

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: «ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ
ОБЛАДНАННЯ ЗІ ЗВАРНИМИ ШВАМИ, ОТРИМАНИМИ МЕТОДОМ СМТ»

Виконав: студент VI курсу групи Маш-

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

Володимир САПІОЛКІН
(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

САПІЙОЛКІН Володимиру Олександровичу

1. Тема роботи: «Підвищення експлуатаційної стійкості деталей обладнання зі зварними швами, отриманими методом СМТ»

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 работ: довідкова література, каталоги, методики використання технологій СМТ, 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	<i>Власовець В.М., д.т.н., завідувач кафедри машинобудування</i>			
5	<i>Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва</i>			

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

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

Студент _____ Володимир САПІОЛКІН
(підпис)

Керівник роботи _____ Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(підпис)

УДК 621.791.019:620.179:621.867

Підвищення експлуатаційної стійкості деталей обладнання зі зварними швами, отриманими методом СМТ. Сапйолкін Володимир Олександрович. Кафедра машинобудування. Дубляни, Львівський НУВМБТ. 2025.

75 с. текст. част., 12 рис., 52 літературних джерел.

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню експлуатаційної стійкості деталей обладнання зі зварними швами, отриманими методом СМТ.

У роботі проведено аналіз сучасних технологій зварювання, особливостей використання СМТ процесів.

Практична цінність роботи полягає у можливості впровадження удосконалених технологій СМТ зварювання з мінімальними похибками при сингулярності зварювальних робіт.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	8
1.1. Експлуатаційна стійкість зварних конструкцій деталей обладнання зі зварними швами, отриманими методом Cold Metal Transfer	8
1.2 Довговічність зварних з'єднань, отриманих методом Cold Metal Transfer	13
1.3. Зона термічного впливу зварного з'єднання, отриманого методом Cold Metal Transfer	19
2 ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ	27
2.1 Особливості застосування технології Cold Metal Transfer	27
2.2 Міцність зварних швів, отриманих Cold Metal Transfer	32
2.3 Сингулярність 6-осьових роботів: причини, шляхи уникнення, наслідки для зварювання	38
2.4 Моделювання тепловкладення при зварюванні за допомогою методу кінцевих елементів	47
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	59
3.1 Охорона праці при використанні промислових роботів	59
3.2 Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому зварюванні	63
4 ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОБОТІВ	66
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75

ВСТУП

Сучасний розвиток переробних виробництв супроводжується зростанням вимог до надійності, довговічності та енергоефективності технологічного обладнання. Значна частка відповідальних елементів машин і агрегатів виконується у вигляді зварних конструкцій, що працюють під дією статичних, змінних і ударних навантажень, у поєднанні з агресивними чи санітарно чутливими середовищами. На практиці відмови устаткування часто зумовлені не вичерпанням міцності основного матеріалу, а деградацією зварних швів, зародженням і розвитком тріщин у зоні шва та втрачанням герметичності. Це обумовлює зростаючу актуальність досліджень, спрямованих на підвищення експлуатаційної стійкості деталей обладнання зі зварними з'єднаннями.

На цьому фоні особливу увагу привертає процес Cold Metal Transfer, який завдяки керованому перенесенню металу та зниженому тепловкладенню дає змогу формувати шви з меншою деформацією, зменшеною зоною термічного впливу та кращою якістю з'єднання, особливо для тонколистових і різномірних матеріалів. Разом з тим широке впровадження СМТ у переробних виробництвах супроводжується низкою інженерних проблем, пов'язаних з чутливістю процесу до відхилень зазору, точності позиціонування пальника та просторового положення деталей, а також з необхідністю стабільного забезпечення газового захисту. За відсутності належного контролю ці фактори можуть призводити до виникнення характерних дефектів шва і, як наслідок, до зниження довговічності конструкцій навіть за номінально сприятливих режимів зварювання.

Додатковим викликом є те, що традиційні підходи до контролю якості СМТ зварних з'єднань здебільшого спираються на вибірковий візуальний огляд і окремі методи неруйнівного контролю, які не забезпечують повної та відтворюваної картини реальної дефектності в умовах серійного виробництва. Перехід до концепцій цифрового виробництва і інтелектуального технічного діагностування потребує впровадження автоматизованих систем оцінювання стану швів, зокрема

технологій машинного зору, інтегрованих з моделями машинного навчання. Саме на стику керованих енергозберігаючих процесів наплавлення, зокрема СМТ, та інтелектуальних систем контролю якості з'являється можливість цілеспрямовано впливати на експлуатаційну стійкість деталей, пов'язуючи параметри процесу, геометрію та дефектність шва з ресурсом конструкції.

Отже, тема підвищення експлуатаційної стійкості деталей обладнання зі зварними швами, отриманими методом СМТ, є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору. Вона поєднує проблематику оптимізації режимів зварювання, керування тепловкладенням, мінімізації дефектів та впровадження автоматизованого візуального контролю, що у підсумку має забезпечити зростання довговічності та безпечності роботи обладнання переробних виробництв.

РОЗДІЛ I. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Експлуатаційна стійкість зварних конструкцій деталей обладнання зі зварними швами, отриманими методом Cold Metal Transfer

Експлуатаційна стійкість зварних конструкцій деталей обладнання є одним з ключових чинників надійності сучасних машинобудівних систем, зокрема енергетичного, транспортного та комунального обладнання, що забезпечує життєдіяльність територіальних громад. У контексті стійкого розвитку громад, проєктів модернізації інженерної інфраструктури та адаптації до кліматичних ризиків вимоги до безвідмовної роботи зварних вузлів істотно посилюються, оскільки відмова окремого елемента може призводити до тривалих перерв у наданні послуг, зростання експлуатаційних витрат та екологічних збитків [1-3].

Під експлуатаційною стійкістю зварних конструкцій надалі розумітимемо інтегральну здатність зварного елемента зберігати працездатність впродовж заданого ресурсу при дії змінних механічних, термічних та корозійних навантажень, характерних для конкретного технологічного процесу та середовища експлуатації [4, 5]. На рівні деталі обладнання експлуатаційна стійкість визначається поєднанням статичної міцності, втомної довговічності, тріщиностійкості, стійкості до корозійного та ерозійного зносу, а також стабільністю геометричних параметрів конструкції в часі [6]. При цьому саме зона зварного шва та прилегла до неї теплозмінена зона традиційно розглядаються як потенційно найвразливіші елементи конструкції, оскільки вони концентрують залишкові напруження, структурну неоднорідність та можливі дефекти формування [7].

Запровадження технології Cold Metal Transfer як різновиду дугового зварювання плавким електродом у захисному газовому середовищі, що характеризується керованим переносом металу з істотним зниженням

тепловкладення, відкриває додаткові можливості підвищення експлуатаційної стійкості зварних з'єднань, насамперед для тонкостінних елементів, сталевих та алюмінієвих та інших різнорідних з'єднань, а також деталей, чутливих до перегріву та деформацій [6, 8]. Особливість процесу полягає в поєднанні електричного керування струмом із зворотно-поступальним рухом зварювального дроту, що дає змогу реалізувати крапельний перенос металу при відносно низьких значеннях теплової енергії дуги, зменшити інтенсивність розбризкування та стабілізувати формування валика [9].

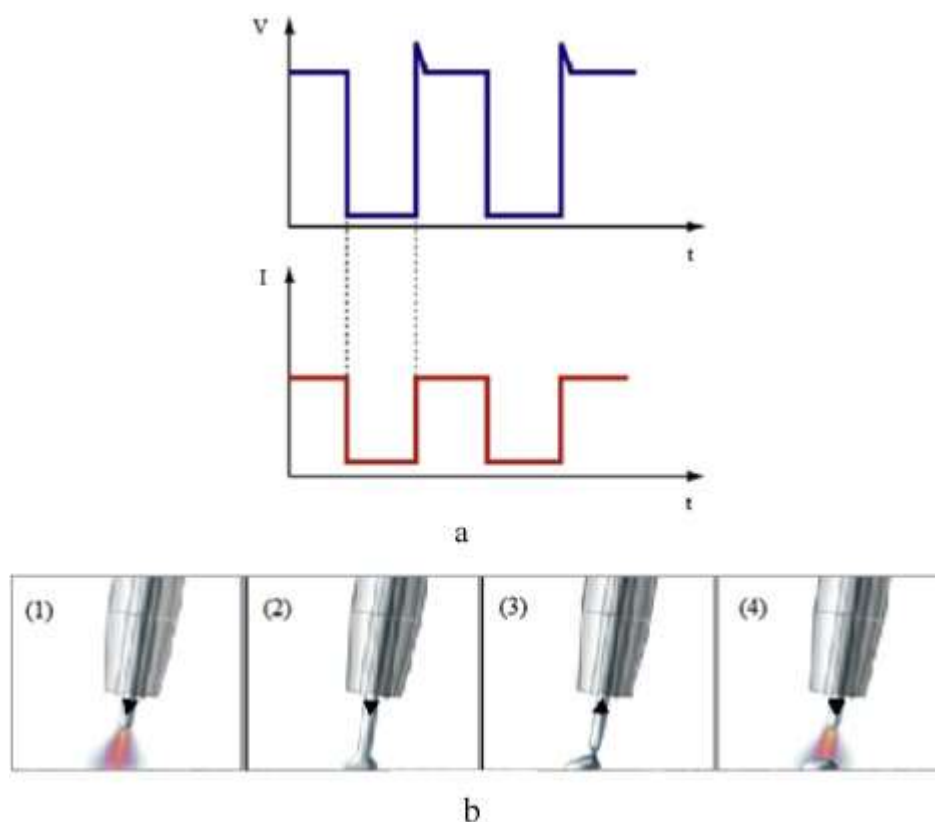


Рисунок 1.1 Технологія Cold Metal Transfer: зміна напруги та струму при зварювання (а) та етапи процесу (б)

Мікроструктурні переваги швів, отриманих методом Cold Metal Transfer, є одним із головних чинників зростання їх експлуатаційної стійкості. За результатами експериментальних досліджень для алюмінієвих та алюмінієво сталевих з'єднань показано, що внаслідок зменшеного тепловкладення і більш керованої кристалізації формується дрібнозерниста структура металу шва, а тепломінена зона має меншу

ширину порівняно з традиційними режимами MIG MAG зварювання [7]. Це знижує рівень структурного ослаблення, мінімізує утворення грубих кристалітів і твердих крихких фаз на межі поділу основного і наплавленого металу, а отже відтерміновує ініціацію втомних тріщин при циклічних навантаженнях. Для різнорідних алюмінієво сталевих з'єднань СМТ режим сприяє формуванню тонших і більш однорідних інтерметалідних прошарків, що покращує сумісність механічних властивостей на межі сполучення і підвищує опір відшаруванню [7].

Важливою складовою експлуатаційної стійкості є втомна довговічність зварних швів, оскільки більшість деталей обладнання в сучасних виробничих системах працює під дією змінних або багатоциклових навантажень (рис.1.2).

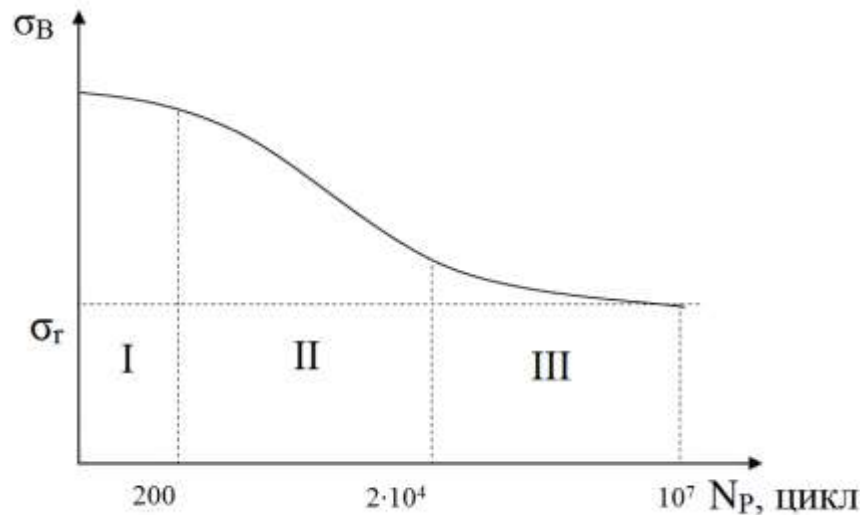


Рисунок 1.2 Крива втоми: зона пластичного деформування – I, зона малоциклової втоми – II, зона багатоциклової втоми – III.

Порівняльні випробування з'єднань, отриманих СМТ зварюванням і традиційними дуговими процесами, демонструють підвищення межі витривалості, що пов'язують із зниженням рівня залишкових розтягувальних напружень та зменшенням концентрації напружень на поверхневих нерівностях шва [6, 8]. Стабільна форма валика, менша кількість пор та непроварів, а також краща повторюваність профілю шва ведуть до більш рівномірного розподілу напружень і,

відповідно, до зменшення швидкості росту втомних тріщин. Для деталей, що працюють в умовах підвищеної вібрації та динамічних ударних навантажень, це безпосередньо трансформується в збільшення напрацювання до граничного стану та зменшення частоти позапланових відмов.

Ще один аспект експлуатаційної стійкості пов'язаний із геометричною стабільністю зварних конструкцій. У традиційних процесах зварювання надлишкове тепловкладення спричиняє значні деформації, перекоси та залишкові прогини, що потребує додаткового правлення або механічної обробки. У результаті частина ресурсу деталі фактично витрачається вже на етапі виготовлення. Застосування Cold Metal Transfer завдяки низькому рівню теплової енергії, зменшенню ширини тепломіненної зони та м'якшому температурному градієнту дозволяє суттєво знизити деформації після зварювання, зберігаючи проєктну геометрію вузлів, що особливо важливо для рам, корпусів, опорних конструкцій та тонкостінних резервуарів [6, 9]. Підвищена точність геометрії означає більш рівномірний розподіл зовнішніх навантажень між елементами, зниження локальних перенапружень та, як наслідок, більшу експлуатаційну стійкість системи в цілому.

Експлуатаційна стійкість зварних конструкцій деталей обладнання не може розглядатися ізолювано від умов середовища та режимів роботи, які визначаються просторовим розвитком територій, структурою землекористування і характером кліматичних ризиків.

Важливо зазначити, що експлуатаційна стійкість зварних конструкцій визначається не лише вибором технології зварювання, а й якістю інтеграції цієї технології у загальну систему управління життєвим циклом обладнання. Концепції управління проєктами, орієнтовані на стійкий розвиток, передбачають врахування повного життєвого циклу інженерних об'єктів, включаючи стадії планування, проєктування, виготовлення, експлуатації, технічного обслуговування та утилізації [3, 9]. Застосування Cold Metal Transfer у такій парадигмі повинно

супроводжуватися стандартизацією режимів зварювання, запровадженням цифрового моніторингу параметрів процесу, побудовою моделей цифрових двійників зварних вузлів, а також інтеграцією даних неруйнівного контролю в системи підтримки прийняття рішень щодо ремонтів та модернізацій. Поєднання технологічних переваг СМТ з методами GIS аналізу та кліматичного моделювання дає можливість розробляти диференційовані стратегії технічного обслуговування для обладнання, розташованого в зонах з різним рівнем ризику, що підвищує ефективність використання ресурсів і зменшує ймовірність критичних відмов [8, 9]. Окрему увагу слід приділити питанням адаптації конструкційних рішень до потреб проєктів відбудови та модернізації інфраструктури територіальних громад. Аналіз стратегій місцевого розвитку та регіональних програм, узгоджених з Цілями сталого розвитку, показує, що ключовими напрямками інвестицій є підвищення енергоефективності, розвиток місцевих систем відновлюваної енергетики, модернізація систем водопостачання і водовідведення, а також розвиток транспортної інфраструктури [2, 4]. У всіх цих напрямках значна частка обладнання містить зварні конструкції, для яких перехід до Cold Metal Transfer дає змогу скоротити витрати металу, зменшити викиди парникових газів за рахунок скорочення обсягу переробки та ремонтів, підвищити надійність роботи в умовах зростаючої кліматичної невизначеності. Відтак вибір СМТ режимів та конструкційної схеми зварних вузлів повинен розглядатися як елемент проєктних рішень на рівні програм розвитку громади, а не як суто технологічне питання цехового рівня [3, 4].

