$ , задана швидкість зварювання  $v_{\text{ном}} = 0,35$  м/хв. Лінійна енергія процесу в нормальних умовах становить  $q_{\text{ном}} = \eta \cdot U \cdot I / v_{\text{ном}} \approx 0,8 \cdot 21 \cdot 210 / 0,35 \approx 0,8 \cdot 4410 / 0,35 \approx 3528 / 0,35 \approx 10\,080$  Дж/м, тобто приблизно 0,10 кДж/мм, що відповідає діапазону, рекомендованому для вертикальних швів на сталях товщиною 6–8 мм [30, 31].

Приблизно на висоті 1,6 м траєкторія пальника проходить через конфігурацію, близьку до плечової сингулярності. Згідно з кінематичним аналізом, вектор швидкостей осей, що відповідає заданій декартовій швидкості, вимагає від першої та другої осей кутових швидкостей, які перевищують допустимі значення у 2–3 рази [27, 28]. Контролер, забезпечуючи пріоритет обмеженню осьових швидкостей, автоматично зменшує фактичну швидкість ТСР до  $v_{\text{ф}} \approx 0,18$  м/хв на відрізок довжиною близько 150 мм. При цьому електричні параметри горіння дуги

залишаються незмінними. Лінійна енергія у цій зоні зростає до  $q_f \approx 0,8 \cdot 21 \cdot 210 / 0,18 \approx 3528 / 0,18 \approx 19\,600$  Дж/м, тобто близько 0,20 кДж/мм, тобто майже у два рази більше від номінального значення.

Це означає значне збільшення ширини зони термічного впливу та перегрів металу у верхній частині валика, що для вертикального вгору положення проявляється у стіканні ванни, формуванні опуклого та широкого шва, появи подрізів по верхній межі та можливому утворенні гарячих тріщин у кратерах [30, 34]. Неруйнівний контроль такої ділянки, наприклад капілярним методом та візуально-оптичним оглядом, виявить подрізи глибиною до 0,8–1,0 мм на протязі 100–120 мм та локальні кратерні дефекти. За ISO 5817 такі подрізи можуть не відповідати рівню якості В і навіть С для відповідальних елементів, що працюють при втомному навантаженні, та вимагатимуть виправлення [31, 32].

Ситуацію погіршує те, що в зоні сингулярності порушується не лише швидкість, а й орієнтація пальника. Через погіршення оберненої кінематики контролер не здатний зберігати точний кут нахилу пальника, наприклад передбачені  $10^\circ$  "на відведення" від вертикалі для вертикального вгору шва. Фактичні вимірювання траєкторії за допомогою систем технічного зору або трекерів показують, що у зоні плечової сингулярності кут нахилу змінюється від  $5^\circ$  до  $20^\circ$ , а відхилення ТСП від розрахункової лінії шва може досягати 1,5–2 мм [33]. У результаті на частині перерізу зменшується глибина проплавлення, формуються зони неповного провару з боку однієї кромки, що за класифікацією ISO 6520-1 відповідає непровару по бічній стінці шва [31]. Таким чином, по висоті довгого вертикального шва формується небажана комбінація двох типів дефектів: подрізи та перегрітий метал у зоні зниженої швидкості і непровари в зоні подальшого "наздоганяючого" прискорення, коли контролер намагається повернутися до номінальної швидкості.

З точки зору довговічності така комбінація дефектів є особливо небезпечною. Підрізи збільшують коефіцієнт концентрації напружень на поверхні шва, а непровари поєднують геометричний концентратор із локально ослабленою несучою площею поперечного перерізу [30, 35]. Для рам та балок, що працюють при циклічному згинально-крутильному навантаженні, це означає зниження втомної міцності, що за даними досліджень впливу геометрії зони переходу від шва до основного металу може досягати 30–50 відсотків порівняно з аналогічними швами без підрізів [35]. Враховуючи, що сингулярність виникає в одній і тій самій зоні на всіх виробах серії, систематична поява дефектів саме в цьому місці призведе до того, що ймовірність втомного руйнування буде сконцентрована у невеликому діапазоні координат по довжині виробу, що вкрай небажано з позицій надійності.

Вибір положення зварного шва в просторі у поєднанні з конфігурацією роботизованої комірки безпосередньо визначає, наскільки близько траєкторії зварювання наблизатимуться до сингулярних областей. Якщо довгомірною деталь розташована на поворотному або поворотно-похилому позиціонері так, що більшість швів виконується у нижньому положенні за відносно компактного розташування робота, то сингулярності, як правило, вдається повністю уникнути, а продуктивність та якість швів зростають [26, 29]. Якщо ж деталь закріплена жорстко, без можливості повороту, або вона має значну висоту чи радіус, то траєкторії довгих вертикальних або горизонтальних швів неминуче проходитимуть поруч із сингулярними конфігураціями, що вимагатиме спеціальних заходів з обмеження швидкості, зміни конфігурації "перед/за" відносно осі 1, розбиття шва на декілька сегментів з перегрупуванням робота між ними [27, 33]. Такий підхід дає змогу зменшити вплив сингулярностей, але збільшує тривалість циклу, отже виникає компроміс між продуктивністю та стабільністю якості і довговічністю.

У цьому контексті важливу роль відіграють інтегровані системи офлайн-програмування та моделювання, які дозволяють на етапі проектування технології

зварювання проаналізувати кінематичні траєкторії, виявити потенційні зони сингулярностей, оцінити максимальні значення кутових швидкостей осей та відхилення ТСР від номінальної траєкторії [26, 29, 33]. Застосування таких систем дає змогу змінити розташування деталі у просторі, скоригувати орієнтацію робота, додати допоміжні осі переміщення, а також оптимізувати послідовність зварювання так, щоб формування критичних швів відбувалося у ділянках робочого простору, максимально віддалених від сингулярних конфігурацій. Практика показує, що правильно спроектована роботизована комірка дозволяє одночасно забезпечити високий рівень продуктивності, знизити частку дефектів, пов'язаних із сингулярністю, та підвищити ресурс конструкцій [26, 30, 35].

## 2.2. Моделювання тепловкладення при роботизованому MIG/MAG зварюванні в середовищі Abaqus

Комп'ютерне моделювання процесів зварювання довгомірних деталей із використанням методу скінченних елементів є ключовим інструментом для прогнозування температурних полів, залишкових напружень та деформацій, а також для оцінки ризику утворення дефектів ще на етапі проєктування технології. Для роботизованого MIG/MAG зварювання, де швидкість руху пальника та стабільність траєкторії можуть змінюватися під впливом кінематичних особливостей робота, включно із сингулярностями, адекватне відтворення тепловкладення стає принциповим. Серед реалізованих у сучасних програмних комплексах підходів важливе місце посідає техніка поетапної активації та деактивації елементів, яку в термінології Abaqus зазвичай пов'язують із моделлю зміни структури (model change) та методикою birth and death. Такий підхід дозволяє послідовно “вмикати” елементи в зоні зварного шва відповідно до руху джерела тепла і, таким чином, наближено імітувати реальну послідовність формування шва та його охолодження.

Теоретичною основою моделювання тепловкладення при зварюванні є нестационарне рівняння теплопровідності, яке для ізотропного тіла у диференціальній формі пов'язує густину, теплоємність, коефіцієнт теплопровідності та функцію внутрішніх джерел тепла з часовою зміною температурного поля. У випадку дугового MIG/MAG зварювання внутрішнє джерело описує потужність дуги, яка передається у метал, та розподіляється по об'єму або поверхні в околі дуги. Інтегральною характеристикою процесу є лінійна енергія  $q$ , що визначається як  $q = \eta \cdot U \cdot I / v$ , де  $\eta$  є коефіцієнтом корисної дії процесу,  $U$  напругою дуги,  $I$  струмом, а  $v$  швидкістю зварювання. Для довгомірних швів ця величина часто змінюється вздовж координати шва, зокрема внаслідок зміни швидкості руху пальника при проходженні кінематично складних ділянок або сингулярних положень робота. Тому при побудові моделі необхідно забезпечити можливість задання просторово-часового розподілу теплового потоку з урахуванням цієї зміни.

У класичних моделях зварювання широко застосовуються ідеалізовані теплові джерела типу двоеліпсоїдної моделі Голдака, моделі поверхневого гаусового джерела або комбінацій об'ємного і поверхневого навантаження, які дозволяють відтворити характерні форми проплавлення та ширину зони термічного впливу. В Abaqus подібні джерела реалізують або через вбудовані можливості задання об'ємного або поверхневого теплового потоку, або через користувацькі підпрограми (наприклад DFLUX), які призначають щільність теплового потоку у функції просторових координат та часу. Однак для моделювання довгих швів на великогабаритних деталях важливим є не лише форма джерела, а й спосіб представлення самої зони зварного металу. Саме цьому відповідає техніка *element birth and death*, за якої елементи майбутнього шва спочатку перебувають у пасивному (деактивованому) стані, а потім послідовно активуються відповідно до умовного “руху” дуги вздовж шва.

Сутність техніки birth and death полягає в тому, що в початковому стані усі елементи зони шва деактивовані, тобто не беруть участі в розрахунку, не проводять тепло та не накопичують енергію. У процесі розрахунку в окремих кроках аналізу частини цих елементів “оживають” шляхом зміни їхнього статусу через відповідну взаємодію типу model change з параметром reactivate, після чого вони набувають заданих матеріальних і теплофізичних властивостей. Таким чином, формально імітується поява зварювального металу в міру руху дуги, а теплове навантаження прикладається до тільки що активованих елементів. У Abaqus цей підхід реалізують через створення окремого геометричного домену для шва, його розбиття на сегменти вздовж лінії шва, формування елементних наборів (sets) для кожного сегмента та поетапну активацію цих наборів у окремих кроках розрахунку, які відповідають послідовним положенням зварювального пальника.

Практична реалізація такого підходу при моделюванні роботизованого MIG/MAG зварювання довгомірних деталей включала кілька етапів. Спочатку створювали тривимірну модель основного металу у вигляді екструдованого суцільного тіла, прямокутної пластини заданої товщини та довжини (рис. 2.4). Далі на поверхні моделі виконували партіціювання з метою виділення зони шва в плані, у вигляді трикутного профілю, який відповідає геометрії шва (рис.2.5). Цю область екструдовано вздовж довжини шва, що формує тривимірний об’єм зварного металу, який далі розбивали на рівні за довжиною чотири сегменти через додаткові площини розрізу (рис. 2.6). Кожен із сегментів оголошували окремим елементним набором - part1, part2, part3, part4, які відповідали умовній послідовності накладання шва.

Після геометричного розбиття та задання сітки елементів призначали матеріальні властивості. Для сталі це температурозалежна густина, теплопровідність, питома теплоємність, а за потреби і температурозалежні механічні характеристики, якщо надалі планується термопружний або

термопластичний аналіз. Зварний метал описували тими самими теплофізичними властивостями, що й основний, або з урахуванням відмінностей у хімічному складі присадкового дроту. На етапі складання модель збирали як одне ціле, оскільки шов та основний метал мають спільні границі. Далі створювали кроки розрахунку типу *heat transfer*, які відповідають послідовним етапам зварювання та подальшого охолодження. У першому кроці задали розігрів першого сегмента шва, у наступних активацію наступних сегментів та відповідне локальне теплове навантаження. Після завершення останнього “зварювального” кроку додавали тривалий крок охолодження, де джерело тепла відсутнє і модель віддає тепло у навколишнє середовище через конвекцію і випромінювання.

Паралельно із задачею поетапної активації елементів задавали граничні умови та теплове навантаження. На вільних поверхнях деталі зазвичай застосовували конвективний теплообмін з коефіцієнтом тепловіддачі, який залежить від умов охолодження, та температурою навколишнього середовища, наприклад 30 °C. У Abaqus це реалізовували через *interaction property* типу *film condition*, де задавали коефіцієнт тепловіддачі як функцію температури та “температуру теплової ванни”. Теплове джерело задавали у вигляді об’ємного теплового потоку (*body heat flux*), прикладеного до активованих елементів шва на відповідному кроці. Величину потоку обирали так, щоб забезпечити еквівалентність між потужністю дуги  $P = \eta \cdot U \cdot I$  та інтегралом теплового навантаження по об’єму, який перебуває під дією джерела у даний момент.

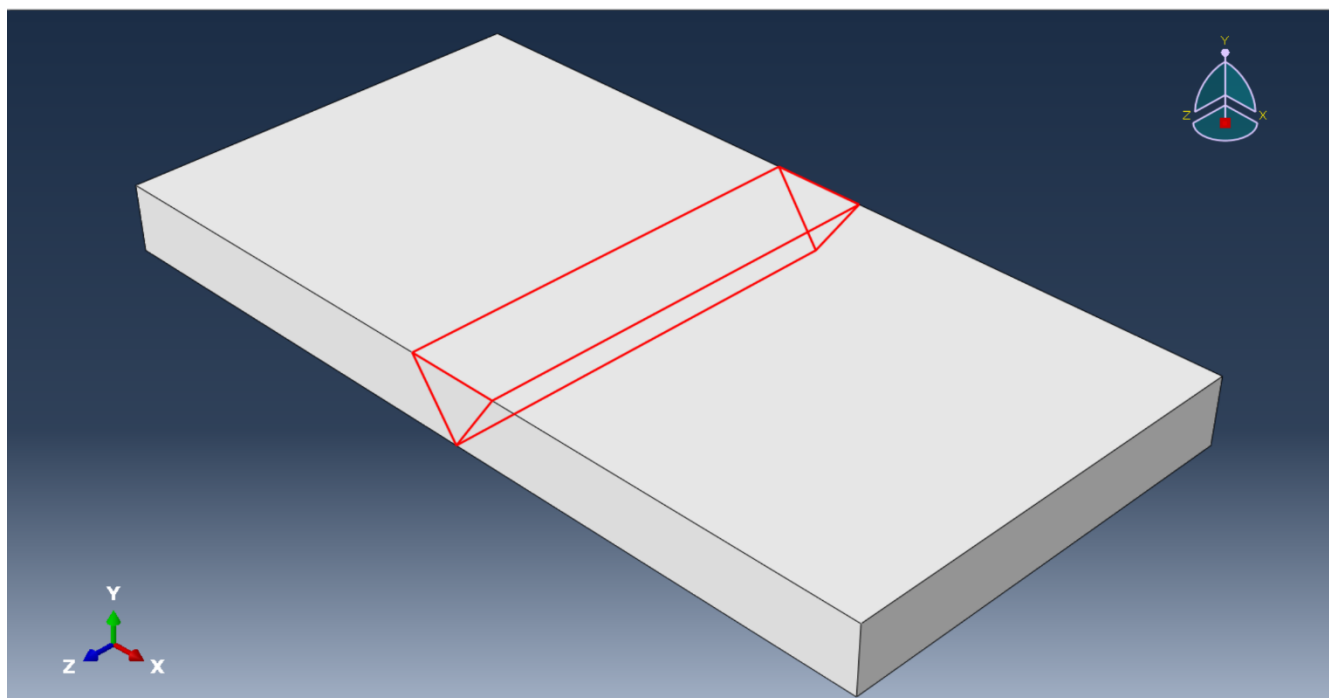


Рисунок 2.4 Загальний вигляд твердотільної моделі з кромками під кутом  $45^\circ$