Проведені в останні роки експериментальні дослідження показують, що оптимізація параметрів Cold Metal Transfer з урахуванням конкретних умов експлуатації дозволяє отримати зварні з'єднання зі значним запасом міцності та довговічності. Для алюмінієвих, магнієвих і сталевих сплавів продемонстровано, що правильний вибір швидкості подачі дроту, зварювальної швидкості, амплітуди

коливань дроту і складу захисного газу забезпечує зменшення поруватості, тріщиноутворення та інших дефектів, які істотно знижують експлуатаційну стійкість [7, 9]. Крім того, Cold Metal Transfer добре поєднується з роботизованими комплексами й системами технічного зору, що дає змогу автоматизувати відстеження геометрії шва, адаптувати траєкторію пальника до реальної форми кромки і в режимі реального часу коригувати параметри зварювання. Це посилює повторюваність якості, знижує людський фактор і сприяє інтеграції зварювальних операцій у цифрові ланцюги створення доданої вартості [6, 8].

Узагальнюючи викладене, можна зазначити, що експлуатаційна стійкість зварних конструкцій деталей обладнання зі зварними швами, отриманими методом Cold Metal Transfer, формується як результат поєднання двох груп чинників. До першої належать фізико-металургійні особливості процесу СМТ, які забезпечують зниження тепловкладення, формування сприятливої мікроструктури та зменшення дефектності шва. Друга група пов'язана з конструкційними та технологічними рішеннями на рівні конкретних вузлів і виробів, що визначають геометрію з'єднань, розподіл напружень і можливості застосування наплавлених покриттів. Системне врахування чинників дозволяє підвищити надійність, безпеку та ресурс деталей обладнання, зменшити експлуатаційні витрати та підтримати стратегічні цілі стійкого розвитку й відбудови інфраструктури на рівні територіальних громад.

1.2. Довговічність зварних з'єднань, отриманих методом Cold Metal Transfer

Довговічність зварних з'єднань є одним з ключових критеріїв працездатності та експлуатаційної стійкості деталей машинобудівного обладнання, що працюють в умовах змінних навантажень, агресивного середовища та обмеженого доступу для ремонту. У більшості відповідальних конструкцій руйнування ініціюється саме в зоні зварного шва або в прилеглий до нього зоні термічного впливу, оскільки тут поєднуються концентратори напружень, зміна структурного стану металу та

залишкові напруження, викликані нерівномірним нагріванням і охолодженням [9, 10]. Тому вибір технології зварювання, що мінімізує теплове навантаження на основний метал, забезпечує стабільну геометрію шва та низький рівень дефектності, є визначальним для забезпечення необхідного ресурсу роботи деталей і вузлів.

Традиційні процеси дугового зварювання плавленням характеризуються підвищеним тепловкладенням, значною шириною зони термічного впливу та істотною структурною неоднорідністю, що призводить до появи м'яких прошарків або, навпаки, зон загартування з високою твердістю і крихкістю [11, 12]. У поєднанні з технологічними дефектами, такими як пори, шлакові включення, непровари або підрізи, це формує множину потенційних осередків зародження втомних тріщин. Для деталей, що працюють під дією циклічних згинальних, крутильних або комбінованих навантажень, роль цих осередків зростає, оскільки локальна концентрація напружень визначає початок та швидкість розвитку втомного руйнування [13, 14]. Саме тому в сучасній машинобудівній практиці зростає інтерес до низькотемпературних та керованих варіантів дугового зварювання, до яких належить метод Cold Metal Transfer.

Метод Cold Metal Transfer (CMT) розглядають як вдосконалений різновид процесів MIG/MAG, у якому перенесення крапель електродного металу здійснюється за рахунок керованого зворотно-поступального руху дроту, синхронізованого з короткими замиканнями дуги [13]. Під час короткого замикання система керування подає сигнал на відведення дроту, що призводить до відриву краплі за рахунок поєднання електромагнітних та механічних сил, при цьому миттєво знижується струм і тепловкладення в основний метал. Така кінематика перенесення металу забезпечує стабільне горіння дуги, практично відсутні розбризкування та суттєве зменшення лінійної енергії порівняно з традиційними режимами дугового зварювання плавленням [13; 14]. Наслідком є зменшення

деформацій, викликаних зварюванням, звуження зони термічного впливу та зниження рівня залишкових напружень розтягу, що безпосередньо позитивно впливає на довговічність зварних з'єднань.

Особливості теплового циклу при СМТ зумовлюють специфічну еволюцію структури металу зварного шва та зони термічного впливу. Для алюмінієвих та їх сплавів, які широко застосовуються у транспортному й енергетичному машинобудуванні, низьке тепловкладення сприяє формуванню більш дрібнозернистої структури шва, зменшенню перегріву приповерхневих шарів та обмеженню коагуляції зміцнювальних фаз [14, 15]. Для сталей та різнорідних з'єднань сталь–алюміній або сталь–сплави кольорових металів зменшення ширини зони термічного впливу означає зниження обсягу металу, в якому можливе утворення загартованих структур типу мартенситу або нижнього бейніту з високою жорсткістю та схильністю до крихкого руйнування [11, 18]. Таким чином, контролювання теплового циклу у процесі СМТ створює передумови для формування сприятливішого градієнта механічних властивостей від металу шва до основного металу, що зменшує різкі зміни жорсткості та відповідні концентрації напружень.

Дослідження механічних властивостей зварних з'єднань, отриманих методом СМТ, підтверджують, що за умов раціонального підбору параметрів процесу можна досягти рівня статичної міцності, порівнянного або вищого за традиційні процеси MIG/MAG, при одночасному зменшенні деформацій і дефектності [14–16]. Важливу роль відіграють швидкість подачі дроту, швидкість зварювання та синергетичні характеристики джерела живлення, які визначають співвідношення між тепловкладенням та швидкістю кристалізації металу шва. За оптимальних поєднань цих параметрів формується рівномірний шов із плавними переходами до основного металу, відсутні подрізи, а геометрія кореня з'єднання має мінімальну ступінь концентрації напружень [14, 15]. Для деталей машинобудівного обладнання

це означає зменшення ймовірності локального перевищення робочих напружень над втомною межею матеріалу в зоні шва, що безпосередньо збільшує ресурс роботи елементів конструкції.

Окрему увагу в контексті довговічності приділяють властивостям кутових та стикових швів, виконаних методом СМТ на сталевих і алюмінієвих деталях. Експериментальні дослідження властивостей кутових швів, отриманих роботизованим МАГ-процесом з використанням СМТ, засвідчують, що за умови правильної орієнтації шва відносно головних напрямків навантаження і дотримання рекомендованої товщини підсилення забезпечується не лише висока статична міцність, а й покращена втомна витривалість порівняно з аналогічними швами, отриманими традиційним імпульсним дуговим зварюванням [17]. У таких з'єднаннях спостерігається більш рівномірний розподіл твердості по перерізу шва та зони термічного впливу, відсутні локальні піки твердості, що часто корелюють із зонами крихкого руйнування, а залишкові напруження мають нижчий рівень.

Втомна довговічність є критичним показником експлуатаційної стійкості для зварних деталей, що працюють під дією змінних навантажень, характерних для валів, рам, корпусів насосів, резервуарів та трубопроводів машинобудівного обладнання [9]. Результати експериментальних досліджень показують, що застосування СМТ дозволяє суттєво підвищити втомну міцність не тільки алюмінієвих та сталевих з'єднань, а й різнорідних систем типу алюміній–сталь завдяки зменшенню дефектності та оптимізації структури перехідної зони [15, 18]. Зокрема, встановлено, що за рахунок формування більш гладкого профілю кореня шва, зменшення пористості та уникнення непроварів, кількість потенційних зародкових осередків втомних тріщин знижується, а криві втоми зміщуються у бік вищих рівнів циклічного навантаження. Водночас залишається визначальним вплив внутрішніх дефектів, включень, пор та зміцнювальних частинок, які, у разі їх

наявності, можуть бути основними центрами зародження та розвитку тріщин, що вимагає поєднання технологічних і контрольних заходів [9, 18].

Структурна та напружена станова неоднорідність в околі шва формує складну картину розподілу локальних опорів руйнуванню, яка повинна враховуватися при розрахунках на довговічність. Дослідження міцності та довговічності кільцевих зварних з'єднань оболонкових елементів машинобудівних конструкцій показують, що форма шва, радіус переходу, відхилення від номінальної товщини підсилення та наявність внутрішніх дефектів істотно змінюють рівень циклічних напружень і, відповідно, втомну межу [10]. Застосування СМТ у таких конструкціях дає змогу зменшити відхилення геометрії швів від розрахункової, забезпечити стабільні параметри проплавлення та краще відтворення заданої форми з'єднання. Це особливо важливо для тонкостінних оболонок, де надлишкове тепловкладення може призвести до втрати стійкості форми, появи гофр та додаткових монтажних напружень, що скорочує ресурс конструкції.

Поведінка тріщин в зонах зварювання при циклічному навантаженні істотно залежить від локальних мікроструктурних характеристик та поля залишкових напружень, що детально проаналізовано в сучасних роботах, присвячених кінетиці тріщиноутворення у сталевих конструкціях [11]. Зменшення тепловкладення при застосуванні СМТ обмежує величину розтягувальних залишкових напружень і сприяє формуванню більш сприятливих умов для розподілу пластичних деформацій у приповерхневих шарах. Це, у свою чергу, знижує швидкість росту втомних тріщин, збільшує довжину стадії зародження та розширює діапазон циклічних напружень, у межах яких можливий безпечний режим роботи конструкції [9, 11]. Для деталей обладнання, що експлуатуються в умовах комбінованого впливу механічних та температурних навантажень, таке поєднання технологічних і структурних факторів визначає реальний строк служби.

Підвищення довговічності зварних деталей обладнання методом СМТ неможливе без інтеграції цієї технології у систему забезпечення якості та надійності, яка включає етапи проєктування, виготовлення, контролю і експлуатаційного моніторингу [12]. На стадії проєктування необхідно враховувати специфіку формування швів СМТ, обмеження за товщиною металу, орієнтацією швів та доступністю для роботизованого пальника, щоб забезпечити мінімізацію концентраторів напружень у найбільш навантажених перерізах [13, 17]. На стадії виготовлення важливим є дотримання рекомендованих вікон параметрів процесу, що визначені експериментальними та аналітичними дослідженнями, і застосування сучасних систем моніторингу дуги, що дозволяють оперативно виявляти відхилення від номінального режиму.

Післязварювальна обробка також може суттєво вплинути на довговічність з'єднань, виконаних методом СМТ. Для сталевих деталей ефективними є механічні методи зниження залишкових напружень і введення стискаючих поверхневих напружень, зокрема кульове обкатування або пневмодробоструминна обробка, а також локальне термічне відпускання, яке вирівнює градієнти твердості та знімає піки розтягувальних напружень [9, 11]. Для алюмінієвих сплавів доцільним є застосування режимів штучного старіння, які узгоджуються з тепловим циклом зварювання і дозволяють відновити або підвищити міцнісні характеристики у зоні термічного впливу [15, 18]. Усі ці заходи доповнюють переваги СМТ як низькотеплового процесу і забезпечують комплексний вплив на експлуатаційну стійкість деталей.

Слід також підкреслити, що реальний ресурс зварних деталей обладнання визначається не лише початковими механічними характеристиками шва, а й стабільністю цих властивостей протягом усього життєвого циклу, включно з можливими змінами умов навантаження, корозійним впливом середовища та випадковими перевантаженнями [10, 12]. Порівняльні дослідження різних варіантів

дугового зварювання показують, що завдяки зменшенню теплової деформації і залишкових напружень, шви, виконані методом СМТ, демонструють меншу чутливість до додаткових експлуатаційних факторів, зокрема до повторних локальних нагрівів, невеликих геометричних пошкоджень та корозійного підточування кромek [14, 17]. Це означає, що за умови правильної інтеграції СМТ у технологічний процес, можливо не тільки збільшити розрахунковий термін служби, а й підвищити прогнозованість та відтворюваність ресурсу для серійних виробів.

Підсумовуючи, можна зазначити, що метод Cold Metal Transfer завдяки низькому тепловкладенню, керованому перенесенню металу та високій стабільності процесу створює сприятливі передумови для підвищення довговічності зварних з'єднань деталей машинобудівного обладнання. Зменшення ширини зони термічного впливу, обмеження рівня залишкових напружень розтягу, формування більш однорідної структури та гладкої геометрії шва знижують імовірність зародження та розвитку втомних тріщин, а отже підвищують експлуатаційну стійкість вузлів [17, 18]. Ефективність використання СМТ як інструмента підвищення ресурсу деталей суттєво зростає за умов його поєднання з обґрунтованими конструктивними рішеннями, коректним розрахунком на довговічність, застосуванням сучасних методів неруйнівного контролю та післязварювальної обробки, що формує цілісну систему забезпечення надійності зварних конструкцій у машинобудуванні.

1.3. Зона термічного впливу зварного з'єднання, отриманого методом Cold Metal Transfer

Зона термічного впливу зварного з'єднання посідає ключове місце у забезпеченні експлуатаційної стійкості деталей обладнання, оскільки саме тут зосереджуються структурні перетворення, градієнти властивостей та залишкові

напруження, які визначають опір утомі, крихкому руйнуванню та корозійному розтріскуванню в умовах реальної роботи машинобудівних конструкцій [19, 20]. Для процесів дугового зварювання, включно з Cold Metal Transfer, зона термічного впливу формується в результаті короткочасного нагрівання металу основи до температур вище та нижче критичних точок з подальшим швидким чи помірним охолодженням. У традиційних процесах GMAW значний тепловий внесок призводить до широкої зони термічного впливу з вираженим укрупненням зерна і різкими змінами твердості, що знижує довговічність обладнання. У випадку Cold Metal Transfer, який характеризується імпульсним керуванням перенесенням крапель електродного металу і зниженим тепловкладенням, очікується суттєве звуження зони термічного впливу та пом'якшення негативних наслідків термічного циклу [23].

У класичній металознавчій інтерпретації зона термічного впливу поділяється на підзони перегріву, нормалізації, міжкритичного та субкритичного нагріву, для кожної з яких характерні власні мікроструктурні стани та рівень пошкоджуваності [19, 20].

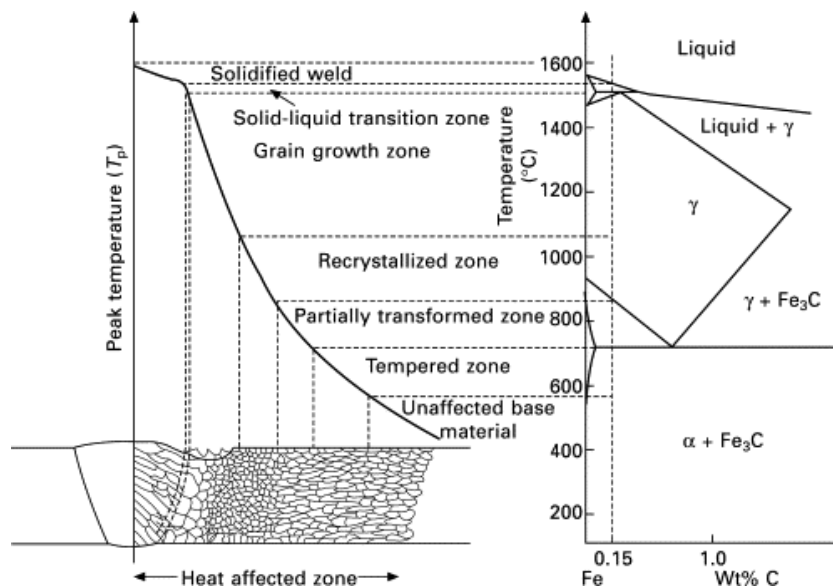


Рисунок 1.3 Загальний вигляд зони термічного впливу відносно діаграми стану для залізовуглецевого сплаву

Для конструкційних сталей у підзоні перегріву формується крупнозерниста аустенітна структура, яка після охолодження перетворюється на переважно загартовану або верхньобейнітну структуру з підвищеною твердістю та крихкістю. У міжкритичній ділянці спостерігається часткове аустенітизування, що після охолодження дає м'які феритно-перлітні або феритно-бейнітні структури, які часто утворюють зону місцевого «розм'якшення» зниженої несної здатності [24]. Дослідження мікроструктури зварних з'єднань армувальних профілів із киплячих сталей показують, що саме конфігурація підзон і масштаби дендритних та феритних структур у зоні термічного впливу визначають локальні концентрації напружень і схильність до зародження тріщин [20]. Особливістю СМТ-процесу є зменшення максимальних температур і часу перебування металу в аустенітній області, що обмежує зростання зерна в зоні перегріву та звужує м'яко-загартовані інтервали.

Для алюмінієвих сплавів, які широко застосовуються в легких конструкціях машинобудівного обладнання, зона термічного впливу формує характерний профіль розчинення та коагуляції зміцнювальних фаз, що безпосередньо впливає на втрату міцності й жорсткості [22]. У високоміцних Al Zn Mg Cu Er Zr сплавах традиційні процеси MIG спричиняють значне укрупнення зерна та істотне «розм'якшення» зони термічного впливу, внаслідок чого міцність зварного з'єднання може становити лише частку від міцності основного металу [4]. Порівняльні дослідження показали, що при використанні СМТ ширина зони термічного впливу істотно менша, середній розмір зерна у зварному шві та прилеглій зоні зменшується, а частка висококутових меж зростає. Це підвищує опір спрямованому поширенню тріщин і сприяє більш рівномірному розподілу пластичної деформації під навантаженням, що в кінцевому підсумку позитивно впливає на експлуатаційну стійкість деталей.

Для сталевих конструкцій зварні з'єднання, отримані методом Cold Metal Transfer, також демонструють специфічний характер формування зони термічного впливу. Внаслідок низького тепловкладення та стабілізованого дугового процесу СМТ забезпечує меншу ширину зони перегріву і нижчу температуру пікового нагріву, порівняно з класичними режимами GMAW [3; 5]. Дослідження наплавки CuSi3 методом GMAW СМТ показали, що мікроструктура основного металу безпосередньо біля межі сплавлення змінюється менш інтенсивно, ніж за умов традиційного імпульсного дугового зварювання, при цьому градієнти твердості в поперечному перерізі зменшуються [21]. Така поведінка є принципово важливою для деталей обладнання, що зазнають комбінованого впливу циклічних навантажень і корозійного середовища, оскільки зменшення локальних жорстких чи м'яких «вставок» у зоні термічного впливу обмежує концентрацію напружень і уповільнює накопичення втомлених пошкоджень.

Результати досліджень зібрані в оглядовій роботі, присвяченій Cold Metal Transfer технології, підтверджують, що низьке тепловкладення в поєднанні з контрольованим короткозамикальним перенесенням металу дає змогу істотно впливати на термічний цикл і, відповідно, на властивості зони термічного впливу [23]. Порівняння СМТ з іншими модифікованими дуговими процесами показує, що саме для СМТ характерні найнижчі значення вхідної енергії при збереженні достатньої глибини проплавлення, що мінімізує перегрів металу основи й сприяє утворенню дрібнозернистої структури в зоні термічного впливу. У ряді досліджень також відзначається зниження рівня залишкових напружень, пов'язане з більш плавним розподілом температур у часі, що безпосередньо відбивається на довговічності зварних з'єднань під дією низькоциклічних та високочастотних навантажень [23, 25].

Особливо показовими з погляду експлуатаційної стійкості є результати досліджень втомної міцності трубопровідних сталей Х65 за умови застосування

комбінованого CMT/GMAW-процесу для виконання корневих та заповнювальних проходів [25]. Встановлено, що зона термічного впливу таких з'єднань характеризується більш сприятливим профілем твердості, нижчим рівнем розтягувальних залишкових напружень і зменшеною концентрацією мікродефектів, зокрема неметалевих включень та мікропор. Унаслідок цього криві втомного руйнування зміщуються в бік більших чисел циклів до відмови, що свідчить про підвищення ресурсу трубопровідних систем. Для машинобудівних деталей, які працюють в умовах вібрацій, змінних тисків та ударних навантажень, подібний характер формування зони термічного впливу означає зниження ризику раптових відмов і можливість реалізації більш високих рівнів напруженого стану без втрати надійності.

Важливою складовою формування властивостей зони термічного впливу є параметри режиму зварювання, які визначають форму і тривалість термічного циклу. У випадку Cold Metal Transfer контроль струму, напруги, швидкості зварювання та частоти імпульсів безпосередньо впливає на величину питомого тепловкладення і максимальну температуру в зоні термічного впливу [23, 27]. Дослідження теплофізичної поведінки CMT-процесу свідчать, що зниження теплової енергії за рахунок коротких циклів «запалення гасіння» дуги у поєднанні з високою швидкістю переміщення пальника забезпечує меншу ширину зони термічного впливу та швидше охолодження металу [23]. Отже, оптимізація параметрів CMT-процесу дозволяє цілеспрямовано формувати структуру зони термічного впливу, за необхідності зміщуючи баланс між твердістю, пластичністю та опором зародженню тріщин. Для деталей відповідального призначення доцільно застосовувати методи математичного моделювання теплових процесів і підбір режимів на основі критеріїв мінімізації розмірів критичних підзон ЗТВ.

На мікрорівні характеристика зони термічного впливу визначається не лише термічним циклом, а й хімічним складом основного металу та зварювального дроту.

Для високоміцних алюмінієвих сплавів, легованих Zr, показано, що дрібнодисперсні зміцнювальні фази та стабільні дисперсоїди під час СМТ-зварювання краще зберігаються в зоні термічного впливу, ніж при традиційному MIG-процесі, завдяки нижчим температурам розчинення та коротшому часу перебування в області перегріву [22]. Для різнорідних з'єднань Al сталь, навпаки, саме зона термічного впливу і прилегла до неї область визначають розподіл та морфологію крихких інтерметалідних фаз, від яких безпосередньо залежить міцність і пластичність з'єднання [27]. Отже, для забезпечення високої експлуатаційної стійкості деталей обладнання зі СМТ-зварними швами необхідно враховувати не лише загальний рівень тепловкладення, а й здатність окремих легувальних елементів утворювати або стабілізувати зміцнювальні та крихкі фази в зоні термічного впливу.

Окремий напрям удосконалення зони термічного впливу пов'язаний із застосуванням післязварювальної термічної обробки, яка дає змогу знизити градієнти твердості, зняти частину залишкових напружень та відновити у певному ступені дисперсію зміцнювальних фаз [24, 26]. Для зварних з'єднань з алюмінієвих сплавів, отриманих методом GMAW СМТ, показано, що відповідно підібраний режим штучного старіння сприяє частковому відновленню міцності в зоні термічного впливу та зменшенню розбіжності механічних властивостей між швом, ЗТВ та основним металом [26]. Аналогічні підходи застосовуються і для сталевих з'єднань, де нормалізація або відпуск зварної конструкції можуть зменшити крихкість загартованих підзон і підвищити опір крихкому руйнуванню [19, 24]. Разом з тим післязварювальна обробка потребує додаткових енергетичних і часових витрат, тому при проектуванні технології СМТ-зварювання важливо досягти такого поєднання параметрів режиму та вибору матеріалів, яке забезпечить прийнятні характеристики зони термічного впливу без обов'язкового застосування складних термічних циклів.

З практичної точки зору зона термічного впливу визначає місця потенційного зародження тріщин та локальних пошкоджень у деталях машинобудівного обладнання як при напруженому стані від внутрішнього тиску та механічних навантажень, так і при корозійно-механічному впливі робочого середовища. Доведено, що звуження та структурне вирівнювання зони термічного впливу при застосуванні Cold Metal Transfer призводить до підвищення прогнозованості поведінки зварних з'єднань, зниження розкиду механічних властивостей і, відповідно, до можливості зменшення запасів міцності, закладених на стадії проектування [23, 27]. Для багатьох елементів, зокрема корпусних деталей, рам, кронштейнів, опор та з'єднувальних елементів трубопроводів, це відкриває можливість зниження маси конструкцій без втрати надійності, а отже підвищення енергоефективності обладнання.

У сучасних технологіях наплавлення та відновлення деталей машинобудівного обладнання методом СМТ особливого значення набуває формування сприятливої зони термічного впливу між основним металом та наплавленим шаром. Низький тепловклад забезпечує мінімальну глибину змішування і незначне порушення структури основи, що у поєднанні з раціональним вибором складу наплавного матеріалу дозволяє одержати зносостійкі, корозійно-стійкі або термостійкі покриття з підвищеною довговічністю [21, 23]. Зменшення ширини і жорсткості перехідної зони безпосередньо сприяє зниженню ризику відшарування покриття та зародження тріщин на межі розділу, отже збільшується ресурс деталей, що працюють в умовах абразивного зношування, кавітаційної ерозії або високотемпературної корозії.

Підсумовуючи, можна зазначити, що зона термічного впливу є критичним елементом зварного з'єднання, а її структурно-фазовий стан і розміри визначають рівень експлуатаційної стійкості деталей обладнання. Застосування технології Cold Metal Transfer завдяки зниженому тепловкладенню, керованому перенесенню

металу та можливості тонкого налаштування режимних параметрів дає змогу суттєво змінити характер формування зони термічного впливу, знизити її, зменшити градієнти твердості та залишкових напружень, а також знизити схильність до зародження та поширення тріщин. Поєднання оптимізованих СМТ-режимів, раціонального вибору матеріалів і, за потреби, післязварювальної термічної обробки створює передумови для підвищення ресурсу і надійності конструкцій машинобудівного обладнання, що працюють у складних силових та корозійних умовах [27].

РОЗДІЛ II ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Особливості застосування технології Cold Metal Transfer

Технологія Cold Metal Transfer посідає важливе місце серед сучасних дугових способів зварювання в середовищі захисних газів, оскільки поєднує високу продуктивність, стабільність процесу та істотне зниження тепловкладення у зварювані елементи. Для машинобудівного обладнання, де значна частина навантажених деталей з'єднується зварюванням, саме тепловий вплив, структура зони термічного впливу та рівень залишкових напружень визначають експлуатаційну стійкість і ресурс вузлів [28, 29]. У цих умовах вибір процесу, здатного сформувати шов із мінімальною кількістю дефектів, низькою деформацією та підвищеною втомною міцністю, стає ключовим елементом проектування. СМТ-технологія, розроблена як керована модифікація короткодугового GMAW, орієнтована саме на розв'язання зазначених проблем за рахунок синхронізованого керування струмом і переміщенням електродного дроту [28, 30].

Сутність процесу Cold Metal Transfer полягає у тому, що подача дроту та форма зварювального струму керуються за допомогою високошвидкісної електроніки, яка поєднує вимірювання миттєвого напруження та струму дуги із зворотною реакцією подаючого механізму [30, 34]. Зварювальний цикл складається з послідовних фаз: стабільного горіння дуги, зростання краплини металу на кінці дроту, короткого замикання, активного відведення дроту назад та повторного запалювання дуги. У момент короткого замикання джерело струму різко зменшує силу струму, що запобігає неконтрольованому вибуховому відриву краплини; синхронізований зворотний рух дроту спрямовує краплину в зварювальну ванну з мінімальною кінетичною енергією [30]. Унаслідок цього практично усувається розбризкування металу, а сформована ванна відзначається більш спокійною гідродинамікою порівняно з традиційними режимами короткого замикання.

Особливістю СМТ є істотно знижене тепловкладення, що досягається за рахунок короткого часу горіння дуги в кожному циклі, невисокої середньої сили струму та можливості використання імпульсних режимів із регульованою довжиною дуги [28, 29]. Експериментальні дослідження показують, що питомий тепловий внесок під час СМТ може бути на 30–50 % нижчим, ніж у класичних режимах MIG/MAG при однаковій швидкості подачі дроту [28, 31]. Зниження тепловкладення безпосередньо впливає на форму ванни та характер кристалізації металу шва: формується більш вузька зона термічного впливу з дрібнозернистою структурою, зменшується схильність до перегріву й повторного аустенітизаційного перетворення, обмежується розростання дендритів та утворення крихких фаз [31, 33]. Для деталей машин, чутливих до деформацій і короблення, це означає зменшення післязварювальних залишкових напружень і кращу збереженість геометричних допусків.

Фізико-металургічні режими СМТ детально вивчено за допомогою високошвидкісної відеозйомки та реєстрації миттєвих коливань струму і напруги [30, 34]. Показано, що дрібнокраплинний переніс металу, характерний для цього процесу, реалізується за рахунок координованого відведення дроту в момент короткого замикання; таким чином, краплина відривається не стільки електромагнітними силами, скільки керованою механічною дією подаючого механізму [30]. У результаті формується стабільна дуга з періодичними, добре відтворюваними циклами переносу, що знижує чутливість процесу до коливань зазору, зміни положення пальника чи невеликих відхилень у складі захисного газу. Для автоматизованих і роботизованих систем, характерних для сучасного машинобудування, така відтворюваність безпосередньо трансформується в підвищення повторюваності властивостей зварних швів [29, 33].

Переваги СМТ технології найбільш виразно проявляються під час зварювання тонколистової сталі, алюмінієвих сплавів та різномірних комбінацій

«алюміній–сталь», а також при наплавленні зносостійких та корозійностійких покриттів [31, 32]. У роботах, присвячених зварюванню тонколистових виробів, показано, що використання СМТ дає змогу отримати рівномірні шви з малою опуклістю, практично без прожогів, навіть за товщини матеріалу менше 1 мм [31]. Це особливо важливо для корпусних деталей машин, де локальне зменшення товщини через прожоги або надмірну шорсткість шва призводить до концентрації напружень і передчасного втомного руйнування. Для наплавлення та ремонтного відновлення деталей СМТ забезпечує низьку ступінь змішування основного металу з наплавленим, що дає змогу формувати покриття зі складом, максимально наближеним до вихідного присадного матеріалу, а отже, підвищувати твердість, зносостійкість і корозійну стійкість робочих поверхонь [29, 33].

Питання експлуатаційної стійкості деталей обладнання зі зварними швами безпосередньо пов'язані з мікроструктурою металу шва та зони термічного впливу, а також з рівнем залишкових напружень, сформованих під час зварювання [32-34]. Для класичних способів дугового зварювання характерним є широкий інтервал термічного впливу з окремими підзонами перегріву, повної та часткової перекристалізації, що супроводжується утворенням грубозернистих структур і локально знижених механічних властивостей [33]. Використання СМТ завдяки зменшеному тепловкладенню та покращеному формуванню кореня шва дозволяє звужити цю зону, отримати дрібнозернистий метал шва та сприятливий перехідний радіус у корені, що зменшує коефіцієнт концентрації напружень і підвищує втомну міцність [28, 33]. Таким чином, сама природа процесу СМТ формує передумови для підвищення ресурсу деталей, які працюють в умовах багатократних змінних навантажень.

Значний обсяг даних щодо впливу СМТ на втомну та корозійно-втомну поведінку зварних з'єднань отримано при дослідженні трубопровідних сталей, що працюють у жорстких середовищах нафто- та газотранспортних систем [32, 33].