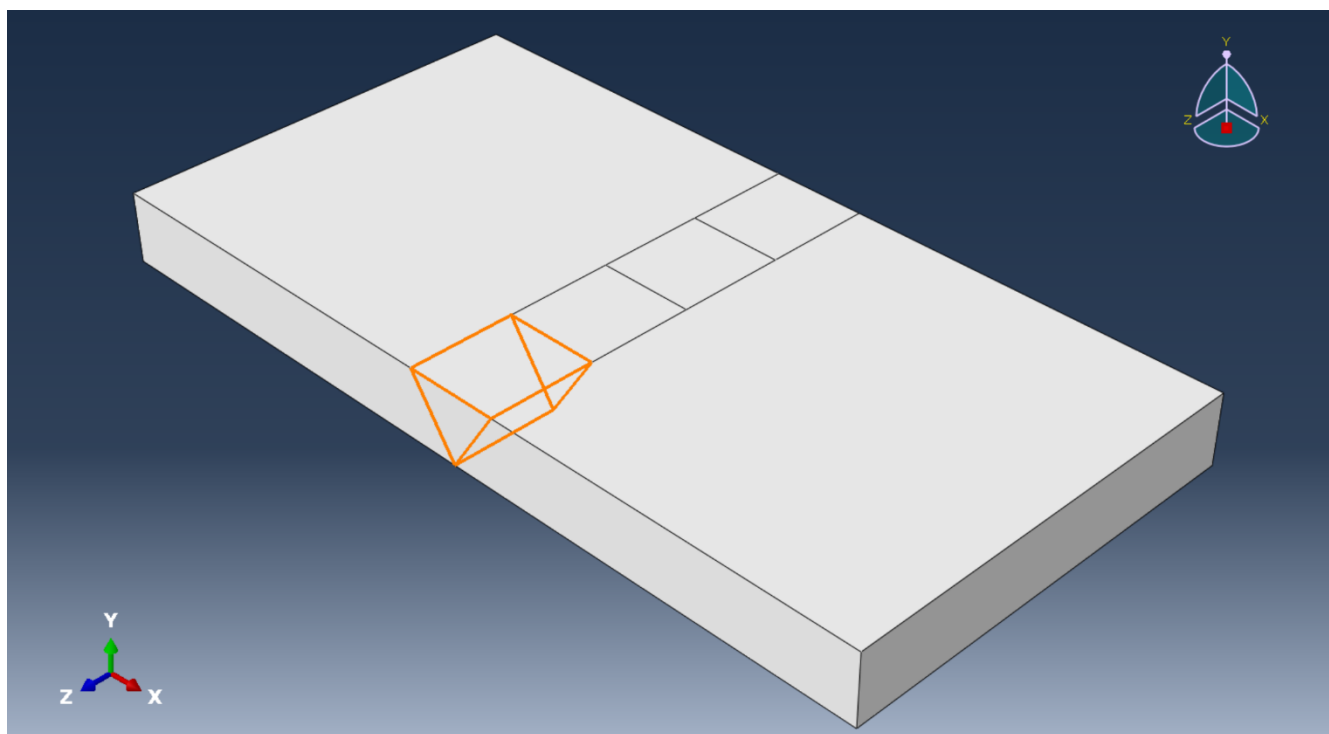


Рисунок 2.5 Розбиття моделі на об'єми, що відповідають фрагментам зварного шва

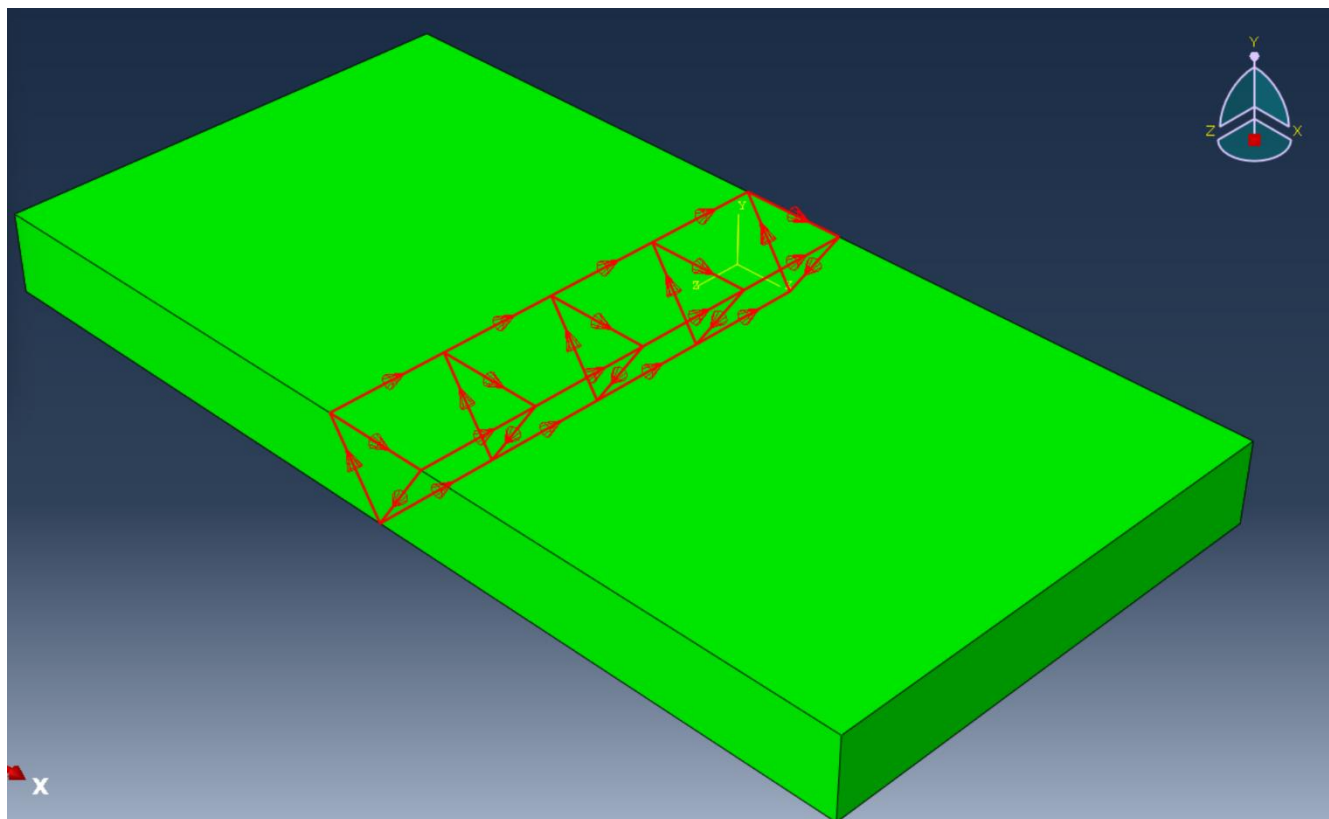


Рисунок 2.6 Розбиття моделі на об'єми, що відповідають фрагментам зварного шва

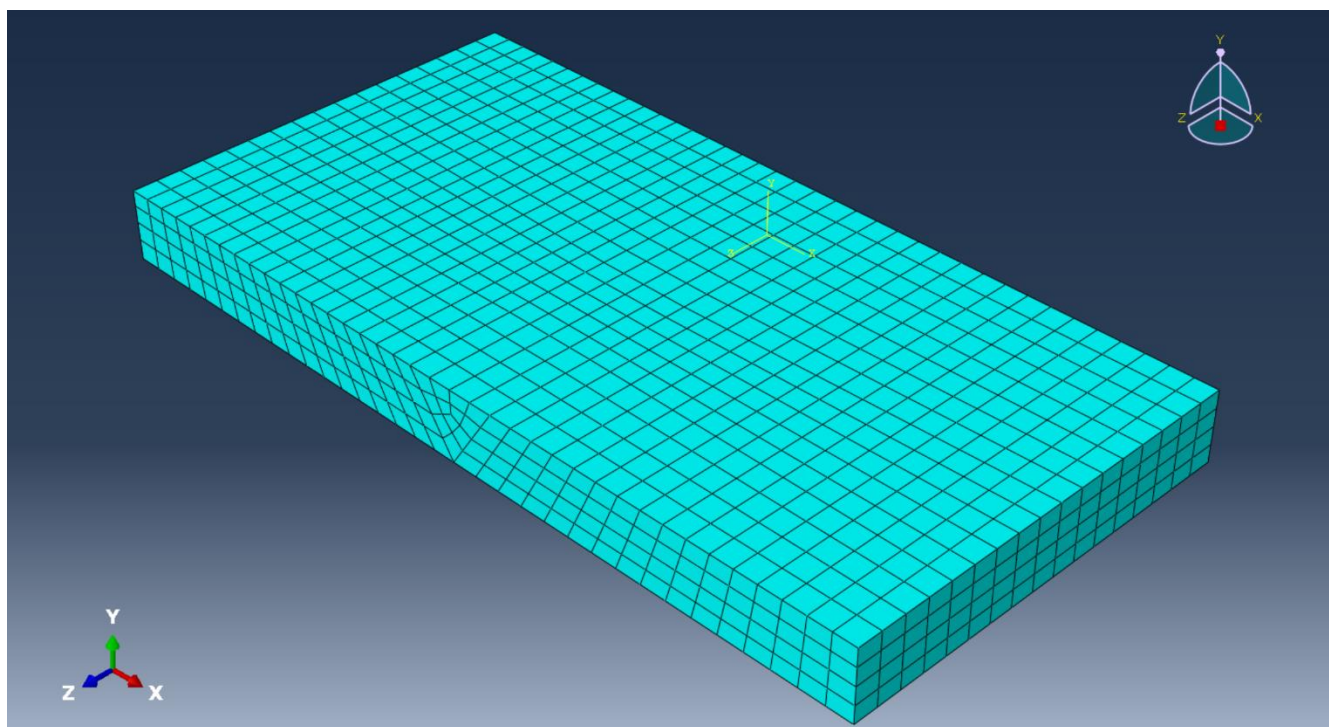


Рисунок 2.7 Рівномірне розташування кінцевих елементів

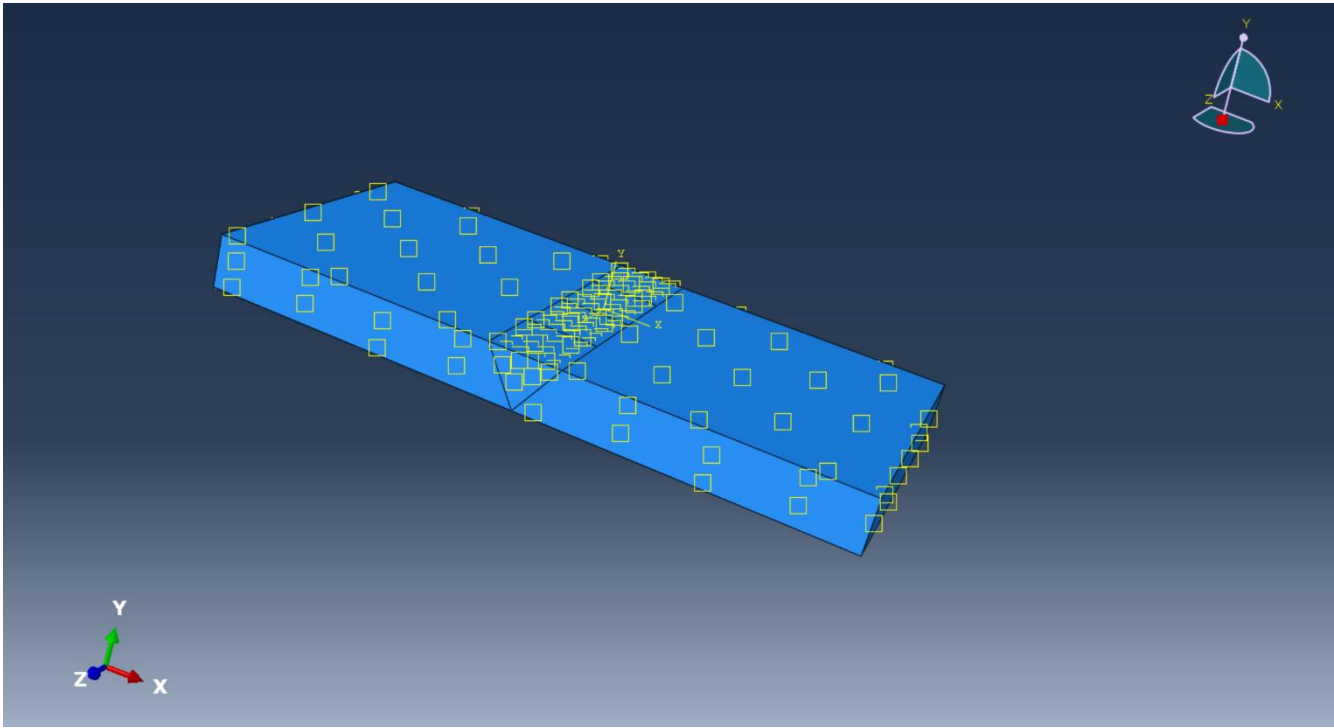


Рисунок 2.8 Прикладення граничних умов для розрахунку

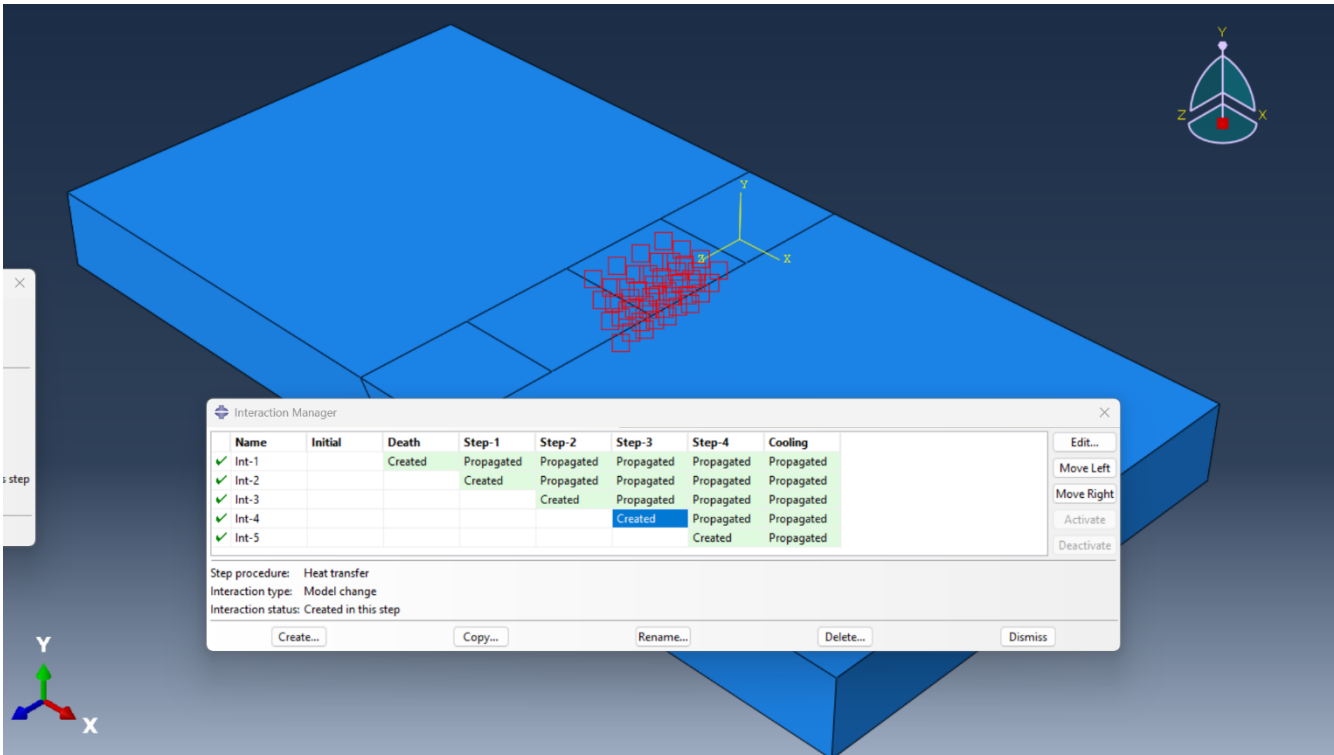


Рисунок 2.9 Кроки народження та смерті елементів при розрахунку тепловкладення

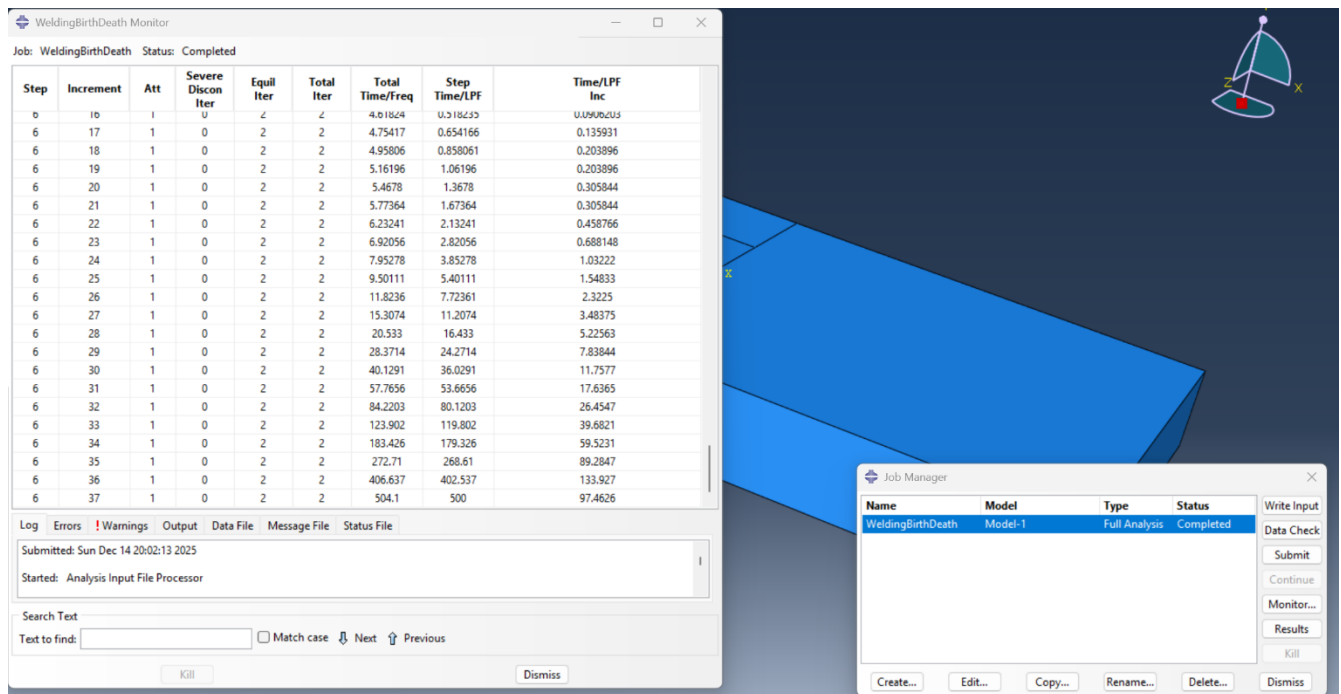


Рисунок 2.10 Результати розрахунку з врахуванням температурно-залежних властивостей матеріалу – Conductivity, Density та Specific Heat