Продemonстровано, що застосування СМТ як процесу підварювання кореня стикових з'єднань сталі Х65 забезпечує підвищення втомної довговічності приблизно на чверть у порівнянні з варіантами, де кореневий шар виконано традиційним GMAW [32]. Це поліпшення пояснюється більш плавним переходом у зоні кореня, меншим рівнем дефектів типу непровару та пор, а також більш однорідною структурою металу шва. Додаткові дослідження в середовищі, насиченому сірководнем, підтвердили, що СМТ-підварювання сприяє кращій корозійно-втомній стійкості завдяки оптимальній комбінації структури феритних і бейнітних складових та зменшенню напружень у кореневій зоні [33]. Для машинобудівних об'єктів, що працюють у корозійно-активних або вібраційних умовах, такі результати є важливим аргументом на користь впровадження СМТ у технологічні маршрути виготовлення.

Оцінювання експлуатаційних властивостей зварних швів, отриманих методом СМТ, ґрунтується на комплексі експериментальних методів, який охоплює механічні випробування, дослідження структури та фазового складу, визначення залишкових напружень, а також неруйнівний контроль [28, 34]. Стандартна програма включає статичні випробування на розтяг і згин, визначення твердості та мікротвердості в перерізі шва, ударну в'язкість металу шва та зони термічного впливу, а також втомні та корозійно-втомні тести для відтворення реальних умов навантаження [32, 33]. Для обладнання, що працює під тиском або за наявності циклічних змін температури, особливе значення мають S–N діаграми та криві росту втомних тріщин, які дозволяють співвіднести параметри режиму СМТ з очікуваним ресурсом деталей. У практиці конструювання такі залежності використовують для вибору допустимих рівнів робочих напружень і оптимізації форми шва.

Мікроструктурні дослідження СМТ-з'єднань здійснюють з використанням оптичної та електронної мікроскопії, дифракційних методів і аналізу локального хімічного складу [30, 31]. Ці методи дають змогу виявити характер розподілу фаз,

морфологію зерен, наявність неметалевих включень та їх зв'язок із механічними властивостями. Для контрольованих СМТ-режимів типовим є формування дрібнодендритної або рівновісної структури металу шва з відносно рівномірним розподілом легувальних елементів; зона термічного впливу характеризується зменшеною шириною інтервалу перегріву й домінуванням тонкозернистих структур нормалізації [31, 34]. Виявлення локальних зон перегріву, грубозернистих включень чи сегрегацій дає змогу коригувати параметри процесу, змінювати вид присадного дроту або швидкість охолодження для цілеспрямованого формування структури з урахуванням умов роботи конкретної деталі.

Окрему групу методів становлять вимірювання залишкових напружень і деформацій, які істотно впливають на тривкість зварних елементів. Для аналізу СМТ-з'єднань застосовують рентгенографічні та дифракційні методи, отвірний метод, а також числове моделювання на основі сконцентрованих або розподілених джерел теплоти, адаптованих під специфіку СМТ [29, 33]. Зіставлення розрахункових та експериментальних даних підтверджує, що через менший тепловклад у СМТ-зварюванні рівень розтягальних залишкових напружень у небезпечних зонах, як правило, нижчий, а розподіл напружень більш плавний порівняно з традиційним GMAW. Для масивних елементів машинобудівних конструкцій це означає зменшення схильності до холодних тріщин, поліпшення геометричної стабільності та зниження потреби в післязварювальному правленні.

Неруйнівний контроль залишається обов'язковою складовою оцінювання якості СМТ-швів, попри їх знижену схильність до утворення пор і непроварів. Залежно від товщини та призначення деталей використовують візуально-вимірювальний контроль, капілярний метод, радіографічний та ультразвуковий контроль, включаючи сучасні технології фазованих решіток і TOFD [8–10]. Для тонколистових елементів особливу увагу приділяють контролю кореня шва, де навіть невеликі дефекти можуть стати зародками втомних тріщин. Поєднання

неруйнівних методів з результатами мікроструктурних та механічних досліджень дозволяє сформувати цілісну картину впливу режимів СМТ на якість зварних з'єднань і їхню придатність до роботи в конкретних умовах експлуатації.

Узагальнюючи, технологія Cold Metal Transfer є ефективним інструментом підвищення експлуатаційної стійкості деталей машинобудівного обладнання завдяки поєднанню низького тепловкладення, стабільного дрібнокраплинного переносу металу та високої відтворюваності процесу. Кероване формування структури металу шва і зони термічного впливу, зменшення залишкових напружень і дефектності, підтверджене результатами механічних, втомних і корозійно-втомних випробувань, безпосередньо трансформується у зростання ресурсу та надійності зварних елементів [28-30]. Комплексне застосування методів дослідження властивостей з'єднань, що включає механічні, мікроструктурні, напружено-деформовані та неруйнівні підходи, створює науково обґрунтовану базу для оптимізації параметрів СМТ та впровадження цієї технології в сучасні проекти машинобудівного обладнання, орієнтовані на підвищення довговічності, енергоефективності та надійності.

2.2. Міцність зварних швів, отриманих Cold Metal Transfer

Міцність зварних швів визначає допустимі рівні навантажень, які можуть сприймати вузли машинобудівного обладнання без формування тріщин, втрати працездатності чи передчасного виходу з ладу. Для деталей, що працюють у складних напружено-деформованих станах, зокрема під дією змінних, ударних та високочастотних циклічних навантажень, від якості зварного з'єднання залежить експлуатаційна стійкість усього агрегату. Застосування процесу Cold Metal Transfer, який відзначається зниженою тепловою потужністю дуги, стабільним крапельним перенесенням металу та практично повною відсутністю бризок, суттєво змінює умови формування шва і зони термічного впливу, а отже і закономірності

формування міцності та довговічності зварних з'єднань [35]. У цьому контексті аналіз міцності швів, отриманих методом СМТ, є ключовою передумовою обґрунтованого вибору режимів зварювання при проєктуванні надійних та стійких до пошкоджень деталей машинобудівного обладнання.

Під міцністю зварного шва в інженерній практиці розуміють сукупність показників статичної та втомної міцності, ударної в'язкості, тріщиностійкості і розподілу твердості по перерізу шва та зони термічного впливу. Для конструкційних сталей та алюмінієвих сплавів важливою є не лише відповідність тимчасового опору розриву та межі текучості рівню основного металу, а й здатність зварного шва витримувати довготривалі циклічні навантаження без розвитку втомних тріщин у зоні сплавлення чи валика шва [36]. Саме поєднання статичної та втомної міцності визначає експлуатаційну стійкість деталей, таких як рами технологічного обладнання, елементи корпусів, опорні балки, кронштейни, що працюють у режимах змінних навантажень, характерних для машинобудівних та транспортних систем.

Процес Cold Metal Transfer базується на керованому короткозамиканні дроту з динамічним реверсом подачі, завдяки чому крапля металу відокремлюється за рахунок механічного відтягування дроту, а не високих електромагнітних сил. Це дозволяє суттєво знизити струм короткого замикання, обмежити тепловкладення та забезпечити стабільну дугу при зварюванні тонких листів і різнорідних матеріалів [35, 37]. Порівняно з традиційним імпульсним GMAW процес СМТ забезпечує менший рівень теплової дії на основний метал, меншу ширину зони термічного впливу і зниження залишкових деформацій, що створює сприятливі передумови для формування дрібнозернистої структури та підвищення міцності зварного з'єднання [37, 38]. Для роботизованих зварювальних комплексів додатковою перевагою є висока повторюваність процесу, що зменшує розкид механічних характеристик між окремими швами.

Мікроструктурні дослідження зварних з'єднань, отриманих методом СМТ, показують, що за умов зменшеного тепловкладення відбувається звуження зони перегріву та інтенсивного росту зерна, а зеренна структура в наплавленому металі набуває дрібнозернистого дендритного або рівновісного характеру залежно від хімічного складу і швидкості охолодження [36, 38]. Для алюмінієвих сплавів встановлено, що мікроструктура зони термічного впливу при СМТ залишається ближчою до структури основного металу, ніж при традиційному дуговому зварюванні, що зменшує ступінь розм'якшення внаслідок розчинення чи коагуляції зміцнювальних фаз [36, 40]. Для сталей низьке тепловкладення сприяє формуванню дрібнопластинчастого феритного або феритно-бейнітного каркаса замість грубих колонних кристалів, які є потенційними концентраторами напружень. У результаті шов, отриманий СМТ, характеризується більш рівномірним розподілом твердості, відсутністю різких перепадів між основним металом і зоною сплавлення, що позитивно позначається на несучій здатності при складних видах навантаження [35, 38].

Результати механічних випробувань для зразків із алюмінієвих сплавів, зварених методом СМТ, демонструють можливість досягнення ефективності з'єднання за межею міцності та межею текучості на рівні 90–100 % від показників основного металу за умови оптимального підбору режимів [36, 38]. Для з'єднань сплавів 6082 та 5182 встановлено, що при раціональному виборі присадного дроту та параметрів процесу коефіцієнти збереження межі текучості, тимчасового опору та відносного подовження можуть наближатися до 100, 98 і 85 % відповідно [36]. Подібні тенденції підтверджено для зварювання сплаву AA6082-T4, де збільшення швидкості зварювання та відповідне зниження питомого тепловкладення призводять до підвищення тимчасового опору та збереження високої пластичності завдяки звуженню зони розм'якшення і формуванню дрібнозернистої структури валіка [38]. Таким чином, СМТ дозволяє отримати високоміцні з'єднання, що є

критично важливим для деталей, на які накладаються підвищені вимоги щодо масогабаритних характеристик та ресурсу.

Ключовим узагальненим параметром, через який описується вплив режимів СМТ на міцність шва, є питомий тепловий внесок Q , що визначається відношенням добутку напруги, струму та коефіцієнта корисної дії дуги до швидкості зварювання [38, 39]. Зменшення Q шляхом підвищення швидкості переміщення пальника або зниження струму з урахуванням особливостей процесу короткозамикального перенесення дозволяє обмежити ширину зони термічного впливу та уникнути надмірного перегріву околосшовної ділянки. Чисельні моделі напружено-деформованого стану зварних з'єднань алюмінієвих сплавів, зварених СМТ, показують, що зниження тепловкладу без втрати повноти проплавлення призводить до зменшення рівня поздовжніх та поперечних залишкових напружень, а також до більш рівномірного їх розподілу по товщині шва [39]. Це безпосередньо впливає на несучу здатність з'єднання, оскільки залишкові розтягувальні напруження складаються з робочими і можуть значно зменшувати запас міцності при статичному та циклічному навантаженні.

Особливе значення для експлуатаційної стійкості деталей мають втомні характеристики зварних швів. Навіть за умови, що тимчасовий опір шва наближається до показників основного матеріалу, локальні концентрації напружень у зоні переходу від валика до основного металу або поблизу пор, непроварів і підрізів можуть бути ініціаторами втомних тріщин, які розвиваються за багатоциклових режимів навантаження [41]. Дослідження зварних з'єднань високоякісних алюмінієвих сплавів, отриманих методом СМТ, показали, що за рахунок більш дрібної структури наплавленого металу й звуженої зони розм'якшення можна досягти підвищення межі витривалості порівняно з традиційним GMAW, однак чутливість до геометрії переходу валика та поверхневих дефектів залишається істотною [40]. Формування плавного радіусного

переходу, контроль формування підрізів і застосування післязварювальних методів обробки, зокрема механічного наклепу чи електродинамічної обробки, дозволяють додатково підвищувати втомну міцність і продовжувати ресурс деталей [40, 42].

Для машинобудівного обладнання, яке працює в умовах змінних і ударних навантажень, наприклад для рам мобільних машин, несучих елементів зварних корпусів, опор технологічних агрегатів, саме втомна міцність зварних швів часто є визначальним критерієм експлуатаційної стійкості. Використання СМТ дає можливість поєднати відносно невелику товщину стінок із високою несучою здатністю, зменшити масу конструкцій і підвищити стабільність геометричних розмірів, що важливо для високошвидкісного обладнання та прецизійних систем [35, 38]. При цьому за рахунок зниження теплових деформацій спрощуються операції складання і зменшується необхідність у витратних операціях виправлення, що безпосередньо впливає на собівартість експлуатації і ремонтпридатність. Підвищена рівномірність механічних властивостей по довжині шва та між різними вузлами сприяє прогнозованому характеру руйнування, коли навіть у разі відмови працює закладений запас міцності, що важливо з позицій безпеки.

Разом з тим низький тепловий внесок та специфіка короткозамикального перенесення металу в процесі СМТ створюють ризики появи характерних дефектів, які можуть суттєво знизити фактичну міцність шва. До таких дефектів належать непровари, холодні напливи, пори, включення шлаку та локальні підрізи, що виникають при неправильному виборі положення пальника, надмірно низькій тепловій потужності або недостатній швидкості подачі дроту [35, 41]. У практиці контролю якості зварних з'єднань наголошується, що дефекти, пов'язані з порушенням форми шва і неповнотою проплавлення, є найбільш небезпечними з точки зору статичної та втомної міцності, оскільки формують сильні концентрації напружень і можуть ініціювати тріщини при навантаженнях, що нижчі за розрахункові [41]. Отже, для забезпечення високої надійності швів СМТ необхідне

поєднання оптимізації режимів, коректної конструкції підготовки кромek і застосування неруйнівного контролю, насамперед ультразвукового та радіографічного.

Значний вплив на міцність швів СМТ має конструктивно-технологічне проектування з'єднань. Урахування напрямку основних робочих напружень при виборі конфігурації шва, забезпечення достатньої товщини катета, формування плавних переходів, уникнення перехрещення швів у зонах максимальних напружень та раціональне розташування точок закінчення зварювання дозволяють зменшити чутливість з'єднань до дефектів і підвищити їх фактичну міцність [37, 42]. Роботизоване виконання швів СМТ створює додаткові можливості контролю траєкторії пальника, стабілізації швидкості та зазорів у стику, що знижує розкид параметрів шва та підвищує повторюваність механічних характеристик. Це особливо важливо для серійного виробництва деталей, де основним завданням є не досягнення рекордних значень міцності для окремих зразків, а забезпечення стабільно високого рівня несучої здатності для всієї партії виробів.

Ще одним напрямом підвищення міцності та довговічності швів, отриманих СМТ, є застосування післязварювальної обробки, спрямованої на релаксацію залишкових напружень і формування сприятливого напружено-деформованого стану. Дослідження для алюмінієвих сплавів показали, що використання електродинамічної обробки або високочастотної проковки в зоні валика шва дозволяє знизити рівень розтягувальних залишкових напружень і підвищити межу витривалості, особливо за наявності поверхневих втомних ушкоджень [42]. Для деталей, що працюють у середовищах з корозійним чи абразивним впливом, доцільним є комбінування СМТ із додатковими операціями обробки поверхні, наприклад нанесенням зміцнювальних шарів або механічним поліруванням зони переходу, що додатково зменшує ймовірність зародження тріщин.

Таким чином, міцність зварних швів, виконаних методом Cold Metal Transfer, формується комплексною взаємодією низького тепловкладення, специфіки мікроструктури наплавленого металу та зони термічного впливу, рівня і розподілу залишкових напружень, наявності або відсутності дефектів та конструктивних особливостей з'єднання. За правильного вибору режимів і конструкції шва СМТ забезпечує близькі до основного металу показники статичної міцності та підвищену втомну стійкість, що безпосередньо сприяє підвищенню експлуатаційної стійкості деталей машинобудівного обладнання. Поєднання точного керування тепловим внеском, роботизованого виконання, сучасних методів контролю й післязварювальної обробки створює підґрунтя для проєктування зварних конструкцій з тривалим ресурсом і прогнозованою надійністю у складних умовах експлуатації.