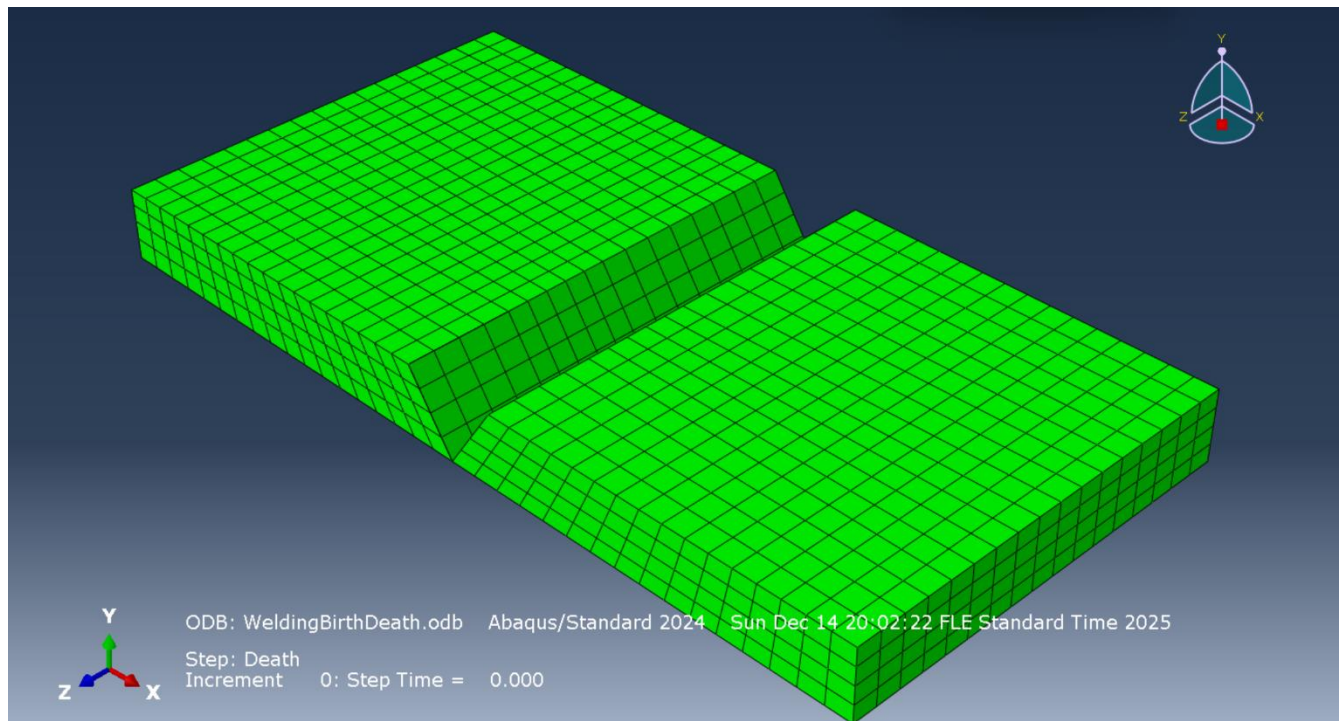


Рисунок 2.11 Базовий об'єм матеріалу перед роботизованим зварюванням

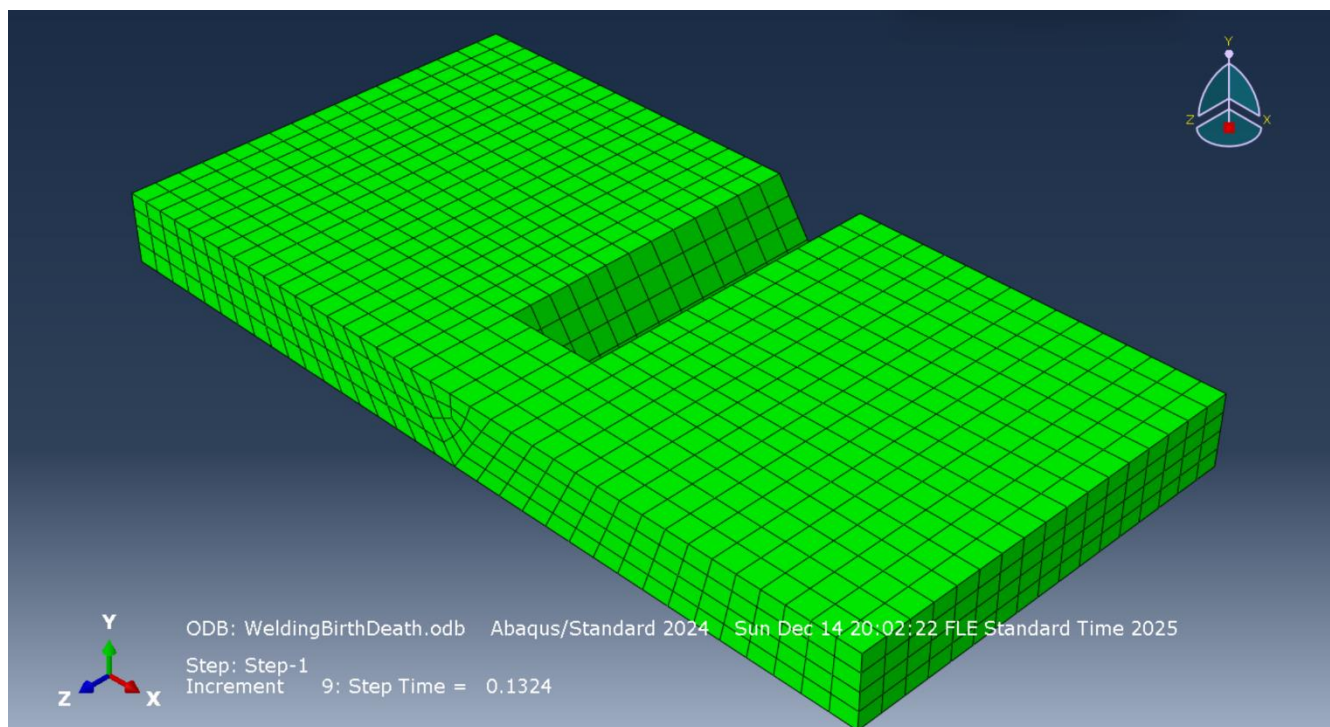


Рисунок 2.12 Об'єм матеріалу при роботизованому зварюванні на 1 кроці аналізу

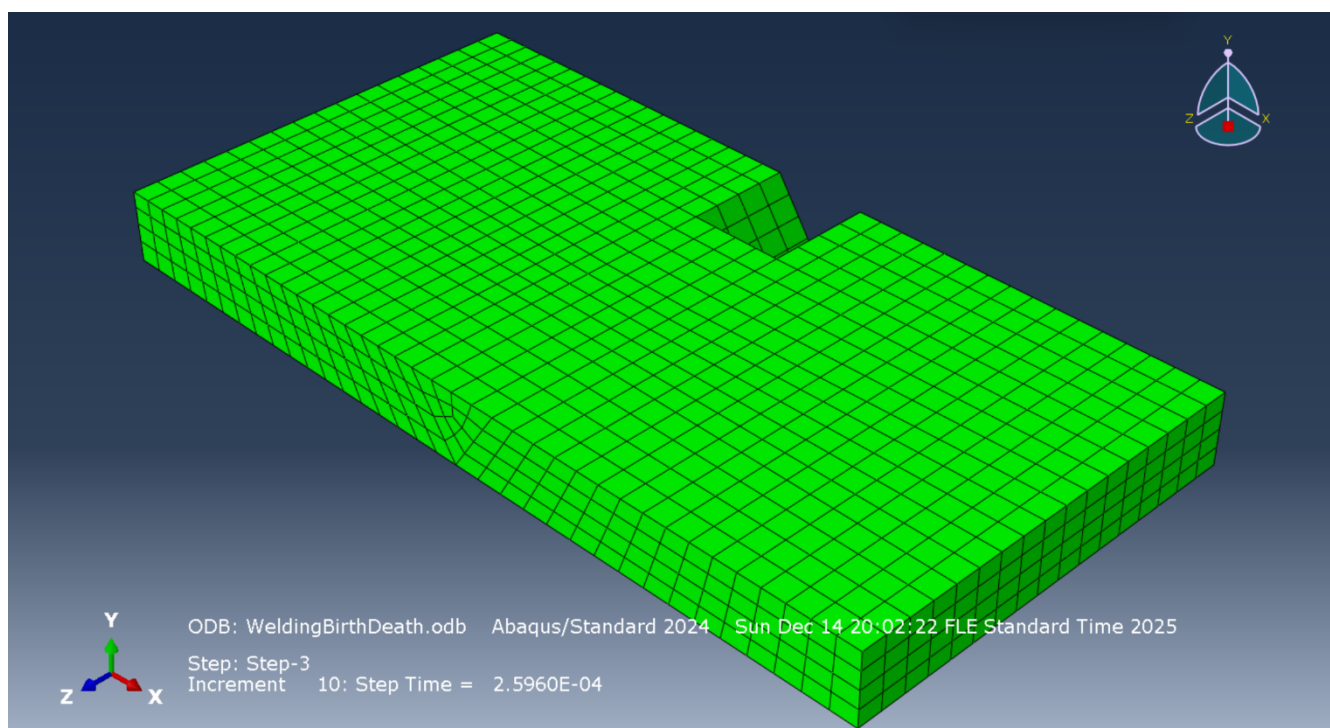


Рисунок 2.13 Об'єм матеріалу при роботизованому зварюванні на 3 кроці аналізу

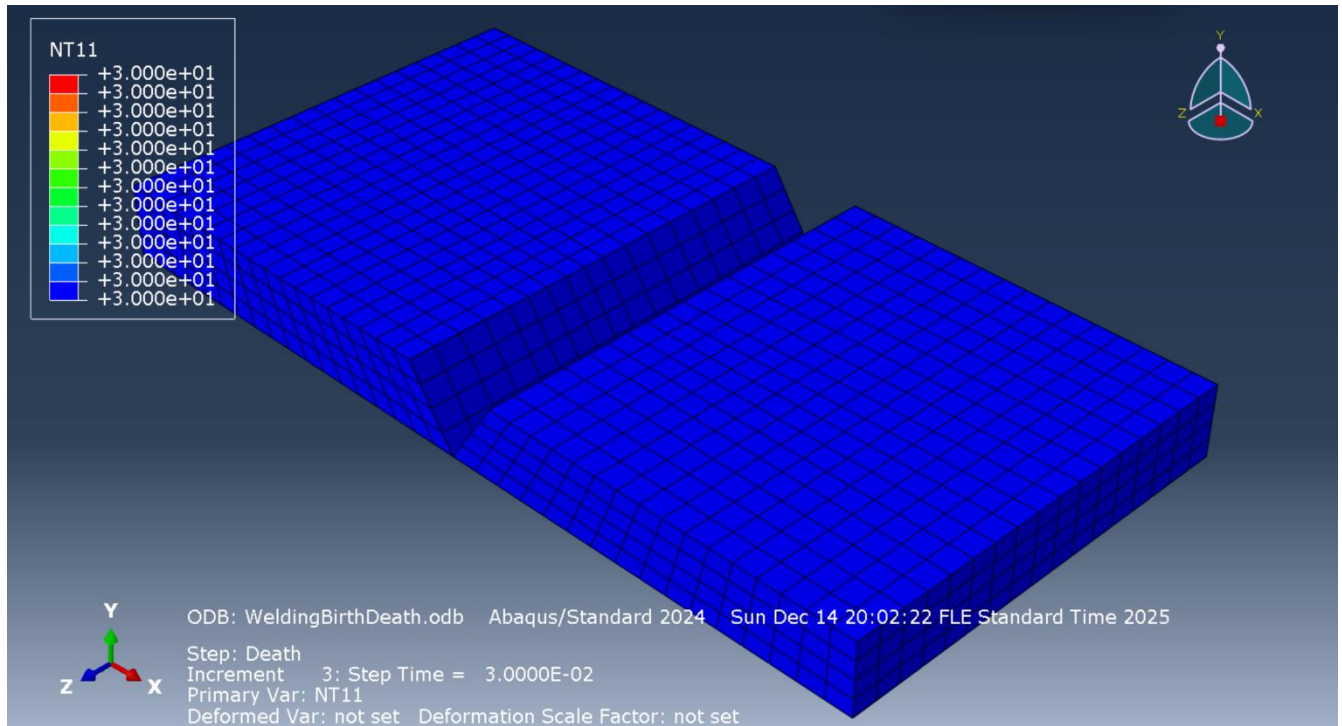


Рисунок 2.14 Похідни стан матеріалу перед роботизованим зварюванням  
рівномірний розподіл температури 30°C

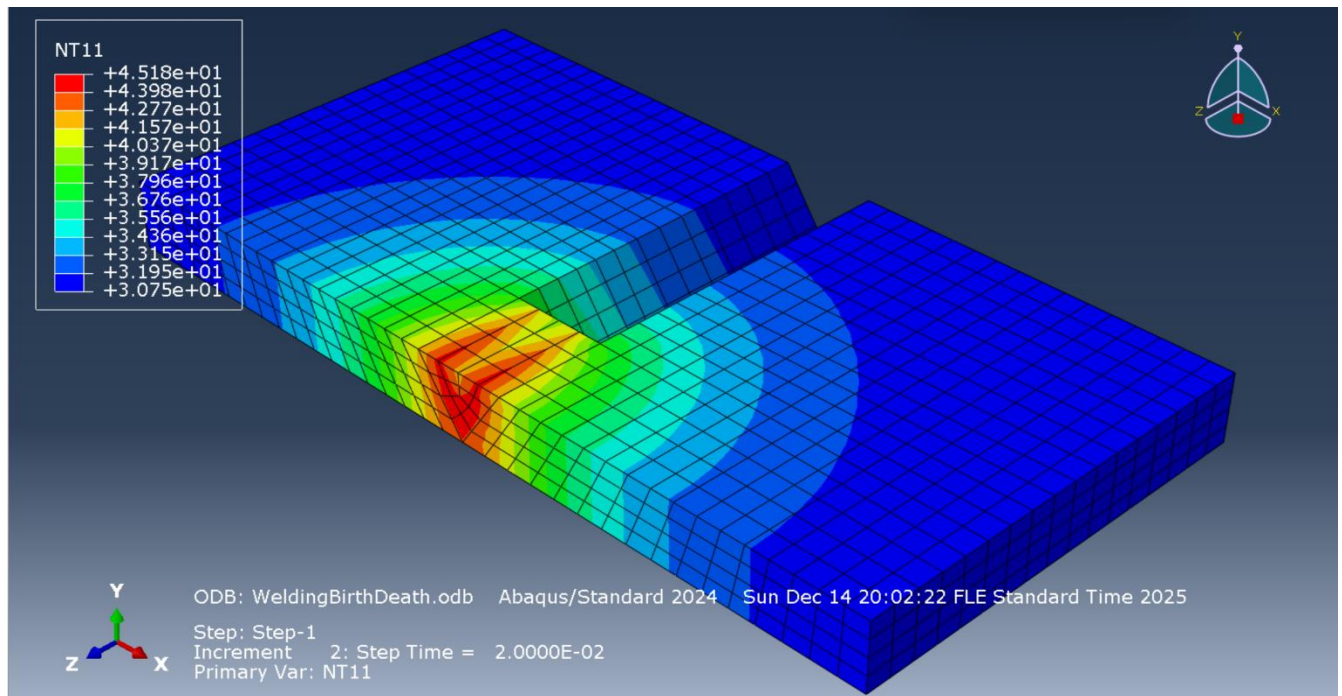


Рисунок 2.15 Нагрів зразка від зварного шва при запалюванні дуги при  
роботизованому зварюванні на початковому 1 кроці аналізу. Максимальна  
температура 45°C

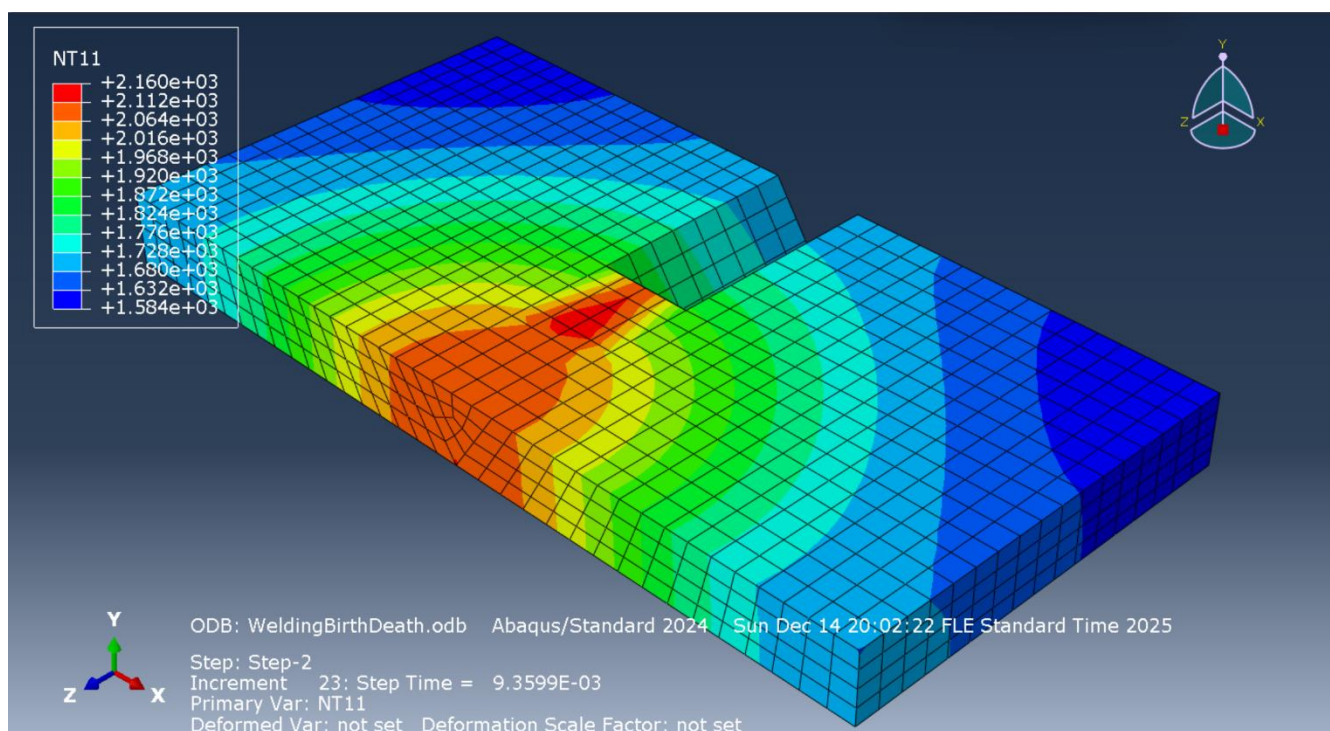


Рисунок 2.16 Нагрів зразка від зварного шва при роботизованому зварюванні на 2 кроці аналізу. Максимальна температура 2160°C

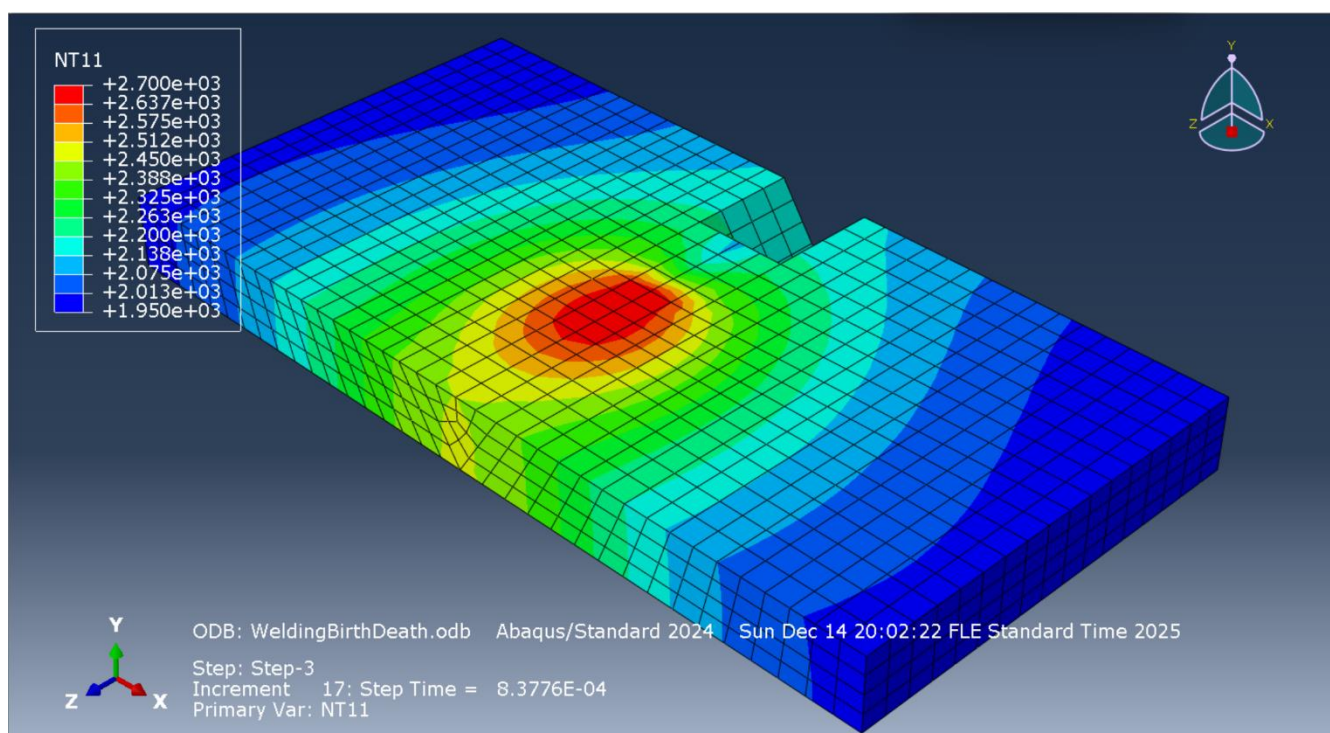


Рисунок 2.17 Нагрів зразка від зварного шва при роботизованому зварюванні на 3 кроці аналізу. Максимальна температура 2700°C