2.3 Сингулярність 6-осьових роботів: причини, шляхи уникнення, наслідки для зварювання

Розвиток роботизованого дугового зварювання, зокрема із застосуванням процесу Cold Metal Transfer, істотно підвищив вимоги до точності, плавності та передбачуваності руху 6-осьових промислових роботів. Для отримання зварних швів з підвищеною експлуатаційною стійкістю необхідно забезпечити сталі швидкість руху пальника, кут його нахилу, довжину вильоту дроту та стабільність дуги протягом усього зварювального шляху [43, 44]. Одним із ключових факторів, що порушує ці умови, є кінематичні сингулярності маніпулятора, які призводять до різкого зростання необхідних швидкостей обертання окремих ланок, до нестабільної орієнтації інструмента і, як наслідок, до деградації якості та довговічності зварних з'єднань. Тому розуміння фізичної сутності сингулярностей, їхніх причин та методів уникнення є необхідною передумовою для забезпечення надійної роботи роботизованих комплексів СМТ-зварювання деталей обладнання.

У загальному вигляді сингулярністю просторового 6-осьового маніпулятора називають такий стан кінематичного ланцюга, за якого матриця Якобі робота втрачає повний ранг, а її визначник прямує до нуля [43]. У такому положенні перехід від координат у просторі суглобів до координат швидкості інструмента у робочому просторі або стає неможливим, або вимагає нескінченно великих швидкостей окремих приводів. З точки зору теорії керування це означає часткову втрату керованості, оскільки деякі напрями руху інструмента вже не можуть бути реалізовані незалежними рухами суглобів [43–45]. У практичній робототехніці виробники контролерів замість математичного наближення до нескінченних швидкостей вводять програмні обмеження, унаслідок чого перед сингулярними конфігураціями відбувається різке зниження швидкості, зміна конфігурації або навіть зупинка робота [44]. Для зварювання це проявляється у коливаннях лінійної швидкості та орієнтації пальника, зміні тепловкладення та геометрії шва.

Типові сингулярності 6-осьових зварювальних роботів класифікують на зап'ясткові, ліктьові, плечові та граничні, пов'язані з межами робочої зони [43–45]. Зап'ясткова сингулярність виникає, коли осі суглобів зап'ястка (як правило, 4, 5 і 6) вирівнюються, унаслідок чого одна з обертальних ступенів вільності стає надлишковою, а дві інші геометрично збігаються (рис. 2.1).

C

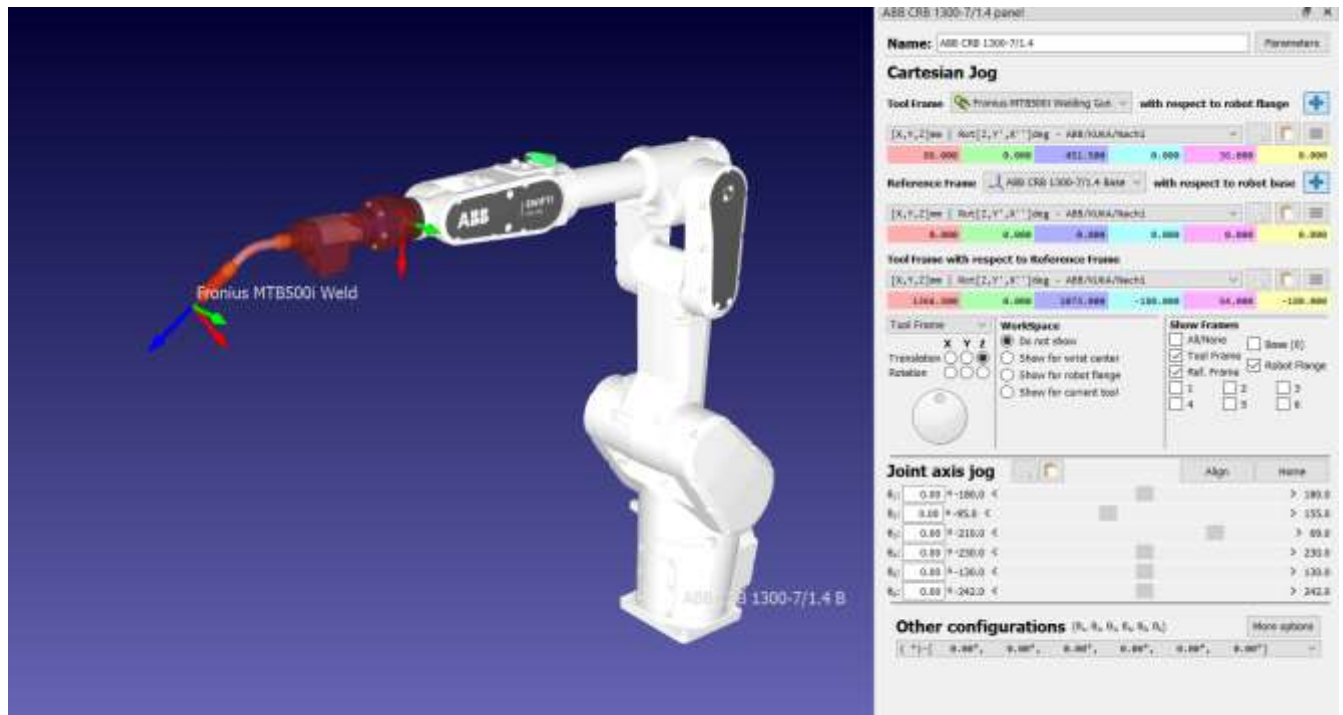


Рисунок 2.1. Зап'ясткова сингулярність 6-ти осьового колаборативного зварювального робота ABB CRB 1300-7/1.4

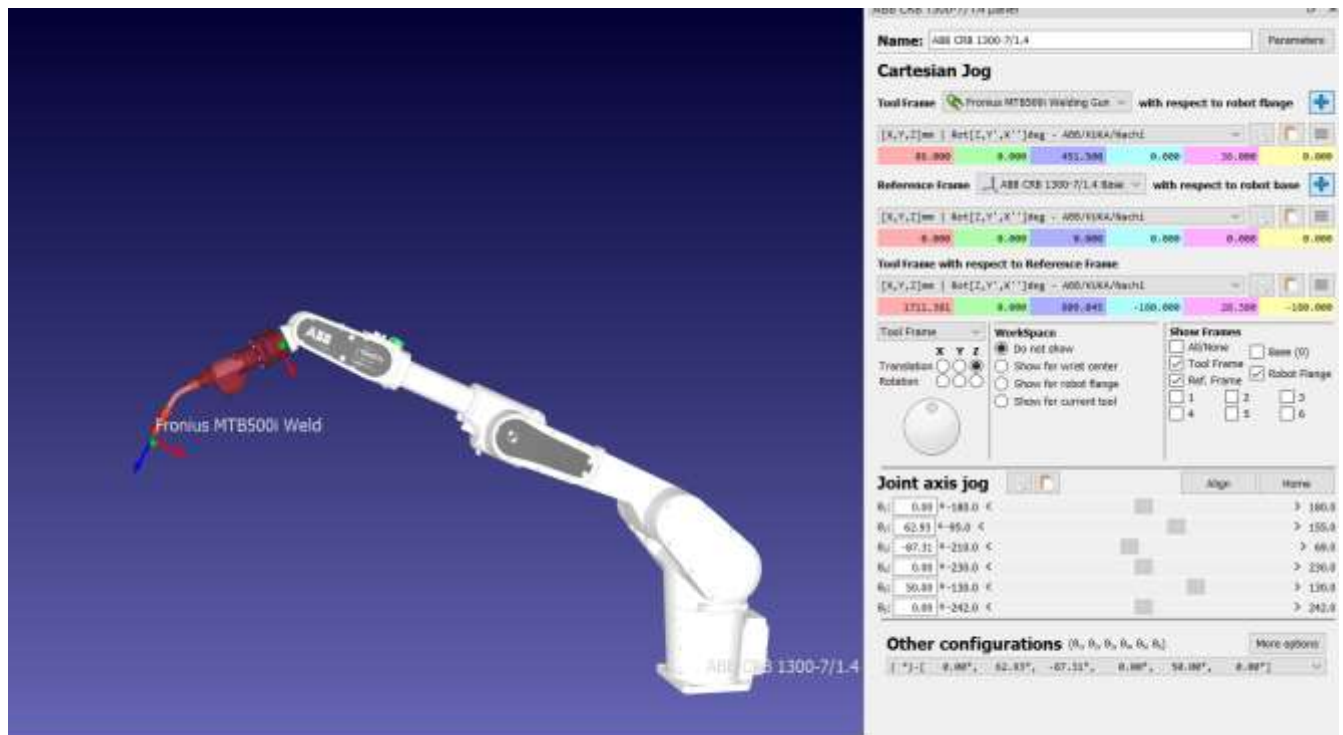


Рисунок 2.2. Ліктьова сингулярність 6-ти осьового колаборативного зварювального робота ABB CRB 1300-7/1.4

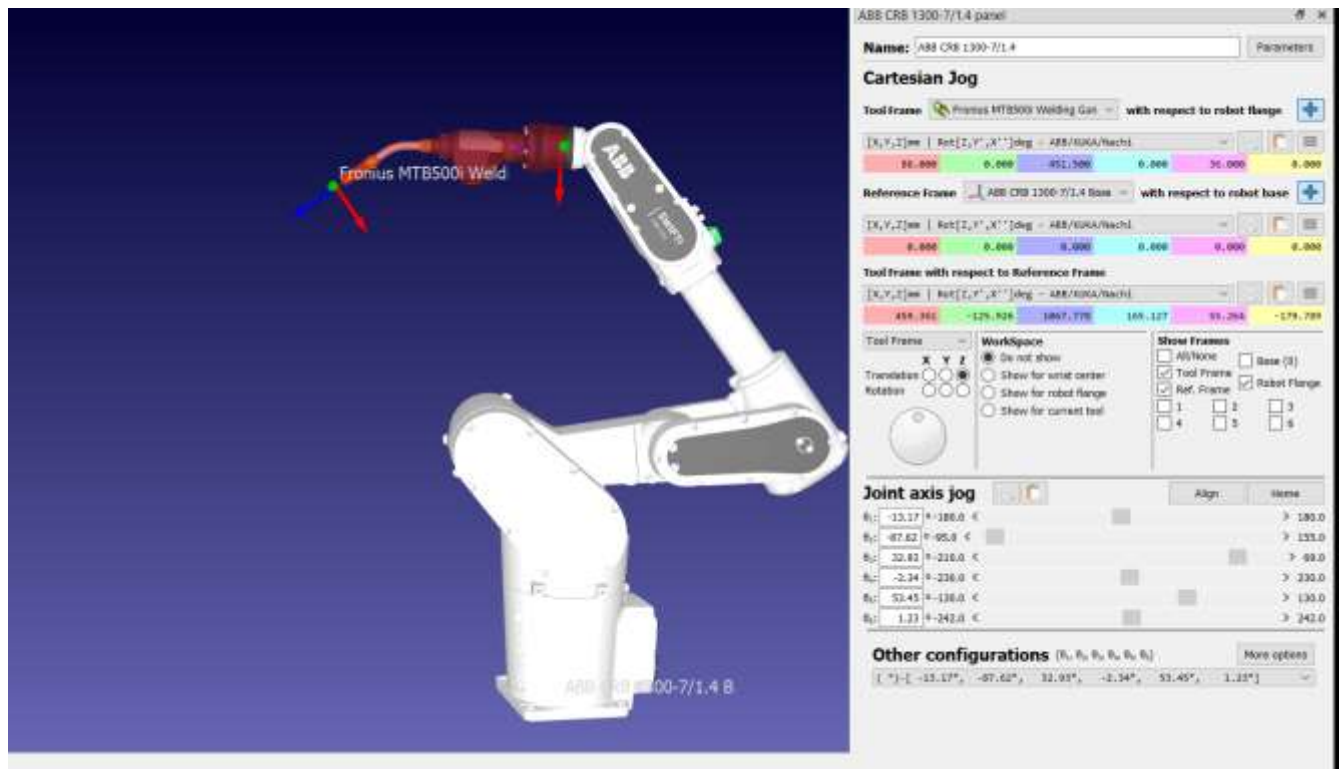


Рисунок 2.3. Плечова сингулярність 6-ти осьового колаборативного зварювального робота ABB CRB 1300-7/1.4

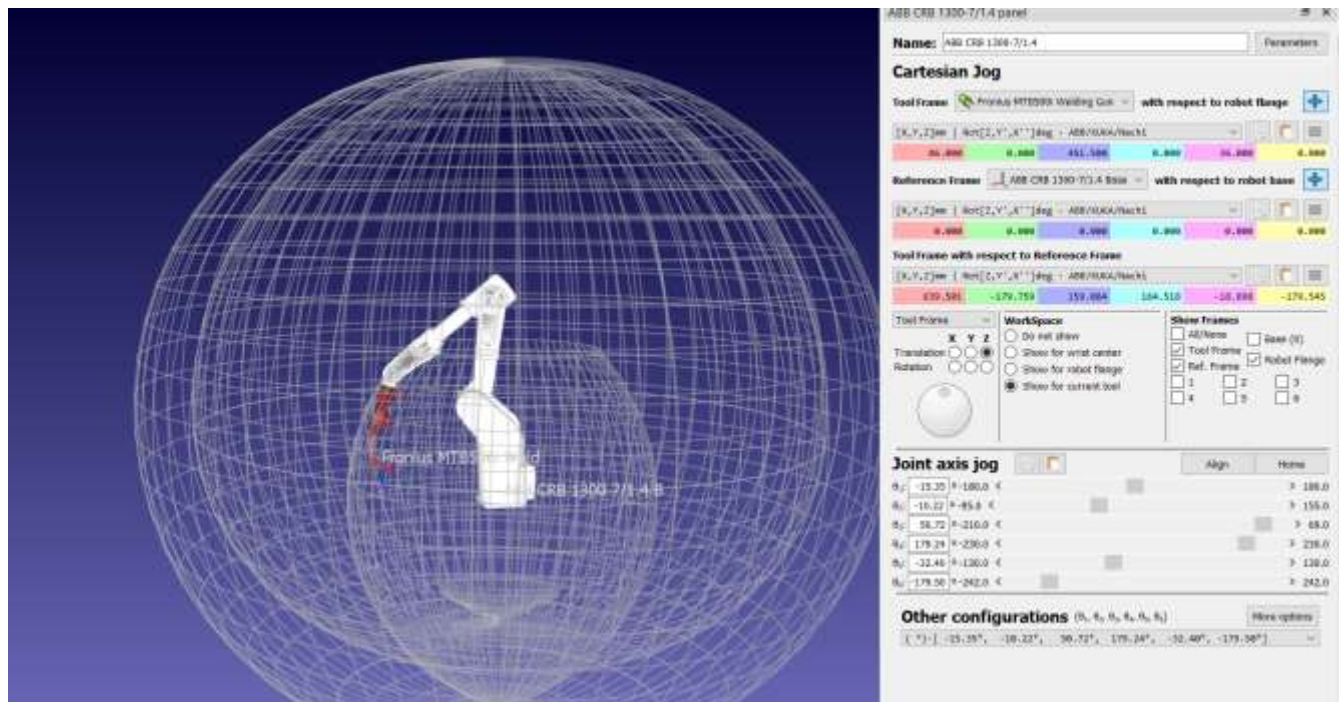


Рисунок 2.4. Гранична сингулярність 6-ти осьового колаборативного зварювального робота ABB CRB 1300-7/1.4

Для зварювальних задач це часто відповідає положенням, коли робот намагається здійснити значний поворот пальника навколо його поздовжньої осі при майже нульовому відхиленні по куту нахилу [44]. Ліктьова сингулярність пов'язана з майже повним випрямленням ланцюга «плече-передпліччя», коли три центральні осі робота виявляються майже в одній площині; при цьому маніпулятор втрачає ефективну здатність змінювати положення інструмента в окремих напрямках [43]. Плечові та граничні сингулярності виникають поблизу геометричних меж досяжності й призводять до близьких за наслідками ефектів, зокрема до різкого зростання навантажень на приводи та похибок позиціонування.

Механізм впливу сингулярності на реальний рух робота полягає у тому, що малі переміщення інструмента в декартовому просторі відповідають дуже великим кутовим переміщенням у просторі суглобів [43–45]. Якщо система керування обмежує максимальні швидкості й прискорення приводів, то, наближаючись до сингулярної конфігурації, вона змушена зменшувати швидкість траєкторії або змінювати конфігурацію, щоб задовольнити обмеження. У послідовному дуговому зварюванні, де наперед задані сталі значення швидкості зварювання, струму, напруги та коливальних рухів пальника, така поведінка призводить до локальних «швидкісних провалів» або до раптових змін орієнтації торця інструмента [44]. Особливо чутливим до цього є процес СМТ, у якому стабільність короткодугових імпульсів, довжина дуги та динаміка подачі дроту критично залежать від рівномірного переміщення пальника [44–48].

Процес Cold Metal Transfer є варіантом дугового зварювання плавким електродом, у якому подача дроту й струм керуються таким чином, щоб чергувати фази стабільного переносу металу з фазами істотного зниження струму та майже повного «охолодження» дуги [49]. Завдяки цьому вдається суттєво зменшити тепловкладення у деталь, знизити розбризкування та забезпечити кращий контроль над формою валика при роботизованому зварюванні тонколистової сталі й

алюмінієвих сплавів [46, 47]. Однак така технологічна чутливість до режимів також означає, що будь-які коливання швидкості переміщення чи кута нахилу пальника, спричинені наближенням до сингулярних положень, відразу відображаються на стабільності крапельного переносу, довжині дуги та локальному тепловому циклі [47–49]. У результаті в шві виникають мікроструктурні й геометричні неоднорідності, які знижують його втому та корозійну тривкість.

Численні дослідження СМТ-процесу показали, що зменшене тепловкладення у поєднанні з плавним характером переносу металу забезпечує формування дрібнозернистої структури, звуженої зони термічного впливу та низького рівня залишкових напружень [46–48]. Це створює потенціал підвищення експлуатаційної стійкості зварних деталей машин, зокрема в умовах змінних навантажень та втоми. Водночас переваги СМТ реалізуються повною мірою лише за умови дотримання стабільної кінематики руху пальника; локальні коливання швидкості зварювання, спричинені кінематичними обмеженнями робота, можуть нівелювати ефект зниженого тепловкладення, призводячи до зростання залишкових напружень і концентрацій напружень у перетині шва [48–50]. Таким чином, уникнення сингулярностей є одним з необхідних чинників, що забезпечують фактичну експлуатаційну перевагу процесу СМТ над традиційними методами дугового зварювання.

З точки зору довговічності зварних конструкцій особливе значення мають локальні дефекти геометрії шва, неоднорідний розподіл твердості та структурні зміни в зоні термічного впливу. Коли робот наближається до сингулярної конфігурації, можливі короточасні сповільнення або прискорення руху, які спричиняють локальне збільшення або зменшення тепловкладення на одиницю довжини [44, 46]. У режимі СМТ це може проявлятися у зміні ширини валика, глибини проплавлення, появі підрізів або, навпаки, надмірного підвищення підсилення шва. Такі геометричні відхилення формують додаткові концентрації

напружень, що прискорюють зародження та розвиток втомних тріщин у вузлах, які працюють під дією змінних навантажень, наприклад у елементах рам, корпусів машин, опорних конструкціях [48–50]. Крім того, неузгодженість орієнтації пальника може призвести до нестійкого дугового процесу та порушення металургійного проплавлення по кромках, що додатково знижує запас міцності шва. Сучасні підходи до аналізу та уникнення сингулярностей ґрунтуються на оцінюванні так званої маніпуляційної спроможності, яка кількісно характеризує віддаленість поточного положення робота від сингулярної множини в просторі суглобів [43]. Для цього використовують скалярні показники, визначені на основі матриці Якобі, наприклад визначник або число обумовленості; малі значення цих показників свідчать про наближення до сингулярності. У роботизованому зварюванні такі методи дають можливість ще на етапі офлайн-програмування, у середовищах типу RobotStudio, ROBOGUIDE чи RoboDK, виявити проблемні ділянки траєкторій і змінити їх, не допускаючи критичних положень маніпулятора [44, 45]. Роботизовані системи високого класу мають вбудовані функції «singularity avoidance», які автоматично коригують орієнтацію зап'ястка або переносять рух на альтернативну конфігурацію при збереженні заданого положення TCP, але ефективність таких алгоритмів значною мірою залежить від початкової геометрії траєкторії [44].

Особливе місце в контексті роботизованого СМТ-зварювання займають дослідження, у яких запропоновано інтегровані алгоритми уникнення сингулярностей та досягнення суглобових меж саме для дугового зварювання [46]. У таких роботах продемонстровано, що використання надлишкових ступенів вільності 6-осьового маніпулятора для п'ятикоординатного завдання «позиція плюс орієнтація пальника з фіксованим кутом атаки» дозволяє перебудовувати конфігурацію робота таким чином, щоб залишатися у віддаленні від сингулярних областей і водночас не порушувати вимог до положення зварювальної дуги.

Важливим елементом є включення у критерій оптимізації не лише відстані до сингулярності, а й обмежень на зміни орієнтації та на швидкість обертання зап'ястка, що безпосередньо впливає на стабільність траєкторії пальника та якість шва [44, 45].

З інженерної точки зору уникнення сингулярностей починається із правильного компонування робото-технічної комірки. Орієнтація бази робота відносно зварювальних столів, позиціонерів, конвеєрів та габаритів виробів повинна забезпечувати виконання основних груп швів у зонах робочого простору, де маніпуляційна спроможність є максимальною, а відстань до сингулярних положень значною [43]. При проектуванні пристроїв закріплення та виборі послідовності зварювальних проходів доцільно мінімізувати необхідність рухів із повним випрямленням «плече-передпліччя» чи з граничними значеннями повороту зап'ястка. Для довгих поздовжніх швів на циліндричних або призматичних деталях у багатьох випадках ефективніше забезпечити обертання деталі на позиціонері та відносно малий кутовий діапазон руху робота, ніж, навпаки, «обганяти» шов роботами та виходити на крайні конфігурації суглобів. Ще одним аспектом є врахування спеціальних алгоритмів контролера, які в околі сингулярних положень автоматично зменшують швидкість руху, зберігаючи обмеження на суглобові швидкості та прискорення. Для операцій, де допустиме короткочасне локальне зниження швидкості, це може бути прийнятним компромісом. Однак у роботизованому СМТ-зварюванні, де тепловкладення на одиницю довжини безпосередньо пропорційне відношенню зварювальної потужності до лінійної швидкості, навіть короткі уповільнення формують ділянки із підвищеною шириною валика, більшим розміром зони термічного впливу та, відповідно, вищими залишковими напруженнями [49]. Тому доцільнішим підходом є попереднє перепланування траєкторій таким чином, щоб не допустити спрацьовування

«захисних» режимів контролера у ключових зонах шва, наприклад у місцях максимальних розрахункових напружень майбутньої конструкції.

Зв'язок між кінематичною поведінкою робота, тепловими циклами зварювання та залишковим ресурсом конструкційних елементів досить переконливо проявляється у дослідженнях чисельного прогнозування довговічності зварних трубопровідних елементів із локальними дефектами [50]. Локальні відмінності у тепловкладенні та пов'язані з ними неоднорідності розподілу залишкових напружень істотно впливають на ймовірність зародження тріщин земленої втоми та на оцінку залишкового ресурсу. Для СМТ-зварних вузлів деталей машин ця логіка зберігається, причому завдяки зниженому тепловкладенню базовий рівень залишкових напружень може бути нижчим порівняно з традиційними процесами MIG/MAG [46]. Однак якщо до цього додаються сингулярні ефекти траєкторій, які породжують локальні перегріті ділянки та неоднорідний розподіл мікроструктури, очікуваний вииграш у довговічності може бути частково або повністю втрачений.

Оскільки зварні з'єднання у деталях обладнання часто працюють у складних силових та температурних умовах, для підвищення їх експлуатаційної стійкості важливо інтегрувати у проектування роботизованого СМТ-зварювання як механічні, так і математичні аспекти уникнення сингулярностей. На етапі інженерного моделювання доцільно поєднувати аналіз робочої зони робота, оцінку маніпуляційної спроможності, теплові розрахунки режимів СМТ, а також оцінювання довговічності критичних швів з урахуванням локальних неоднорідностей. Такий підхід дозволяє вибрати конфігурації, які забезпечують не лише досяжність усіх швів без сингулярностей, а й мінімізують варіації тепловкладення та залишкових напружень, що прямо пов'язано з прогнозованим залишковим ресурсом зварних вузлів.

Підсумовуючи, сингулярність 6-осьових роботів є практичним фактором, що безпосередньо впливає на стабільність процесу роботизованого зварювання, особливо в режимі Cold Metal Transfer. Причиною сингулярностей є певні взаємні положення ланок маніпулятора, за яких втрачається незалежність ступенів вільності та різко зростає чутливість до малих переміщень. Наслідком для зварювання стають коливання швидкості та орієнтації пальника, нестабільність дуги, зміна тепловкладення, геометричні та структурні неоднорідності шва, що врешті-решт знижує експлуатаційну стійкість зварних деталей. Уникнення сингулярностей шляхом раціонального компоновання робото-технічної комірки, офлайн-аналізу траєкторій, використання надлишкових ступенів вільності та урахування спеціальних алгоритмів контролера є важливою складовою інженерного забезпечення високої довговічності конструкцій із СМТ-зварними швами. Інтеграція цих підходів з методами оцінювання залишкового ресурсу створює підґрунтя для підвищення надійності та ефективності експлуатації обладнання в умовах сучасного машинобудівного виробництва.

2.4 Моделювання тепловкладення при зварюванні за допомогою методу кінцевих елементів

Аналіз і керування розподілом температур у процесі СМТ зварювання є ключем до прогнозування структури та властивостей металу шва, формування залишкових напружень і деформацій, а також до подальшої цифрової інтеграції процесу з системами машинного зору для оцінювання якості. Тому математичне та чисельне моделювання температурних полів у СМТ процесах набуває високої актуальності як складова побудови цифрових двійників зварювання.

Базою для опису теплових процесів під час зварювання є нестационарне рівняння теплопровідності з рухомим джерелом теплоти. У загальному випадку це рівняння дифузійного типу, де зміна температури T у часі визначається

теплопровідністю матеріалу, ефективною теплоємністю з урахуванням фазових перетворень та об'ємною густиною теплового джерела, яке рухається вздовж траєкторії зварювальної ванни. Класичною відправною точкою є аналітичні рішення типу розв'язку Розенталя для напівнескінченного тіла з рухомим точковим або лінійним джерелом теплоти, що дозволяють отримати замкнені вирази для температурних полів у припущенні стаціонарного руху джерела, відсутності фазових перетворень та сталих термофізичних властивостей. Такі моделі дають змогу швидко оцінити характер розподілу ізотерм, вплив швидкості зварювання та теплової потужності на максимальні температури і ширини зони термічного впливу, хоча й суттєво спрощують реальну картину процесу.

Подальший розвиток аналітичних підходів пов'язаний з модифікаціями типу розв'язку Вілсона Розенталя, а також з побудовою спеціалізованих рішень для тонких пластин і кутових швів, де враховується обмеженість геометрії, тепловідвід через крайові поверхні та, частково, конвективний теплообмін із навколишнім середовищем. У сучасних роботах запропоновано тривимірні аналітичні та квазіаналітичні моделі, орієнтовані на опис температурних полів для різних типів зварних з'єднань і конфігурацій джерела, зокрема з використанням адаптивних функцій та безрозмірних параметрів для узагальнення результатів. Такі моделі залишаються затребуваними під час попереднього інженерного оцінювання тепловкладення, розрахунку орієнтовних температурних циклів і вибору початкових параметрів для більш складних чисельних розрахунків, проте їх застосовність обмежена через специфіку імпульсного, по суті дискретного режиму переносу металу та різко змінне теплове навантаження.

У разі СМТ технології характер теплового джерела істотно відрізняється від класичних стаціонарних дугових процесів. Характерною є періодична зміна фаз короткого замикання, утворення та відриву краплі, контрольованого відведення дроту від ванни та низького середнього струму, що призводить до зменшення

інтегрального тепловкладення при збереженні стабільного переносу металу. З математичної точки зору це означає, що об'ємне джерело теплоти має виражену часову структуру; миттєва густина теплового потоку змінюється в межах кожного циклу СМТ, а не лише при зміні швидкості зварювання чи середньої потужності. Прості аналітичні рішення, що ґрунтуються на припущенні постійного теплового потоку, можуть адекватно описувати усереднені температурні поля, але не відтворюють локальних піків і провалів температури, які визначають реальні умови кристалізації й формування мікроструктури.

Через зазначені обмеження сучасні дослідження моделювання СМТ процесів зосереджуються на чисельних методах, насамперед на скінченно елементних та скінченно об'ємних підходах, де просторово часовий розподіл температур отримується як розв'язок нестационарного рівняння теплопровідності з урахуванням складної геометрії деталі, реальних граничних умов теплообміну та каліброваного об'ємного джерела теплоти. Найбільш поширеним описом джерела для дугових процесів є модель подвоєного еліпсоїда Голдака, яка представляє зону дуги як комбінацію переднього та заднього еліпсоїдальних об'ємів з різною інтенсивністю теплового потоку; параметри форми підбираються так, щоб відтворити реальну геометрію зварювальної ванни. Такий підхід забезпечує фізично узгоджений розподіл температури в безпосередній околиці шва і використовується як стандарт у більшості промислових програмних пакетів для моделювання зварювання.

Скінченно елементну модель температурного поля будували у тривимірній постановці з урахуванням геометрії зразка та траєкторії руху пальника. Для спрощення процесу моделювання тверде тіло, до якого додали температурно-залежні властивості сталі 3 розбили на декілька частин – основний метал та блоки, до яких і буде додаватись тепловий вплив (рис. 2.5). В даному дослідженні умовно використовували підхід народження та "смерті" елементів, коли об'єм, що

відповідає валикові, спочатку моделюється як елементи з нульовою теплопровідністю або вимкненою участю в розрахунку, а в момент проходження дуги ці елементи "активуються" з відповідними термофізичними властивостями металу шва.