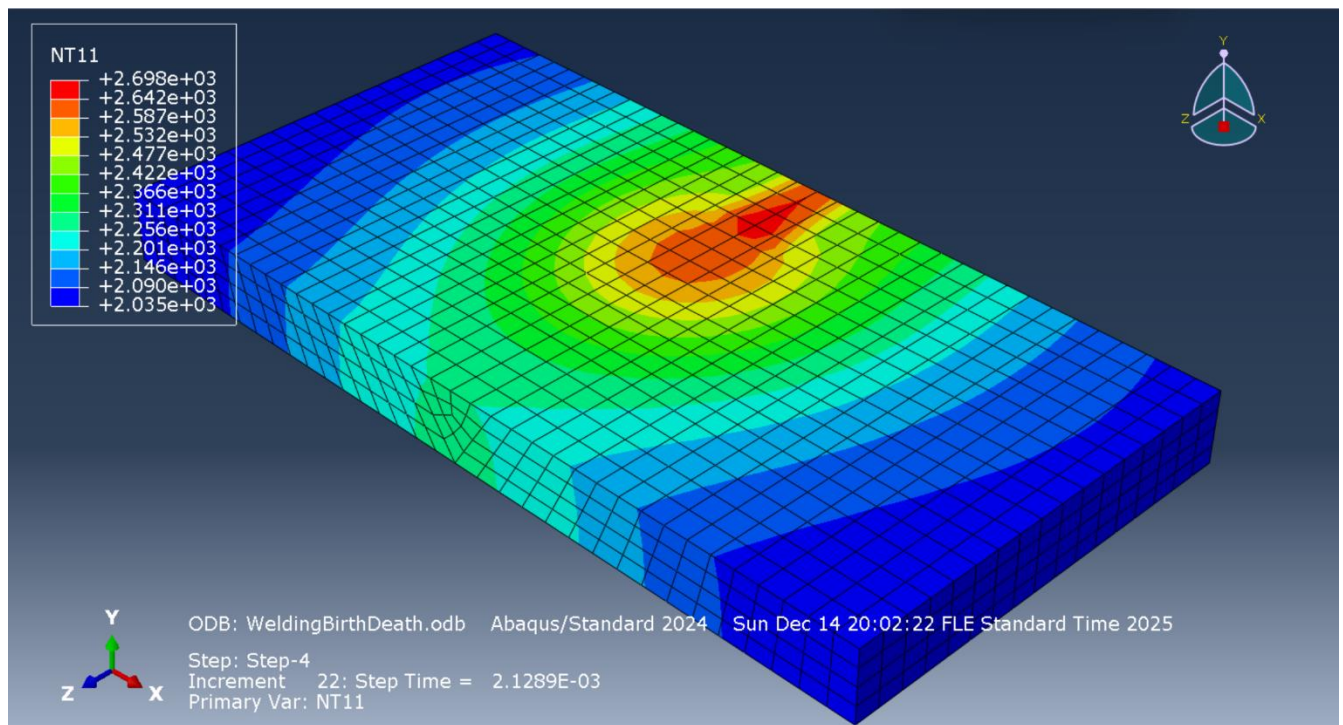


Рисунок 2.18 Нагрів зразка від зварного шва при роботизованому зварюванні на останньому 4 кроці аналізу. Максимальна температура 2700°C

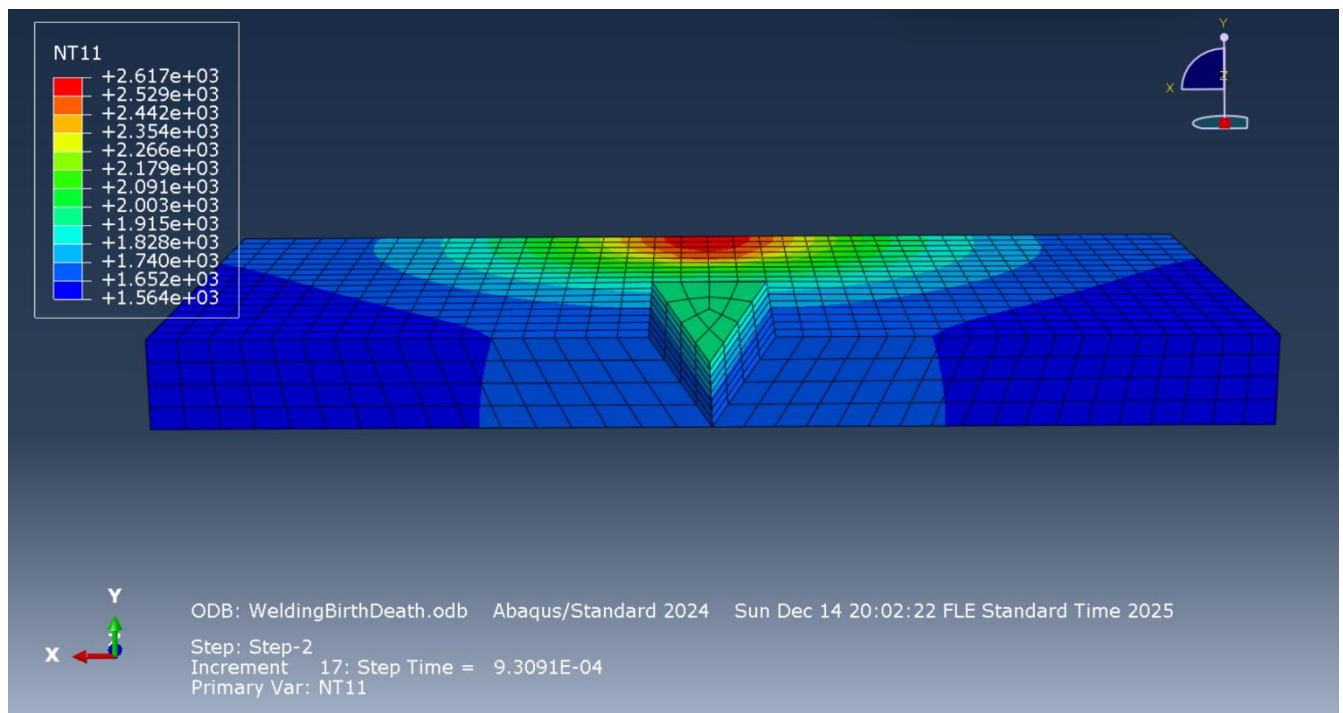


Рисунок 2.19 Поперечний переріз зразка, що нагрівається від зварного шва при роботизованому зварюванні на 2 кроці аналізу.

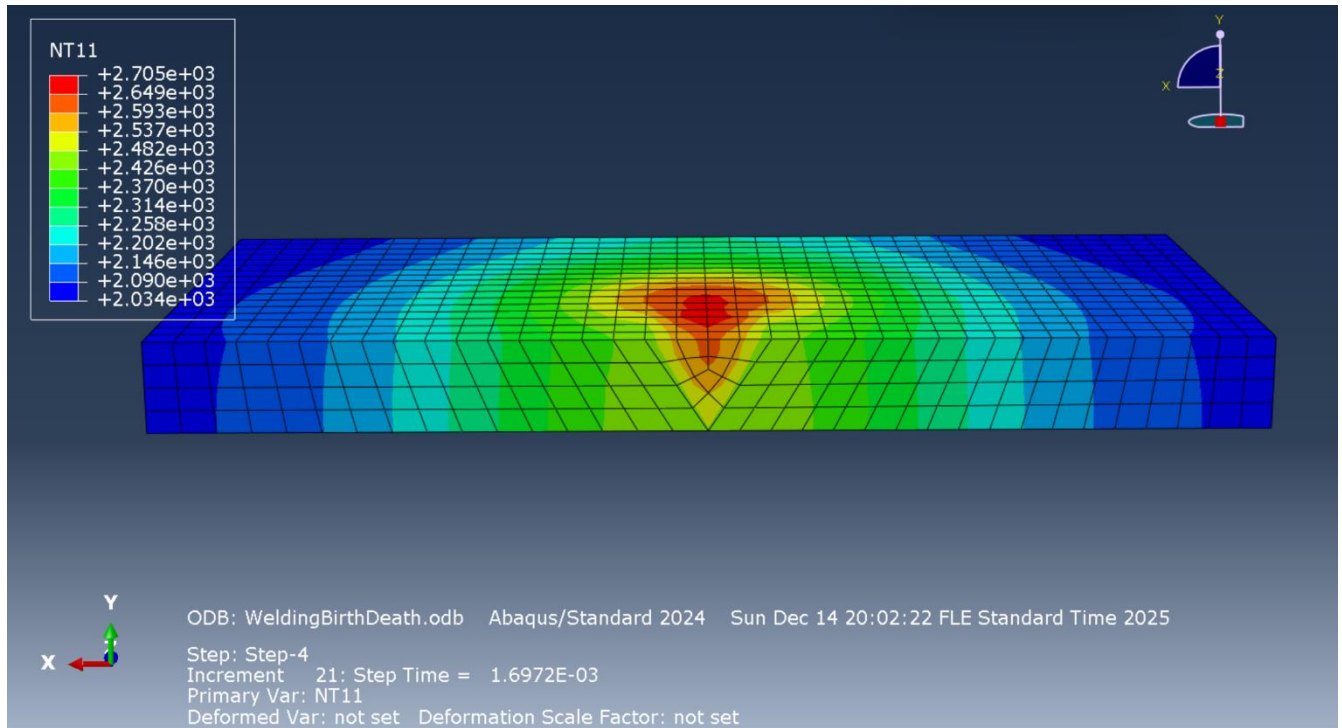


Рисунок 2.20 Поперечний переріз зразка, що нагрівається від зварного шва при роботизованому зварюванні на 4 кроці аналізу.

Для роботизованого MIG/MAG зварювання довгомірних швів важливо, що часова тривалість кроку, протягом якого активується кожен сегмент, безпосередньо пов'язана із швидкістю зварювання. Якщо довжина сегмента  $l_{\text{сег}}$ , швидкість  $v$ , то номінальний час “перебування” дуги над цим сегментом становить  $\Delta t = l_{\text{сег}} / v$ . При налагодженні моделі фіксували бажане значення  $v$  на основі технологічного режиму та обирали  $\Delta t$  і кількість кроків так, щоб сумарний час зварювання відповідав реальному. Тоді розрахована лінійна енергія  $q$ , що визначається за технологічними параметрами, фактично реалізується в моделі через відповідну комбінацію потужності джерела та тривалості дії на кожен сегмент. За потреби вплив роботизованої сингулярності можна змодельовати, змінюючи  $\Delta t$  для окремих сегментів, тобто збільшуючи або зменшуючи тривалість локального підігріву.

Особливу увагу під час моделювання приділяли впливу кінематичних аномалій робота, зокрема сингулярностей, на тепловіддачу. Якщо в певній зоні вертикального або горизонтального шва робот змушений різко зменшити фактичну

швидкість переміщення TSP через наближення до сингулярної конфігурації, реальна лінійна енергія в цій зоні зростає. У термінах моделі це означає, що зазначений сегмент шва має більшу тривалість дії джерела. Розрахунок показує підвищення максимумів температури та розширення зони термічного впливу, що корелює з практичними спостереженнями утворення опуклих широких валиків, стікання ванни та підрізів по верхній межі. Навпаки, якщо наступний сегмент проходиться з підвищеною швидкістю, моделювання зменшеного  $\Delta t$  відтворює недостатнє прогрівання та ризик непроварів.

Моделювання в Abaqus дає можливість завчасно ідентифікувати критичні зони, де поєднання тепловкладення і кінематичних ефектів робота призводить до потенційних дефектів. При аналізі результатів розглядали поля миттєвої температури у моменти максимального нагріву кожного сегмента, карти ізотерм, які характеризують ширину зони термічного впливу, та діаграми температурно-часових циклів у характерних точках, наприклад у корені шва або на поверхні в зоні потенційного підрізу. Якщо моделювання показує, що в певній зоні температура тривалий час перевищує інтервал ліквідус або солідус, слід очікувати утворення крупнозернистої структури, підвищеного рівня залишкових напружень та підвищеної схильності до гарячих тріщин, особливо при високолегованих сталях. У зонах з недостатнім максимальним нагрівом та надто високими швидкостями охолодження можливе формування непроварів та структур типу загартованих зон з підвищеною твердістю та крихкістю.

З практичної точки зору результати числового моделювання слід використовувати для корекції як теплового режиму, так і просторової конфігурації зварювального робота. Якщо моделювання із номінальним розподілом теплового навантаження виявляє небажане розширення зони термічного впливу у ділянці, що відповідає сингулярності, інженер може змінити положення деталі на позиціонері, щоб перемістити шов у таку область робочого простору, де траєкторія

роботизованого пальника для цього сегмента далека від сингулярних конфігурацій. Альтернативно допускається локальне коригування режиму у моделі, наприклад зменшення струму або напруги для сегментів, де неминуче зменшується швидкість, щоб загальний рівень лінійної енергії залишався у заданому діапазоні.

При побудові моделі в Abaqus доцільно спиратися на підходи, які рекомендовані у спеціалізованій літературі з обчислювальної зварювальної механіки та документації до програмного комплексу. Для MIG/MAG процесу типовим є калібрування моделі теплового джерела за експериментальними даними макрошліфів: підбираються параметри гаусового розподілу або еліпсоїдальної моделі, а також співвідношення між повною потужністю дуги та питомим тепловим потоком у моделі, поки розрахована форма проплавлення не співпадає з експериментальною. При цьому сегментована активація дозволяє моделювати довгі шви без надмірного збільшення розміру скінченно-елементної задачі, адже у кожен момент часу “працює” тільки невелика частина елементів зони шва.

Додатково необхідно враховувати вимоги міжнародних стандартів, які регламентують як сам процес зварювання, так і оцінку дефектів. Хоча вхідними даними для моделі є суто фізичні параметри процесу, від результатів моделювання очікують, що вони дозволять забезпечити рівні якості швів згідно з ISO 5817, а також уникнути дефектів, класифікованих ISO 6520-1. Це означає, що критерії оцінки приймальності результатів моделювання повинні бути пов’язані з обмеженнями на максимально допустиму ширину зони термічного впливу, на форму перерізу шва, на локальні перенагріви та зони недостатнього проплавлення, які надалі можуть трансформуватися у дефекти. Для роботизованих систем додатково необхідно враховувати стандарти ISO 9787 і ISO 10218, які встановлюють системи координат робіт, номенклатуру рухів та вимоги до безпечності, що важливо для коректного перенесення результатів кінематичного аналізу траєкторій у постановку задачі теплового моделювання.

### 2.3. Практичні рекомендації по усуненню ризику виникнення сингулярності при роботизованому зварюванні

Застосування шестиосьових промислових роботів для MIG/MAG зварювання довгомірних деталей принципово змінює вимоги до проєктування технології. Якщо для коротких швів вплив кінематики часто обмежується зоною досяжності та уникненням механічних перешкод, то при довгих поздовжніх або вертикальних швах необхідно враховувати сингулярні конфігурації маніпулятора, за яких втрачається один з ефективних ступенів свободи, різко зростають кутові швидкості окремих осей та погіршується точність реалізації декартової траєкторії [26–29]. У таких режимах роботизоване MIG/MAG зварювання перестає бути стабільним, що проявляється у характерних дефектах шва, які регламентуються міжнародними стандартами ISO 6520-1 та ISO 5817 [31, 32]. Практичне завдання полягає в тому, щоб на основі простих спостережень за кутами осей, формою шва і реальними швидкостями руху вміти виявляти небезпечні зони та коригувати конфігурацію робота, положення деталі і режими зварювання.

Сингулярність шестиосьового маніпулятора з вертикально артикульованою кінематикою виникає тоді, коли поєднання кутів у плечовій, ліктьовій і зап'ястковій групах приводить до виродження матриці Якобі, тобто деякі декартові напрямки руху TCP не можуть бути реалізовані без нескінченно великих кутових швидкостей осей. Для практики важливо, що кожному типу сингулярності відповідає досить простий геометричний образ. Зап'ясткова сингулярність має місце, коли осі четвертої і шостої осей майже співпадають, що часто відповідає куту п'ятої осі, близькому до нуля. Ліктьова сингулярність виникає, коли “плече” і “передпліччя” робота практично витягнуті в пряму лінію, тобто центр зап'ястя знаходиться у площині осей другої і третьої ланок. Плечова сингулярність пов'язана з

положенням, у якому центр зап'ястя проєктується на вісь першої осі або знаходиться в площині, що проходить через цю вісь і паралельна осі другої.

Без залучення складного математичного апарату ці співвідношення осей можна зафіксувати кількома простими методиками.

Перший підхід полягає в “кінематичній розвідці” по запланованій лінії шва. Деталь фіксують у положенні, яке планується для серійного зварювання, після чого оператор у режимі навчання здійснює рух ТСР уздовж майбутнього шва у декартовому просторі з невеликою швидкістю, при цьому на екрані пульта спостерігає значення кутів усіх осей. У місцях, де робот починає різко сповільнюватися, з'являються попередження контролера про наближення сингулярності або деякі осі виконують швидкі компенсаційні повороти, оператор фіксує значення кутів, насамперед кути колін  $\theta_5$ ,  $\theta_3$  та  $\theta_1$ , та координату точки по довжині шва. Якщо, наприклад,  $\theta_5$  у цих точках знаходиться у вузькій околиці нуля градусів, це означає зап'ясткову сингулярність; якщо  $\theta_3$  наближається до значення, при якому ланки плеча і передпліччя візуально “випрямляються”, маємо справу з ліктьовою сингулярністю.

Другий практичний спосіб передбачити небезпечні положення базується на аналізі траєкторії у просторі суглобів. Траєкторію, записану як послідовність точок шва у декартовому просторі, перетворюють у послідовність наборів кутів осей, після чого візуально або за допомогою простих скриптів будують залежності кута кожної осі від координати вздовж шва. Сингулярні області характеризуються різкими перегинами або вертикальними ділянками графіків, де невелика зміна положення ТСР викликає значні зміни кутів. Навіть без обчислення детермінанта матриці Якобі такі “сплески” на графіку кутів дозволяють виділити ділянки, які необхідно змістити шляхом повороту деталі на позиціонері або зміни базового положення робота. У подальшому ці граничні значення кутів і координат уздовж

шва можуть бути формалізовані у вигляді технологічних обмежень для програмістів і наладчиків.

Третій інструмент, який не потребує складних розрахунків, це використання вбудованих функцій контролера робота для виявлення сингулярностей. Більшість контролерів відповідно до ISO 9787 та ISO 10218-1 реалізують спеціальні попередження про наближення до сингулярних положень, ґрунтуючись на аналізі внутрішніх кінематичних моделей. У практиці налагодження довгих швів доцільно активувати режим логування таких попереджень, виконати тестовий прохід по траєкторії без дуги, після чого по журналу визначити координати ділянок, у яких системно виникають попередження. Надалі траєкторію для цих ділянок зміщують або розбивають на сегменти з іншими конфігураціями робота, щоб у серійному виробництві зварювальний процес не потрапляв у сингулярну область.

Практичні наслідки сингулярності для MIG/MAG зварювання довгомірних деталей найпростіше оцінити через форму валика шва та характерні дефекти. При лінійному переміщенні пальника вздовж шва у нормальних умовах ширина, висота та ритмічність валика залишаються практично незмінними, зона термічного впливу має відносно сталу ширину, а структурні дефекти типу пор, непроварів та підрізів при належній підготовці деталей мають випадковий характер. Якщо ж траєкторія проходить поблизу сингулярної конфігурації, контролер робота змушений різко зменшувати фактичну швидкість ТСР і, можливо, тимчасово змінювати орієнтацію пальника. Це призводить до локального збільшення лінійної енергії, перегріву ванни, стікання металу донизу при вертикальному або горизонтальному положенні, утворення опуклого широкого валика, підрізів по верхній межі та, у крайньому разі, гарячих тріщин у кратерах.

З іншого боку, якщо при виході із сингулярної зони контролер, навпаки, тимчасово збільшує швидкість ТСР, щоб “наздогнати” еталонну траєкторію, зменшується лінійна енергія, ванна недогрівається, і формується зона з недостатнім

проплавленням або непроварами по бічній стінці, які згідно з ISO 6520-1 класифікуються як окремий вид геометричних несплошностей. Візуально це виявляється у раптовому звуженні шва та зниженні підсилю на невеликій ділянці шва, що чітко відрізняється від решти валика. Таким чином, по довжині довгомірного шва, який проходить через сингулярну область, формується характерний “дефектний профіль” із послідовністю ділянок надмірного тепловкладення та перегріву і ділянок з пониженим тепловкладенням і непроварами.

Саме по формі шва інженер може ідентифікувати ознаки проблеми сингулярності без аналізу кінематичних моделей. Якщо на серії однакових деталей на одній і тій же відстані від базової точки шва з’являється повторюваний дефектний фрагмент, це свідчить про системну причину. Для вертикальних швів це зазвичай поєднання локальної ділянки товстого, опуклого валика зі стіканням ванни та підрізом по верхній межі, за якою слідує ділянка з вужчим, “худим” швом і ознаками неповного проплавлення. Для горизонтальних кутових швів типова картина включає асиметричний валик із недостатнім заповненням верхньої стінки саме в районі, де робот змінює конфігурацію плеча або зап’ястя. Усі ці ознаки вказують на те, що декартова траєкторія проходить через область, у якій робот втрачає один ступінь свободи, а контролер не встигає коректно компенсувати зміну кінематичних умов.

Підбір режимів вертикального MIG/MAG зварювання з використанням шестиосьового робота має враховувати не лише металургійні вимоги до тепловкладення, а й кінематичні обмеження, пов’язані з сингулярністю. Для сталей товщиною 6–8 мм при кутових вертикальних швах у положенні RF типовими є режими з використанням суцільного дроту діаметром 1,0–1,2 мм, струмів 180–240А, напруг 19–23 В, швидкостей зварювання 0,25–0,40 м/хв, із застосуванням синергетичних програм з імпульсним режимом або режимів короткого замикання з

контрольованою перенапругою. Для стабілізації ванни і уникнення стікання застосовують вертикаль “вгору” з невеликою амплітудою коливання пальника у вигляді літери “V” або “зигзаг”, причому робот забезпечує сталі кути нахилу пальника та вильоту електрода.

Щоб зменшити вплив сингулярності, вертикальний шов доцільно розміщувати таким чином, щоб у найбільш відповідальних ділянках плечові та ліктьові осі робота працювали у “робочій середині” свого діапазону кутів, а зап’ястя мало достатній запас від положення  $\theta_5 \approx 0^\circ$ . Це досягається шляхом раціонального вибору бази робота, висоти встановлення деталі, використання поворотних позиціонерів, які дозволяють змістити вертикальний шов ближче до фронтальної зони робочого простору. Крім того, рекомендується у зонах потенційної сингулярності злегка зменшувати задану швидкість зварювання, одночасно коригуючи струм і напругу таким чином, щоб лінійна енергія залишалася в межах рекомендованого діапазону.

Розглянемо практичний приклад впливу сингулярності на якість вертикального шва з розрахунком тепловкладення. Нехай зварюється вертикальний кутовий шов довжиною 2,4 м на стійці рами із сталі товщиною 6 мм знизу вверх. Заданий режим: напруга  $U = 21$  В, струм  $I = 210$  А, коефіцієнт корисної дії процесу  $\eta = 0,8$ , швидкість зварювання  $v_{\text{ном}} = 0,35$  м/хв. Лінійна енергія у нормальній зоні становить

$$q_{\text{ном}} = \eta \cdot U \cdot I / v_{\text{ном}} = 0,8 \cdot 21 \cdot 210 / 0,35 \approx 3528 / 0,35 \approx 10\,080 \text{ Дж/м},$$

тобто близько 0,10 кДж/мм, що відповідає рекомендованому діапазону для вертикальних швів на сталі середньої товщини [30]. Приблизно на висоті 1,6 м траєкторія проходить через плечову сингулярну область. Через обмеження кутових швидкостей осей фактична швидкість ТСР зменшується до  $v_{\text{ф}} \approx 0,18$  м/хв на відтинку близько 150 мм. Тоді

$$q_{\text{ф}} = \eta \cdot U \cdot I / v_{\text{ф}} = 0,8 \cdot 21 \cdot 210 / 0,18 \approx 3528 / 0,18 \approx 19\,600 \text{ Дж/м},$$

тобто близько 0,20 кДж/мм. Таким чином, тепловкладення в зоні сингулярності майже удвічі перевищує номінальне. Далі, коли робот виходить з цієї зони і контролер намагається компенсувати відставання по траєкторії, фактична швидкість на короткій ділянці може зрости до  $v_{\pi} \approx 0,45$  м/хв, що дає

$$q_{\pi} = 0,8 \cdot 21 \cdot 210 / 0,45 \approx 3528 / 0,45 \approx 7\,840 \text{ Дж/м},$$

тобто близько 0,078 кДж/мм, нижче нижньої межі для стабільної вертикальної ванни. У результаті в зоні зниженої швидкості формується широкий, опуклий шов зі стіканням ванни і підрізом по верхній межі, а в зоні підвищеної швидкості – вужчий валик з підвищеним ризиком непровару по бічній стінці.

Таблиця 2.1 Порівняння зміни зони зварного шва при проходженні сингулярності зварювальними роботом

| Зона по довжині шва            | Діапазон висоти, м | Задана швидкість $v_{\text{ном}}$ , м/хв | Середня фактична швидкість $v_{\text{ф}}$ , м/хв | Лінійна енергія $q$ , кДж/мм | Середня ширина шва, мм | Середня глибина підрізу, мм | Очікувані дефекти за ISO 6520-1                                                                           |
|--------------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Нормальна зона                 | 1,8-2,1            | 0,35                                     | 0,35                                             | 0,67                         | 6,5                    | 0,0                         | Дефекти відсутні або поодинокі пори малого розміру; непровари не фіксуються.                              |
| Зона сингулярності             | 2,4-2,8            | 0,35                                     | 0,18                                             | 1,31                         | 9,5                    | до 0,8                      | Підріз по верхній межі шва, надмірно опуклий і широкий валик, підвищений ризик гарячих тріщин у кратерах. |
| Зона компенсуючого прискорення | 0,0-1,5            | 0,35                                     | 0,45                                             | 0,52                         | 5,5                    | до 0,2                      | Звужений валик, занижена висота, підвищений ризик локальних непроварів по бічній стінці.                  |
| Завершальна нормальна зона     | 1,8-2,1            | 0,35                                     | 0,35                                             | 0,67                         | 6,5                    | 0,0                         | Геометрія шва відповідає нормальній зоні                                                                  |

Примітка. Похідні значення  $\eta = 0,85$ ;  $U = 21$  В;  $I = 220$  А;  $P = \eta \cdot U \cdot I \approx 3,93$  кВт. Лінійна енергія:  $q = P / v_{\text{ф}} \times 10^{-6}$ , кДж/мм

## РОЗДІЛ 3

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 3.1. Охорона праці при використанні роботизованого зварювального обладнання

Застосування роботизованих комплексів для дугового зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів (MIG/MAG) радикально змінює конфігурацію ризиків для працівників та довкілля. На відміну від традиційних постів ручного дугового зварювання, де основними небезпеками є безпосередній контакт з дугою, бризками розплавленого металу та високі концентрації диму у зоні дихання зварника, роботизовані комірки додають нові небезпеки, пов'язані з неконтрольованим рухом промислового робота, а також складнішими сценаріями взаємодії людини з автоматизованою системою. Одночасно саме роботизація створює можливості для реалізації підходу Європейського зеленого курсу (Green Deal), який поєднує вимоги безпеки праці, енергоефективності, запобігання забрудненню та декарбонізації виробництва. Для коректного проєктування та експлуатації таких систем необхідно спиратися на комплекс міжнародних стандартів щодо безпеки промислових роботів, систем зварювання та контролю шкідливих факторів середовища.

Основою нормативної бази для промислових роботів є стандарти ISO 10218-1 та ISO 10218-2, які задають вимоги до конструкції роботів, інтеграції в роботизовані системи, функціональної безпеки, режимів програмування та технічного обслуговування. Вони доповнюються загальним стандартом з безпеки машин ISO 12100, де регламентовано процедуру ідентифікації небезпек, оцінювання та зменшення ризиків для всього життєвого циклу обладнання. Для зварювальних процесів застосовуються ISO 4063, який класифікує та кодує процеси зварювання (MIG/MAG визначаються кодами 135, 136, 138), та стандарти серії ISO 3834, що встановлюють вимоги до системи забезпечення якості при зварюванні, включаючи підготовку персоналу, кваліфікацію технологій і контроль швів. Оцінка та нормування зварювального диму виконуються відповідно до ISO

15011-1, де описано лабораторні методики визначення швидкості утворення диму та його складу. Саме на перетині цих нормативних блоків формуються вимоги до охорони праці при експлуатації роботизованих зварювальних систем у контексті Green Deal.

Монтаж роботизованих зварювальних комірок має враховувати як механічні, так і процесні небезпеки. На етапі проєктування виконується аналіз зон досяжності робота з урахуванням систем координат, визначених ISO 9787, та типових конфігурацій, де можливі сингулярності та небажані траєкторії руху. Робот встановлюється на жорстку фундаментну плиту, а траєкторії підведення кабелів, шлангів зварювального пальника та датчиків плануються так, щоб виключити їхнє зачеплення за елементи оснащення. Навколо робота формується огорожена зона, оснащена світловими завісами, дверима з електроблокуванням та двоканалними вимикачами аварійної зупинки, які перевіряються відповідно до вимог ISO 13849-1 щодо рівня безпеки систем керування. Роботизований зварювальний процес передбачає наявність джерела живлення, подавача дроту, системи подачі захисного газу, позиціонерів та пристроїв базування деталей, що утворюють єдину систему, інтеграцію якої необхідно розглядати з позицій функціональної безпеки згідно з ISO 10218-2.