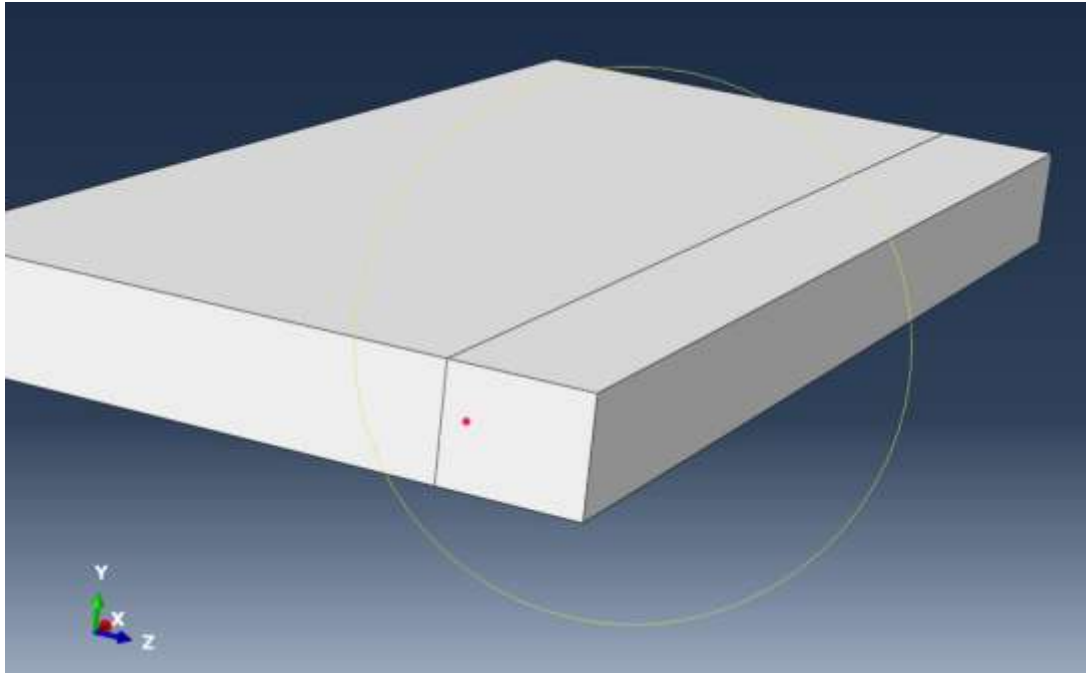


Рисунок 2.5 Загальний вигляд твердотільної моделі

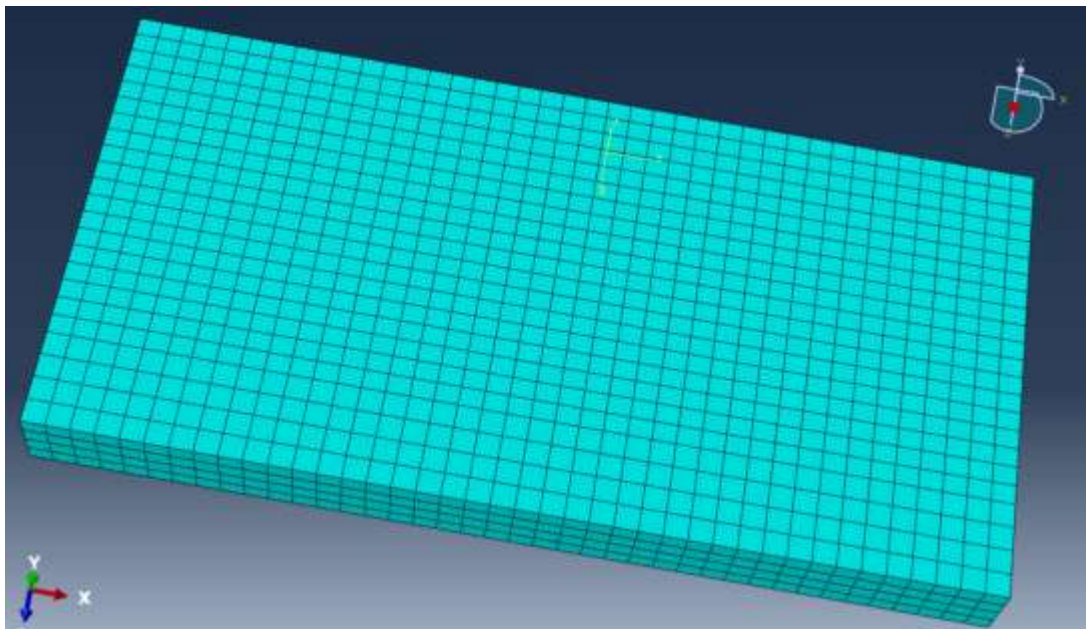


Рисунок 2.6 Рівномірне розташування кінцевих елементів

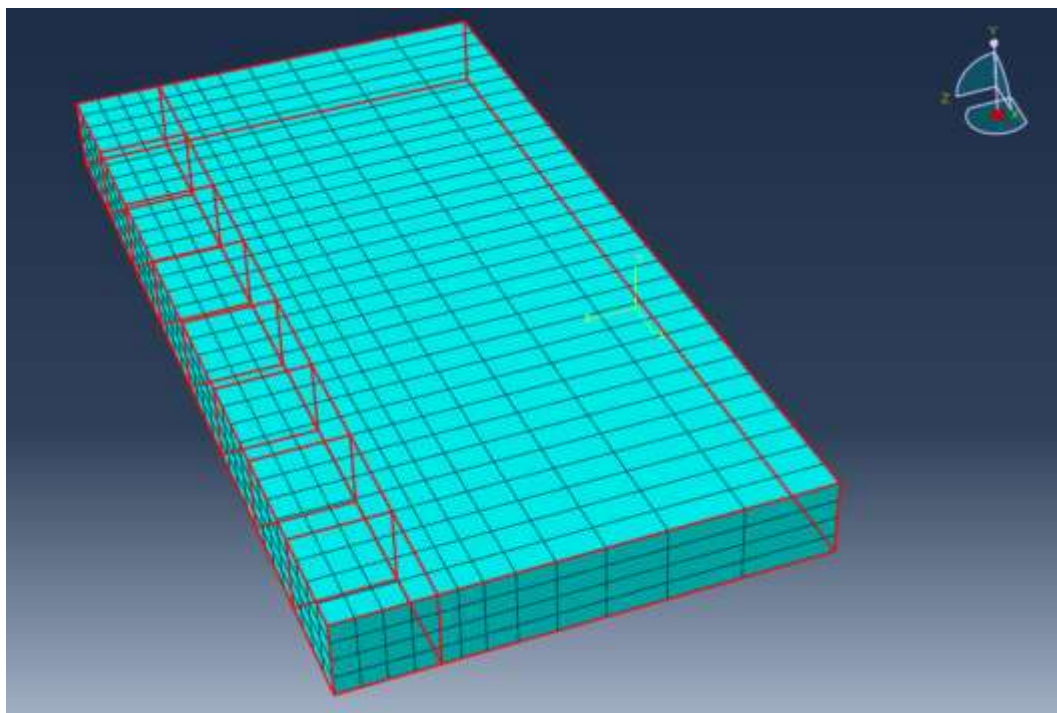


Рисунок 2.7 Подрібнення сітки кінцевих елементів для підвищення точності розрахунків

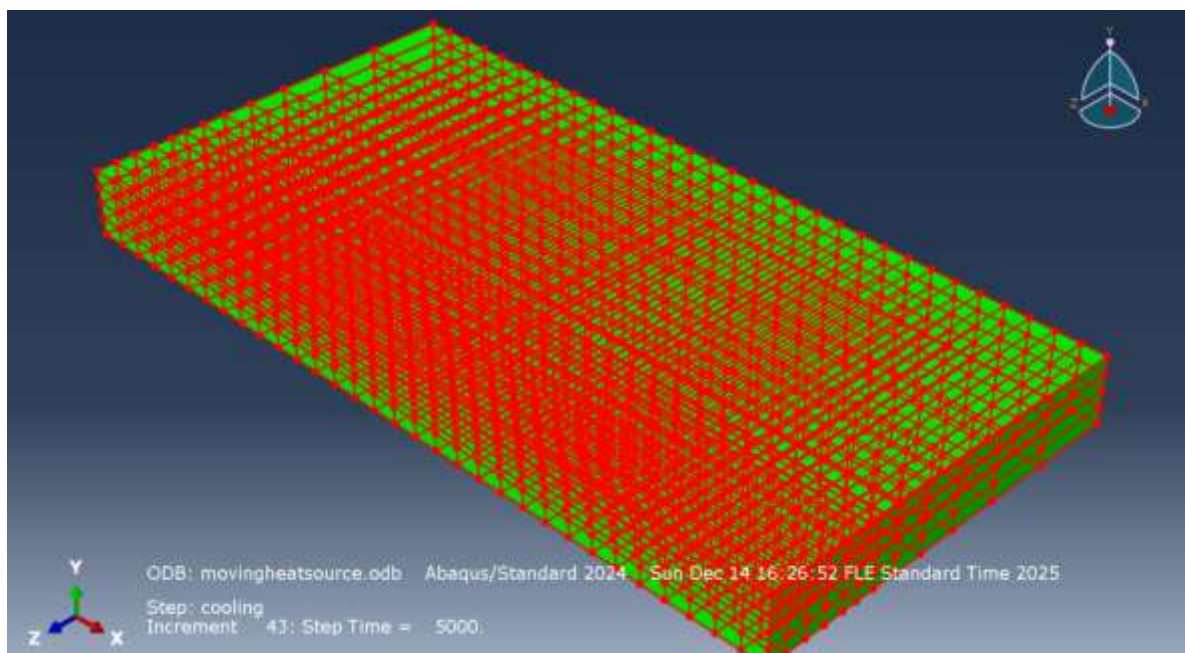


Рисунок 2.8 Сітки кінцевих елементів перед накладенням граничних умов

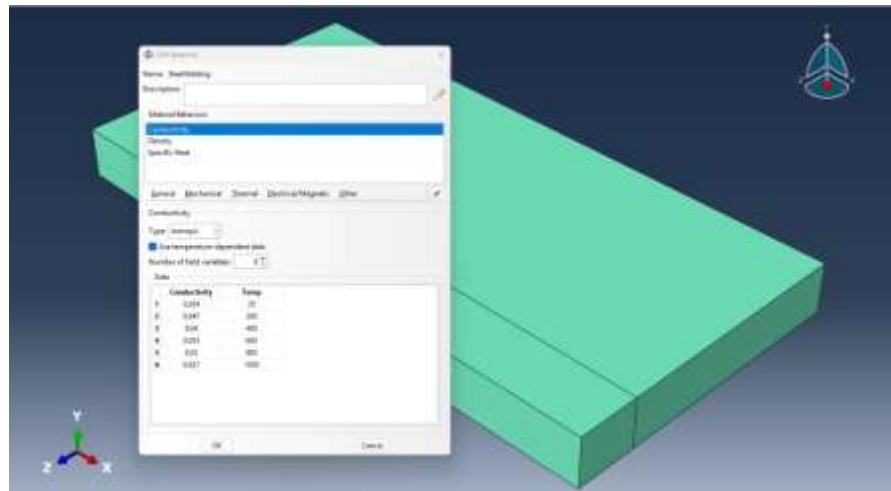


Рисунок 2.9 Додавання температурно-залежних властивостей матеріалу – Conductivity, Density та Specific Heat

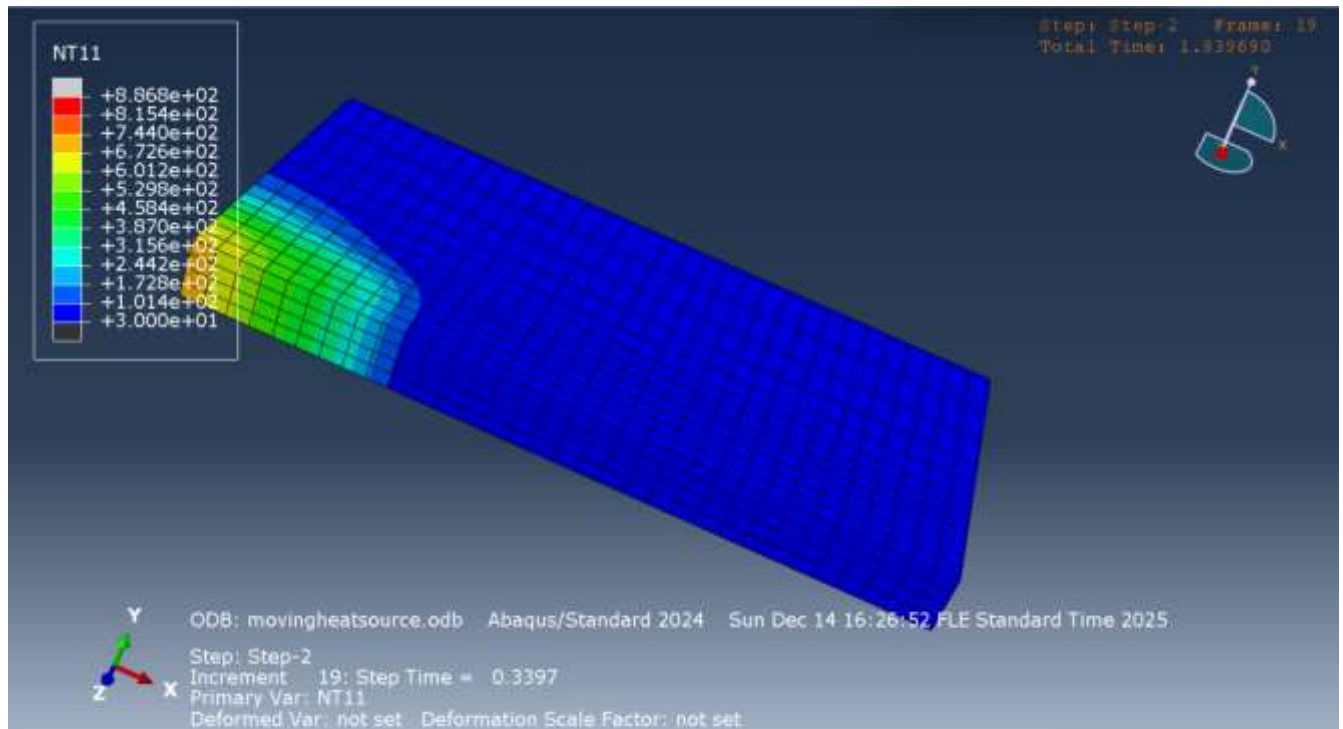


Рисунок 2.10 Розподіл температур на кроку 2 - нагрів елемента першого об'єму зварного шва

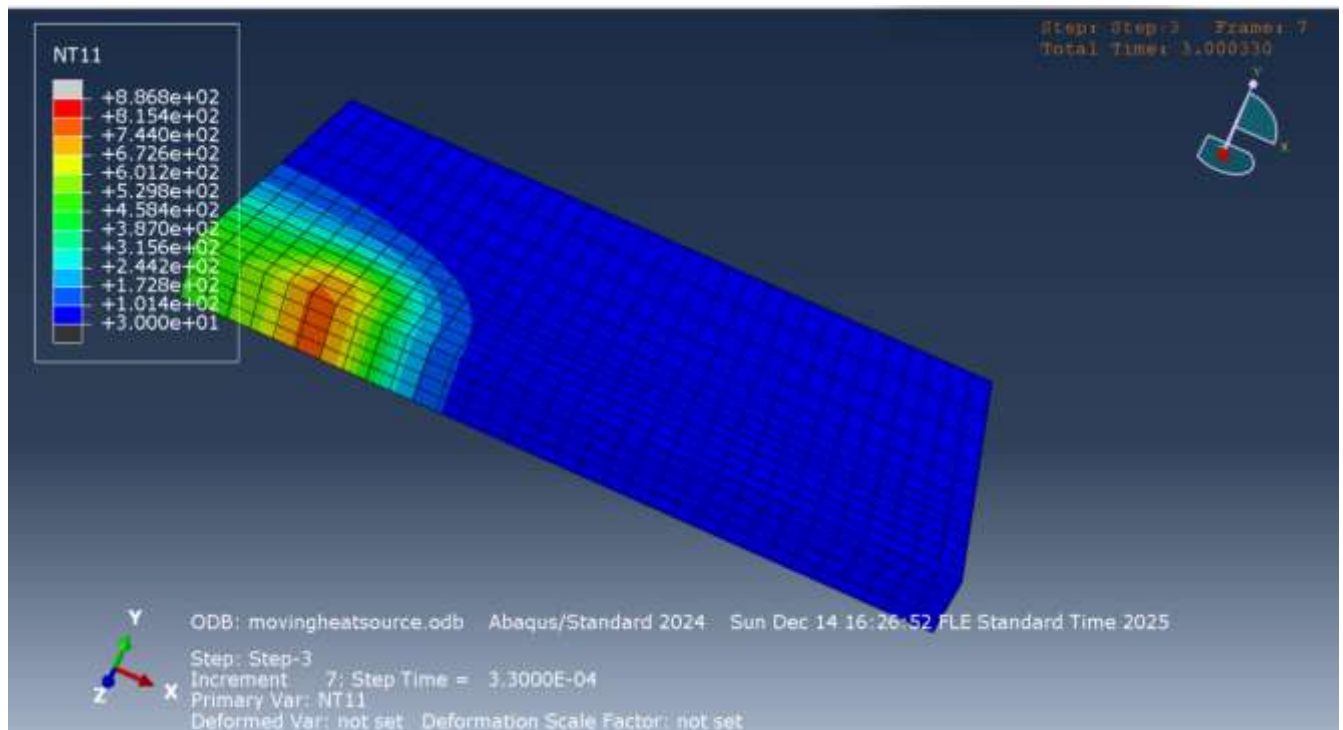


Рисунок 2.11 Розподіл температур на кроку 3 - нагрів елемента другого об'єму зварного шва