Особливу увагу приділяють режимам навчання та налагодження. У цих режимах оператор перебуває всередині огороженої зони, тому рух робота має здійснюватися з обмеженою швидкістю, а керування дозволяється тільки за допомогою трьохпозиційного пристрою дозволу, який забезпечує безпечну зупинку при відпусканні або надмірному стисканні ручки. Траєкторії зварювання перевіряються офлайн засобами моделювання з урахуванням сингулярних положень зап'ястя, ліктя та плеча, щоб уникнути несподіваних різких прискорень або неконтрольованого руху зварювального пальника поблизу робочих місць оператора. Таким чином, вимоги стандартів орієнтують інженера на мінімізацію

імовірності контакту людини з рухомими частинами робота, а також на запобігання ситуаціям, коли помилка програмування або відмова датчика може привести до удару маніпулятора по елементах оснащення чи огорожі.

Захист людей від механічної травми в роботизованих зварювальних комірках реалізується за багаторівневим принципом. Перший рівень становлять пасивні засоби, такі як сталеві огорожі, прозорі екрани з світлофільтруючого матеріалу та фізичне розділення зон завантаження деталей і руху робота. Другий рівень формують засоби електробезпеки, включаючи міжзамикання дверей огорожі, світлові завіси, сканери простору, які при перетині людиною небезпечної зони ініціюють захисну зупинку робота та відключення зварювального струму. Третій рівень пов'язаний з функціональною безпекою системи керування, де реалізуються режими обмеження швидкості, обмеження робочого простору, контролю зупинки та моніторингу положення осей. На практиці це означає, що при непередбаченому вході людини до робочої зони робот переходить у стан безпечної зупинки із гарантованим відключенням енергії приводу та дугового джерела, що суттєво знижує ризик зіткнення або опіку.

Разом з тим механічні фактори є лише частиною картини ризиків. MIG/MAG зварювання супроводжується інтенсивним утворенням зварювального диму, ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, шуму, а також виділенням газоподібних продуктів, серед яких оксиди азоту, вуглекислий газ, озон, оксиди металів. Міжнародне агентство з вивчення раку віднесло зварювальні дими до канцерогенів для людини (група 1), що підкреслює критичність контролю цих факторів для охорони праці. Декілька країн ЄС встановили гранично допустимі концентрації для загального зварювального диму на рівні 1–1,25 мг/м<sup>3</sup> для респірабельної фракції, тоді як попередні значення 5 мг/м<sup>3</sup> вважаються недостатньо захисними. Для окремих компонентів, таких як марганець та шестивалентний хром, встановлені ще жорсткіші нормативи.

Роботизація зварювальних процесів створює сприятливі умови для зниження впливу диму на людей. Оскільки зварювальний процес відбувається всередині огороженої комірки, з'являється можливість реалізувати локальну витяжну вентиляцію безпосередньо над джерелом виділень, використовувати витяжні столи, зонти, пальники з вбудованою відсмоктувальною системою або комбінувати ці рішення. Дослідження показують, що правильно спроектована локальна витяжна вентиляція може зменшити концентрацію диму у зоні дихання на порядок, а використання процесів з контрольованою формою перенесення металу, наприклад СМТ або імпульсного струменевого перенесення, додатково скорочує питомі викиди до 1–1,5 мг диму на грам наплавленого металу проти 4–5 мг/г для традиційного короткозамикаючого режиму MIG/MAG

У концепції Green Deal роботизоване MIG/MAG зварювання розглядається не лише як засіб підвищення продуктивності, а й як інструмент реалізації принципу нульового забруднення та декарбонізації промисловості. По-перше, робот забезпечує високу повторюваність траєкторій і зазорів, що дозволяє зменшити надмірне підсилення валика, уникнути додаткових операцій та знизити споживання електроенергії і присадочного металу на одиницю продукції. По-друге, замикання процесу у комірці дає змогу застосувати вискоєфективні фільтрувальні агрегати з поверненням очищеного повітря у виробниче приміщення, що скорочує неорганізовані викиди пилу та металів у довкілля. По-третє, цифрова інфраструктура сучасних роботизованих комплексів дозволяє збирати дані про енерговитрати, фактичний час горіння дуги, витрати газу і дроту, інтегрувати їх в системи екологічного менеджменту та звітності за європейськими вимогами, включаючи екологічні декларації продукції та «зелений» таксономічний облік інвестицій.

Практичне значення таких підходів можна проілюструвати на прикладі інженерного розрахунку викидів зварювального диму та супутніх енергетичних

показників для традиційного та роботизованого режимів MIG/MAG зварювання. Розглянемо вертикальний кутовий шов довжиною 2,4 м на конструкційній сталі, який формує шов катетом  $a = 5$  мм. Геометрична площа поперечного перерізу шва за наближеною оцінкою становить  $A \approx 0,5a^2$ . Для  $a = 5$  мм або 0,005 м отримуємо  $A = 0,5 \cdot (0,005)^2 = 1,25 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>. Об'єм наплавленого металу на всю довжину шва  $V$  дорівнює  $A \cdot L = 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot 2,4 = 3,0 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>. За густини сталі  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup> маса наплавленого металу складає  $m = \rho \cdot V \approx 0,236$  кг.

Для ручного MIG/MAG зварювання у вертикальному положенні приймемо швидкість зварювання  $v_h = 0,25$  м/хв. Час виконання шва  $t_h$  визначається як  $t_h = L/v_h = 2,4 / 0,25 = 9,6$  хв або 576 с. Середня масова швидкість наплавлення  $q_h$  дорівнює  $m/t_h \approx 0,236 / 576 \approx 4,1 \cdot 10^{-4}$  кг/с, тобто близько 1,47 кг/год, що відповідає реалістичним параметрам ручного зварювання у вертикальному положенні. Для роботизованого режиму з використанням імпульсного перенесення металу приймемо швидкість  $v_r = 0,45$  м/хв. Тоді час виконання шва становить  $t_r = 2,4 / 0,45 \approx 5,33$  хв або 320 с. Відповідно масова швидкість наплавлення  $q_r = m/t_r \approx 0,236 / 320 \approx 7,4 \cdot 10^{-4}$  кг/с, тобто близько 2,65 кг/год. Робот виконує шов майже у два рази швидше, з вищою миттєвою продуктивністю, але меншою тривалістю впливу тепла на деталь.

Для оцінки викидів диму використаємо питомі фактори утворення, одержані в лабораторних дослідженнях GMAW процесів. Для традиційного короткозамикаючого режиму приймемо фактор  $F_h = 5$  мг диму на грам наплавленого металу, для імпульсного режиму роботизованого зварювання  $F_r = 1,5$  мг/г, що узгоджується з даними Кеана та співавторів [37] та узагальненнями професійних асоціацій [38]. Оскільки маса наплавленого металу  $m \approx 0,236$  кг, тобто 236 г, загальна маса диму при виконанні одного шва вручну становить  $M_h = F_h \cdot m = 5 \cdot 236 \approx 1180$  мг, тоді як у роботизованому режимі  $M_r = 1,5 \cdot 236 \approx 354$  мг.

Переходимо до оцінки швидкості утворення диму. Для ручного зварювання маємо  $\dot{M}_h = M_h / t_h \approx 1180 / 576 \approx 2,0$  мг/с. Для робота  $\dot{M}_r = 354 / 320 \approx 1,1$  мг/с. Таким чином, миттєва інтенсивність викидів диму в роботизованому режимі приблизно на 45 % менша, а сумарний викид на шов знижується більш ніж утричі.

Щоб пов'язати ці показники з гранично допустимими концентраціями, розглянемо спрощену однозонову модель приміщення. Припустимо, що ручне зварювання виконується у зварювальній кабіні з витяжною вентиляцією продуктивністю  $Q_h = 2000$  м³/год (0,556 м³/с) із коефіцієнтом захоплення  $\eta_h = 0,5$ , тобто половина диму ефективно видаляється локальною витяжкою, а решта змішується з повітрям робочої зони. Для роботизованої комірки приймемо витяжну вентиляцію  $Q_r = 1500$  м³/год (0,417 м³/с) з ефективністю захоплення  $\eta_r = 0,9$  завдяки обтічній закритій конструкції й оптимальному розташуванню сопла відсмоктування.

Середня концентрація у повітрі  $C$  можна приблизно оцінити відношенням масової витрати диму, що не захоплюється вентиляцією, до витрати повітря:  $C \approx (1 - \eta) \cdot \dot{M} / Q$ . Для ручного режиму отримуємо  $C_h \approx (1 - 0,5) \cdot 2,0 / 0,556 \approx 1,8$  мг/м³. Для роботизованого режиму  $C_r \approx (1 - 0,9) \cdot 1,1 / 0,417 \approx 0,26$  мг/м³. Порівняння цих значень з орієнтовним рівнем 1 мг/м³, рекомендованим сучасними підходами до нормування зварювального диму, показує, що при ручному зварюванні концентрація перевищує бажаний орієнтир майже вдвічі, тоді як при роботизованому процесі вона суттєво нижча за нього. Це означає, що впровадження роботизованої комірки з високоефективною вентиляцією дозволяє не тільки зменшити індивідуальний ризик для працівників, а й створює резерв для скорочення використання засобів індивідуального захисту або зниження навантаження на системи вентиляції всього цеху.

Додатково оцінимо енергетичну складову та пов'язані викиди CO<sub>2</sub> у контексті Green Deal. Приймемо, що середня потужність дуги при ручному зварюванні

становить  $P_h \approx 3,6$  кВт (струм близько 180 А при напрузі 20 В), тоді як у роботизованому імпульсному режимі використовується дещо вищий струм і напруга, що дає  $P_r \approx 5,0$  кВт. Енергія, витрачена на формування одного шва, розраховується за формулою  $E = P \cdot t$ , де  $t$  виражений у годинах. Для ручного режиму отримуємо  $E_h = 3,6 \cdot (9,6 / 60) \approx 0,576$  кВт·год, для робота  $E_r = 5,0 \cdot (5,33 / 60) \approx 0,444$  кВт·год. Незважаючи на більшу миттєву потужність, скорочення часу горіння дуги забезпечує зменшення питомої енергії на шов приблизно на 23 %.

Середня вуглецевоємність електроенергії в ЄС, за даними останніх оглядів, становить близько 244 г CO<sub>2</sub>/кВт·год, що майже вдвічі менше світового середнього рівня завдяки поширенню відновлюваних джерел енергії [12]. Отже, викиди CO<sub>2</sub> при ручному виконанні шва можна оцінити як  $mCO_{2h} = 0,576 \cdot 0,244 \approx 0,14$  кг, а для роботизованого режиму  $mCO_{2r} = 0,444 \cdot 0,244 \approx 0,11$  кг. Хоча різниця в десятки грамів на один шов на перший погляд незначна, при серійному виробництві з тисячами зварних швів на рік інтегральний ефект виявляється суттєвим та безпосередньо корелює з цілями Green Deal щодо декарбонізації промисловості. Додатковий внесок у зменшення викидів забезпечує скорочення браку та переробок, які при ручному зварюванні становлять істотну частку загального часу горіння дуги.

Порівняння наведених параметрів свідчить, що роботизоване MIG/MAG зварювання при правильному проєктуванні комірки та виборі режимів забезпечує комплексну вигоду. З одного боку, воно знижує механічні ризики завдяки фізичному відокремленню людини від небезпечної зони руху робота та реалізації багаторівневої системи функціональної безпеки відповідно до ISO 10218 та ISO 12100. З іншого боку, за рахунок використання низькодимних режимів перенесення металу, ефективної локальної вентиляції та фільтрації повітря суттєво зменшуються викиди зварювального диму, концентрації якого у повітрі

приміщення можуть бути зведені до рівнів нижчих за рекомендовані граничні значення.

Важливим є те, що підхід Green Deal вимагає інтегрувати ці аспекти в загальну систему екологічного та енергетичного менеджменту підприємства. Роботизовані зварювальні комплекси завдяки вбудованим засобам моніторингу струму, напруги, швидкості подачі дроту, витрати газу та часу горіння дуги природно адаптовані до концепції «цифрового двійника» зварювальної ділянки. Це відкриває можливість не тільки виконувати розрахунки викидів за подібними до наведених інженерними методиками, а й автоматично формувати звітність для систем менеджменту довкілля, оцінки вуглецевого сліду продукції та обґрунтування інвестицій у більш чисті технології в рамках зеленого фінансування.

### 3.2 Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому зварюванні

Роботизовані комплекси MIG/MAG зварювання посідають центральне місце в сучасних виробничих системах, оскільки забезпечують високу продуктивність, повторюваність параметрів шва та можливість інтеграції у гнучкі автоматизовані лінії. В умовах посилення зовнішніх ризиків, включно з техногенними аваріями, воєнними загрозами, перебоями енергопостачання та екстремальними погодними подіями, питання безпеки та стійкості таких комплексів набуває особливого значення. Для підприємства важливо не лише гарантувати прийнятний рівень безпеки персоналу і третіх осіб, а й забезпечити здатність роботизованої лінії переходити у безпечний стан, зберігати цілісність обладнання та якості продукції, а також швидко відновлювати роботу після надзвичайних ситуацій. Ці вимоги системно відображені у міжнародних стандартах з охорони праці, безпеки машин, промислових роботів та зварювальних процесів, які слід застосовувати в комплексі.

Міжнародні стандарти на системи управління безпекою праці та безперервністю бізнесу задають загальну рамку для планування та реагування на

надзвичайні ситуації. Стандарт ISO 45001 орієнтує підприємства на ризик-орієнтований підхід до управління охороною праці, включно з аналізом сценаріїв аварій, пожеж, викидів небезпечних речовин та інших подій, що можуть впливати на роботизовані зварювальні дільниці. Стандарт ISO 22301 встановлює вимоги до систем управління безперервністю бізнесу і прямо вимагає ідентифікувати критичні процеси, розробити плани дій у надзвичайних ситуаціях, визначити прийнятний час простою та механізми відновлення виробництва. Для підприємств, що застосовують роботів для MIG/MAG зварювання, критичними є збереження працездатності зварювальних ліній, мінімізація пошкоджень дорогого обладнання та недопущення випуску продукції з прихованими дефектами, які виникли внаслідок аварійних відхилень режимів.

Базовим документом з безпеки машин є стандарт ISO 12100, який описує принципи оцінки ризиків та встановлює алгоритм виявлення небезпек, оцінювання їхньої ймовірності та тяжкості, а також вибору заходів зниження ризику. Для роботизованих зварювальних систем цей підхід означає необхідність аналізу не лише штатних умов, а й поведінки обладнання при порушенні енергопостачання, відмовах елементів системи керування, збоях у роботі зварювального джерела, витоку захисного газу або виникненні пожежі. На основі такого аналізу проектується захисні огорожі, системи аварійної зупинки, резервування живлення для критичних вузлів, системи контролю атмосфери у зварювальній комірці та алгоритми переведення роботів у безпечний стан.

Специфічні вимоги до промислових роботів містять стандарти ISO 10218-1 та ISO 10218-2, які визначають безпечні режими роботи робота, вимоги до апаратури керування, захисних функцій, інтеграції робота до виробничої системи, а також вимоги до організації обслуговування, наладки та навчання персоналу [4, 5]. У цих документах вводяться поняття захищеної зони роботизованої системи, вимоги до огорожень та блокувальних пристроїв, безпечних зупинок, функцій контролю

швидкості та положення, а також описуються сценарії, за яких система повинна переходити в безпечний стан при виявленні відхилень. Для випадків взаємодії людини з роботом (наприклад під час сервісних операцій або у колаборативних сценаріях) додаткові вимоги сформульовані у специфікації ISO/TS 15066, яка регламентує допустимі сили та тиски при контактних взаємодіях, вимоги до обмеження швидкості та інші аспекти колаборативної робототехніки.

У контексті роботизованого MIG/MAG зварювання важливе місце посідають стандарти на зварювальні джерела та якість зварювання. Стандарт EN 60974-1 визначає вимоги до електробезпеки, захисту від перевантажень, стійкості до коротких замикань, а також параметрів, що забезпечують стабільність дуги та повторюваність вихідних характеристик зварювальних джерел. Наявність у джерела функцій м'якого пуску, контролю перенапруги, відключення при аномальних режимах є принциповою для зниження ризику пожежі, перегріву та небезпечних напруг на корпусі під час надзвичайних ситуацій. Стандарт ISO 3834-2 задає вимоги до системи забезпечення якості при зварюванні, включно з управлінням процесами, документуванням режимів, кваліфікацією персоналу та проведенням відповідного контролю. Це створює основу для системного аналізу впливу аварій та позаштатних режимів на якість з'єднань та для встановлення процедур відбракування виробів, які могли бути уражені під час надзвичайних подій.

Стандарти ISO 6520-1 та ISO 5817, які класифікують геометричні несплошності зварних з'єднань та встановлюють рівні якості швів, дозволяють пов'язати порушення режимів, викликані аварійними ситуаціями, з конкретними дефектами, такими як пористість, непровари, тріщини, підрізи та інші. У випадку аварійного відключення живлення або різкого падіння тиску захисного газу на ділянці довгомірного шва можуть виникнути характерні дефекти, які мають систематичний характер та повторюються на низці виробів. Посилання на ці

стандарти є важливим при розробці алгоритмів перевірки та відбракування продукції після надзвичайної події, а також при обґрунтуванні необхідності проведення неруйнівного контролю певної частки виробів.

Надзвичайні ситуації впливають на стійкість роботизованого MIG/MAG процесу насамперед через порушення енергетичного, газового та інформаційного забезпечення. Перерви або коливання напруги в електромережі призводять до нестабільності дуги, змін у переносі металу, підвищеного розбризкування та виникнення місцевих дефектів. При повному зникненні живлення критичним є сценарій неконтрольованої зупинки робота в небезпечній позі, коли важкі ланки зупиняються без гальмування або у положенні, небезпечному для персоналу та обладнання. Стандарти безпеки машин вимагають передбачати так званий безпечний стан, у якому після відключення живлення робота його ланки не повинні неконтрольовано опускатися, а може застосовуватися механічне або електромагнітне гальмування, що утримує осі в безпечних положеннях.

Порушення газопостачання при MIG/MAG зварюванні також має подвійний ефект. З технологічної точки зору зниження витрати або тиску захисного газу викликає інтенсивне окиснення ванни, пористість, розбризкування та нестабільність форми валика. З точки зору безпеки, витік газу (особливо у разі застосування сумішей з вмістом вуглекислого газу або активних газів) створює ризик задущення, вибуху чи пожежі у замкнених просторах. Тому в роботизованих зварювальних комірках, особливо розміщених у заглиблених або огорожених зонах, рекомендується встановлювати датчики концентрації кисню та горючих газів, інтегровані в систему аварійної зупинки, а також передбачати автоматичне перекриття газових магістралей при спрацюванні сигналізації.

Особливий тип надзвичайних ситуацій пов'язаний з пожежами, вибухами та вторинними пошкодженнями будівельних конструкцій. За таких умов роботизований комплекс може опинитися у зоні підвищених температур,

механічних ударів або обвалення конструкцій. Вимоги ISO 10218-2 та EN 60974-1 передбачають застосування кабелів, корпусів та захисних кожухів з відповідною вогнестійкістю, використання захищеної прокладки силових і сигнальних ліній, а також встановлення апаратури відключення живлення, розташованої поза межами найбільш небезпечних зон. Для забезпечення стійкості підприємства важливо, щоб навіть у випадку часткового руйнування виробничої зони була можливість швидко локалізувати пошкодження, зберегти критичні дані програм, параметрів режимів та журналів контролера і тим самим скоротити час відновлення виробництва.

Значну увагу міжнародні стандарти приділяють захисту людей від дії роботизованих систем як у штатних, так і у надзвичайних умовах. ISO 10218 та ISO/TS 15066 зобов'язують розділяти простір на робочу зону робота, зону взаємодії людини з роботом та зони, куди доступ персоналу допускається лише при повній зупинці та блокуванні рухів. У практиці роботизованого зварювання це реалізується через застосування огорожень, світлових бар'єрів, сканерів простору, які відключають небезпечні рухи при вході людини у небезпечну зону, а також через використання ручних програмних пультів з «мертвою людиною» для наладки. Під час надзвичайних ситуацій, коли можлива паніка або нештатні входи до зони робота, наявність таких систем критично важлива.

Захист органів дихання та зору, шкіри і слуху персоналу, що працює поблизу роботизованих MIG/MAG комірок, залишається актуальним як у штатних, так і у надзвичайних умовах. Викиди зварювальних аерозолів та озону при порушенні вентиляції або при пожежі можуть швидко перевищити гранично допустимі концентрації. Системи місцевої та загальної витяжної вентиляції повинні проектуватися з урахуванням резервування, сигналізації відмови та можливості безпечного зупинення зварювання при втраті тяги. Відповідно до підходів ISO 45001, підприємство повинно забезпечити доступність індивідуальних засобів захисту (фільтрувальних респіраторів, масок з відповідним ступенем захисту,

захисних окулярів, рукавиць, спецодягу), розробити процедури їхнього використання та проводити навчання персоналу.

Важливою складовою захисту людей є організаційні заходи. Вони включають розроблення інструкцій з дій при пожежі, витоку газу, раптовому зникненні живлення, руйнуванні конструкцій або інших надзвичайних ситуаціях; проведення регулярних навчань і тренувань з евакуації; чітке маркування шляхів виходу та розміщення засобів пожежогасіння; призначення відповідальних за відключення енергоживлення та газопостачання у разі тривоги. Підприємство повинно також передбачати процедури контролю стану працівників у разі тривалих чи багаторазових аварійних ситуацій, коли накопичення психоемоційного стресу може впливати на їхню здатність приймати правильні рішення.

Стійкість роботизованих зварювальних процесів у надзвичайних умовах пов'язана не лише з безпекою, а й із здатністю зберігати або відновлювати якість продукції. Стандарти ISO 3834 та ISO 6520-1 вимагають системного підходу до документування режимів зварювання, кваліфікації процедур, контролю матеріалів та виконання неруйнівних методів контролю. Після надзвичайної ситуації підприємство повинно визначити, які шви потенційно постраждали від аварійних змін режимів, і застосувати до них додаткові процедури контролю, наприклад 100 % візуально-оптичний контроль, ультразвукову або радіографічну дефектоскопію. На основі аналізу результатів може бути прийнято рішення про ремонт, посилення чи відбракування окремих виробів. У разі серійних виробів доцільно формувати статистичні вибірки для перевірки партій, зварених у період до, під час та після події.

Додатковий рівень стійкості створюють цифрові технології моніторингу та моделювання. Онлайн реєстрація параметрів зварювання, положення робота, стану захисних систем, показників вентиляції та газопостачання дозволяє заднім числом відтворити хронологію надзвичайної ситуації і встановити, які саме вироби були

зварені при порушених умовах. Якщо на підприємстві застосовується цифровий двійник зварювальної ділянки, то результати моделювання температурних полів та напружень за аварійних режимів можуть бути використані для оцінки залишкового ресурсу конструкцій, які потрапили під вплив події. Для цього необхідно інтегрувати моделі тепловкладення, включно з особливостями роботизованої траєкторії, у систему інженерного аналізу і використовувати їх як доповнення до фактичних вимірювань.

## ВИСНОВКИ

1. Технологічні лінії роботизованого зварювання довгомірних виробів на базі процесів MIG/MAG та особливо СМТ формують якісно новий рівень організації зварювального виробництва. У порівнянні з традиційним ручним дуговим зварюванням вони забезпечують кратне зростання продуктивності за рахунок збільшення частки часу горіння дуги, підвищення швидкості зварювання та скорочення допоміжних операцій, одночасно зменшуючи рівень браку, обсяги переробок та потребу в післяопераційній обробці. Завдяки кращому контролю тепловкладення, стабільності геометрії шва та зниженню дефектності досягається підвищення втомної міцності та ресурсу зварних з'єднань. Це створює основу для подальшого розвитку інтелектуальних роботизованих комплексів, інтегрованих з системами технічного зору та цифровими двійниками, які у наступних підрозділах можуть бути розглянуті як засіб додаткового підвищення ефективності та надійності зварювальних технологічних ліній.

2. Технологія роботизованого MIG/MAG зварювання, особливо із застосуванням СМТ-режимів, є ефективним інструментом керування деформаціями довгомірних виробів. Вона забезпечує зниження тепловкладення, контроль поздовжньої та кутової усадки, можливість реалізації симетричних схем накладання швів і раціонального закріплення деталей. Використання таких ліній дає змогу отримувати довгомірні конструкції з меншою кривизною та залишковими напруженнями, що зменшує потребу у післяопераційній механічній обробці, скорочує час циклу виготовлення і водночас підвищує експлуатаційну надійність та довговічність зварних вузлів обладнання.

3. Роботизоване MIG/MAG зварювання довгомірних деталей формує іншу, більш керовану картину виникнення дефектів у порівнянні з традиційними ручними дуговими процесами. Стабільність режимів дуги, відтворюваність траєкторій і можливості інтелектуального моніторингу значно зменшують випадкову складову

дефектності, проте водночас підсилюють роль систематичних помилок програмування, кінематики та організації технологічного процесу. Виконання вимог міжнародних стандартів ISO 6520-1 та ISO 5817, оптимізація параметрів процесу, врахування впливу сингулярностей і впровадження систем онлайн контролю дозволяють реалізувати високопродуктивне зварювальне виробництво, в якому рівень дефектів залишається сумісним із вимогами до довговічності та експлуатаційної надійності зварних конструкцій.

4. Проблема сингулярності 6-осьових зварювальних роботів при зварюванні довгомірних деталей є системною та багатofакторною. Сингулярні конфігурації, що виникають через геометрію робота, безпосередньо впливають на стабільність декартової швидкості та орієнтації пальника, а отже і на формування дефектів шва, що класифікуються міжнародними стандартами. Для довгих швів наслідком стає не випадкова, а повторювана дефектність, яка концентрується у певних зонах виробу і істотно знижує втомну міцність та ресурс конструкцій. Застосування офлайн-програмування, грамотного просторового розташування швів, оптимізації конфігураційних параметрів робота і позиціонерів, а також адаптивного керування режимами MIG/MAG дозволяє зменшити негативний вплив сингулярностей до прийняттого рівня та забезпечити необхідну продуктивність, якість швів і довговічність довгомірних зварних деталей.

2. Узагальнюючи, моделювання тепловкладення при роботизованому MIG/MAG зварюванні в Abaqus із використанням техніки birth and death дає змогу наближено відтворити реальну послідовність формування зварного шва, рух джерела тепла та наступне охолодження. Поєднання сегментованої активації елементів із коректно каліброваною моделлю теплового джерела та урахуванням кінематичних особливостей траєкторії робота, включно з ділянками, де можливі сингулярні конфігурації, дозволяє прогнозувати зони потенційного перегріву або недогріву, і, відповідно, основні дефекти, що виникають при лінійному

переміщенні пальника. Це створює підґрунтя для обґрунтованого вибору режимів зварювання, положення деталей та конфігурацій робота, які забезпечують не лише технологічну та енергетичну ефективність роботизованих ліній, а й необхідну якість та довговічність зварних довгомірних конструкцій.

3. Узагальнюючи, практичне усунення негативного впливу сингулярності при роботизованому зварюванні довгомірних деталей повинно поєднувати прості емпіричні методики виявлення небезпечних конфігурацій осей, аналіз форми шва і дефектності, а також підбір режимів вертикального MIG/MAG зварювання з урахуванням тепловкладення. Використання таблиць і графіків для зіставлення кінематичних параметрів, режимів процесу та характеристик шва дозволяє інженеру швидко ідентифікувати сингулярні області, обґрунтовано змінювати положення швів, конфігурацію робота і позиціонерів, а також параметри зварювання, забезпечуючи необхідну продуктивність, стабільну якість і довговічність зварних з'єднань довгомірних конструкцій.

4. Визначено, що охорона праці при використанні роботизованого зварювального обладнання базується на тісному поєднанні трьох блоків. Перший блок пов'язаний з машинобезпекою та функціональною безпекою промислових роботів, що забезпечує мінімізацію ризику травмування персоналу унаслідок руху маніпулятора. Другий блок стосується контролю зварювального диму, газів та інших фізичних факторів через оптимізацію процесу MIG/MAG, застосування низькодимних режимів, систем локальної вентиляції та засобів індивідуального захисту. Третій блок пов'язаний з енергетичною ефективністю, скороченням викидів парникових газів та інтеграцією з Європейським зеленим курсом, що дозволяє розглядати роботизоване зварювання як ключову технологію для формування безпечних та екологічно стійких виробничих систем.

5. Встановлено, що безпека у надзвичайних умовах при роботизованому MIG/MAG зварюванні формується на перетині декількох груп міжнародних стандартів. Стандарти

систем менеджменту забезпечують рамку управління ризиками, планування дій у надзвичайних ситуаціях та безперервність бізнесу. Стандарти на безпеку машин і роботів регламентують технічні рішення щодо блокувань, аварійних зупинок, режимів взаємодії людини з роботом і вимог до систем керування. Зварювальні стандарти встановлюють вимоги до обладнання, організації процесу, якості швів та процедур контролю. У сукупності їхнє впровадження дозволяє підприємству забезпечити захист людей, мінімізувати наслідки аварій для обладнання, уникнути випуску продукції з критичними дефектами та створити підґрунтя для швидкого відновлення стабільної роботи роботизованих зварювальних ліній у мінливих та потенційно небезпечних умовах..