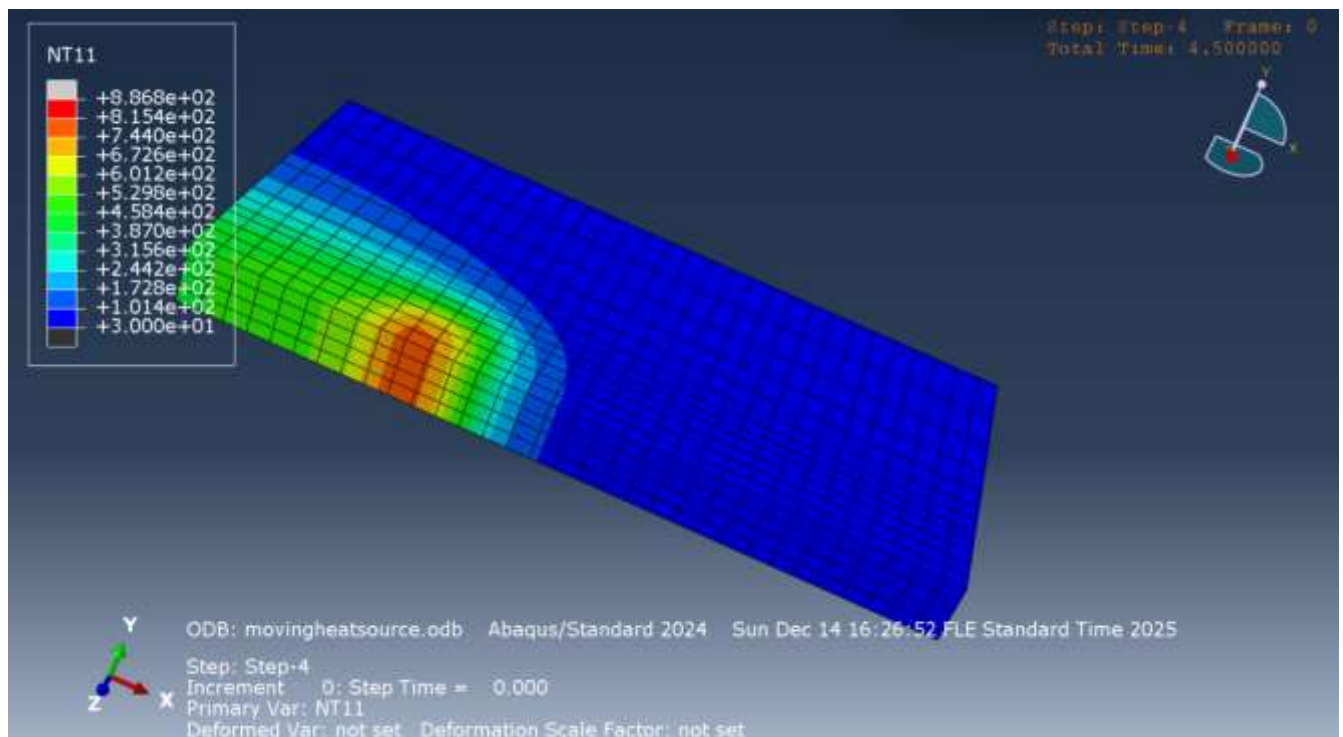


Рисунок 2.12 Розподіл температур на кроку 4 - нагрів елемента третього об'єму зварного шва

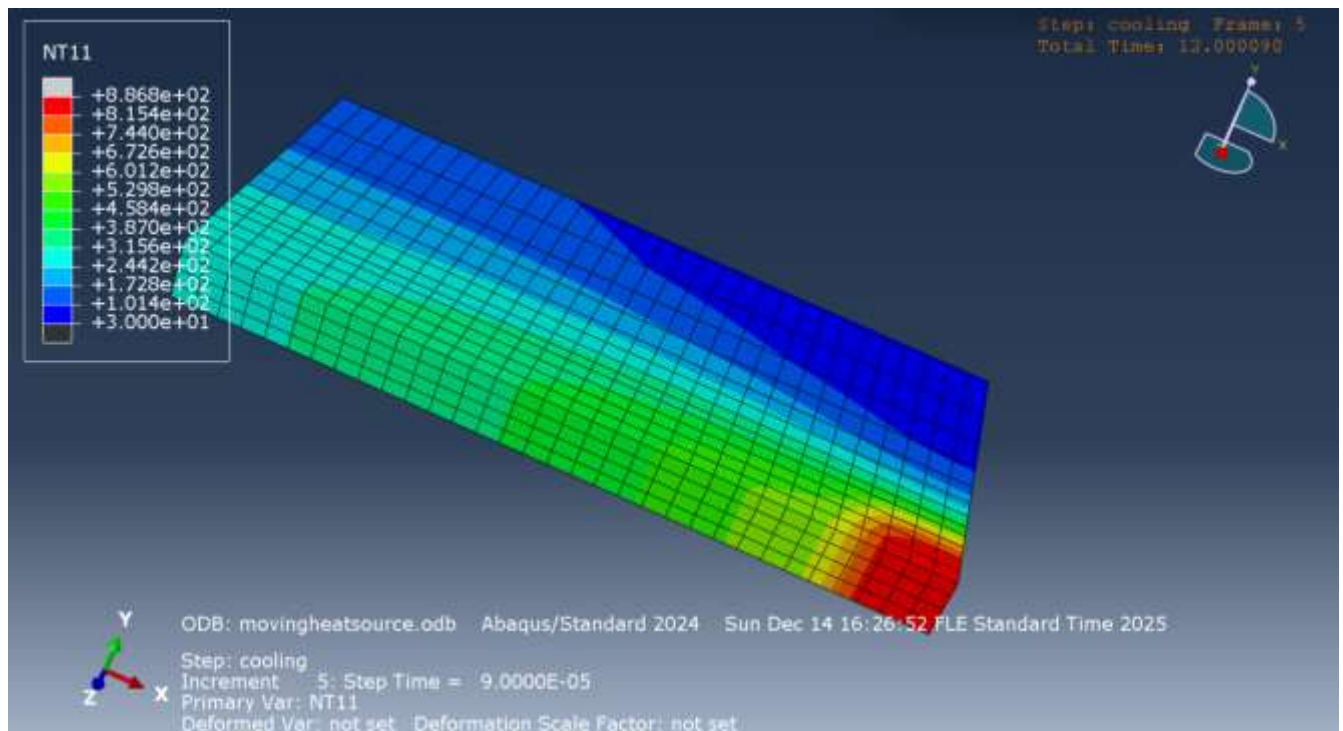


Рисунок 2.13 Розподіл температур на кроку 5 - нагрів елемента четвертого об'єму зварного шва

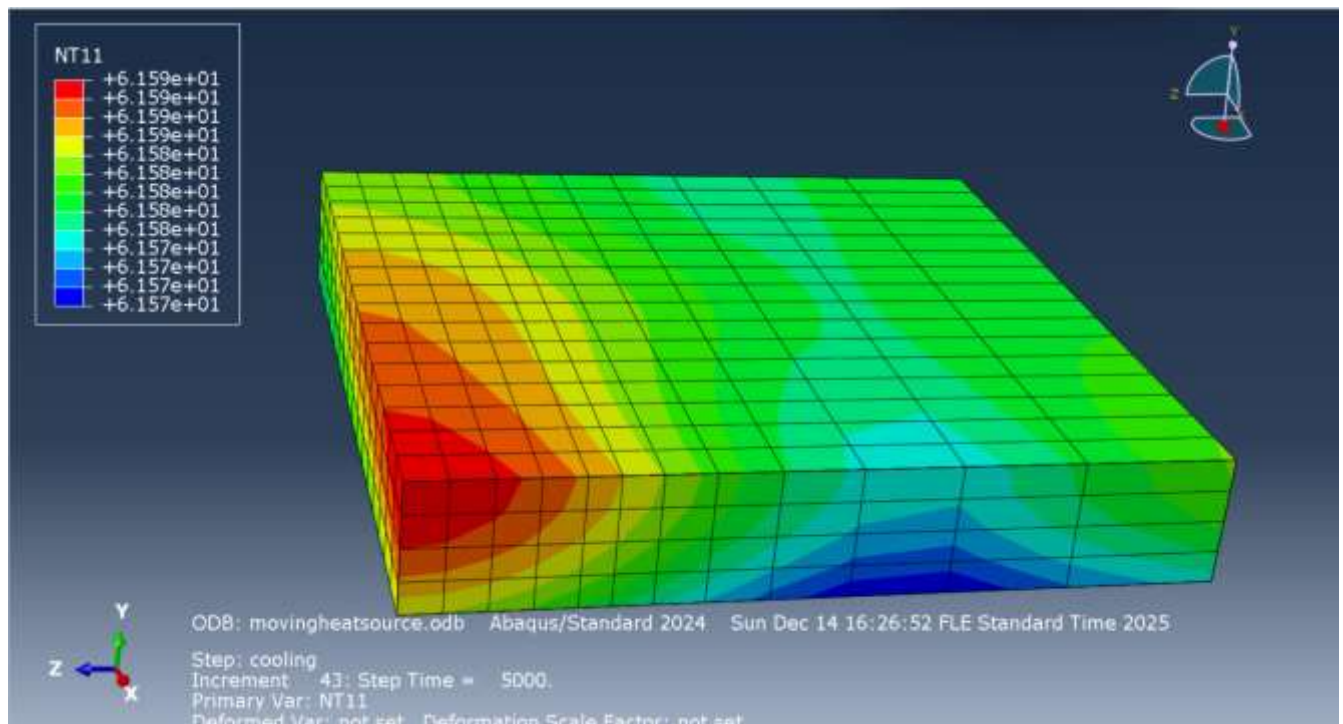


Рисунок 2.14 Розподіл загальної температури на зразку після зварювання на швидкості 10 мм/с.

Для СМТ режимів у таких моделях задається часозалежна потужність джерела, яка відповідає усередненому тепловкладенню за цикл, або використовується дискретизація окремих стадій циклу з різними значеннями потужності та розподілу тепла.

Як подальший розвиток виконаних досліджень слід відмітити наступне. Розвитком теплових моделей є термомеханічні скінченно-елементні підходи, які, крім розподілу температур, описують формування деформацій, залишкових напружень і можливих викривлень конструкції. У таких моделях температурні поля, отримані на тепловому кроці, використовуються як вхідні дані для розв'язання задачі плоского або просторового пружно пластичного деформування з урахуванням залежності механічних властивостей від температури та історії навантаження. Для СМТ процесів подібні моделі застосовуються, наприклад, для аналізу деформацій тонкостінних панелей, рамних конструкцій або елементів WAAM, де низьке тепловкладення має обмежити залишкові напруження, але нерівномірний розподіл температур може все одно призводити до локальних викривлень. Чисельні дослідження показують, що коректне відтворення реальних температурних умов, включаючи характер охолодження між проходами, є критичною умовою для отримання достовірних прогнозів залишкових деформацій і напружень. Особливе місце серед сучасних підходів посідають об'єднані тепло фізичні та гідродинамічні моделі, в яких температурне поле розглядається не ізольовано, а у взаємодії з течією розплавленого металу у ванні. У таких моделях розв'язуються рівняння Нав'є-Стокса для в'язкої нестисливої рідини у поєднанні з рівнянням енергії, а на вільній поверхні ванни враховується дія сил поверхневого натягу, градієнтів поверхневого напруження (ефект Марангоні), електромагнітних сил і тиску дуги. Для СМТ процесів додатково моделюється вплив крапель присадкового металу, що періодично відриваються та занурюються у ванну під час коротких замикань, змінюючи локальний розподіл тепла та швидкісних полів. Такі

моделі дають змогу простежити вплив змін струму в різних фазах СМТ циклу на структуру течії у ванні, форму валика і характер охолодження, що в підсумку визначає мікроструктуру та властивості металу, однак вимагають значних обчислювальних ресурсів і складної параметризації теплових і граничних умов.

Важливою тенденцією є побудова редукованих та гібридних моделей, у яких детальні чисельні розрахунки використовуються для калібрування спрощених математичних описів, придатних для інженерних розрахунків і подальшої інтеграції в цифрових двійниках. Наприклад, параметри еліпсоїдального джерела Голдака або його модифікацій визначаються на основі інверсної задачі, коли чисельний розподіл температури та форма зварювальної ванни підганяються під експериментальні вимірювання за допомогою оптимізаційних процедур. Отримана в такий спосіб "ефективна" модель джерела надалі використовується для серійних розрахунків температурних полів при зміні режимів зварювання без необхідності кожного разу вирішувати повну гідродинамічну задачу. У роботах з моделювання СМТ також застосовуються методи поверхонь відгуку, де скінченно елементні моделі комбінуються з регресійними та мета моделями для швидкої оцінки впливу параметрів режиму на максимальну температуру, теплові градієнти та розмір зони термічного впливу.

Паралельно з розширенням математичного апарату загострюються питання верифікації та достовірності моделей. Для коректного опису температурного поля необхідні точні дані про температурну залежність теплофізичних властивостей металу, включаючи теплоємність із урахуванням прихованої теплоти плавлення, теплопровідність у твердому та рідкому станах, а також коефіцієнти конвективного теплообміну на межі "метал повітря" і "метал захисний газ". Для СМТ процесів додатково ускладнює задачу необхідність врахування змін миттєвої потужності дуги і контактних явищ у фазі короткого замикання, які важко піддаються прямому вимірюванню. Експериментальні методи з використанням термопар,

інфрачервоних камер та безконтактних пірометрів забезпечують дані лише в обмеженій кількості точок або на відкритій поверхні, тому завжди існує небезпека некоректної ідентифікації параметрів джерела при інверсному моделюванні.

Окремою проблемою є баланс між точністю та обчислювальною складністю моделей. Повні тривимірні термо- гідродинамічні моделі з явним урахуванням розбризкування, крапельного переносу і вільної поверхні дають найповніший опис температурного поля і динаміки зварювальної ванни, однак є надто ресурсоемними для застосування на рівні рутинного інженерного проєктування або інтерактивної оптимізації режимів. З іншого боку, надмірне спрощення теплових моделей, наприклад, використання усереднених по довжині шва точкових джерел без урахування геометрії з'єднання і реальних граничних умов, може призвести до серйозних похибок у прогнозуванні глибини проплавлення та ширини зони термічного впливу, що критично для деталізованих розрахунків залишкового ресурсу і ймовірності утворення дефектів. Таким чином, вибір конкретного математичного та чисельного підходу до моделювання СМТ зварювання завжди є компромісом між вимогами до точності, доступними обчислювальними ресурсами та глибиною валідації моделі.

У контексті інтеграції з технологіями машинного зору температурні моделі СМТ відіграють додаткову, методологічну роль. Розраховані просторово часові поля температури дозволяють прогнозувати форму і розміри зварної ванни, товщину валика, можливі зони перегріву або неповного проплавлення, тобто ті характеристики, які потім безпосередньо фіксуються системами технічного зору у вигляді оптичних чи інфрачервоних зображень. Порівняння експериментальних даних машинного зору з результатами чисельного моделювання дає змогу не лише верифікувати модель, а й налаштовувати алгоритми виявлення дефектів і критерії бракування на основі фізично обґрунтованих граничних значень температурних градієнтів і тепловкладення. У перспективі це створює підґрунтя для побудови

замкнених систем керування, де модель температурного поля СМТ і система машинного зору спільно забезпечують адаптивну оптимізацію режимів зварювання задля підвищення якості та довговічності зварних з'єднань у переробних виробництвах.

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

3.1 Охорона праці при використанні роботизованого зварювального обладнання

Охорона праці під час експлуатації роботизованих зварювальних комплексів є фундаментальним елементом виробничого процесу, оскільки поєднує ризики, притаманні дуговому зварюванню, з додатковими небезпеками, пов'язаними з рухом промислових роботів. Особливої актуальності цей аспект набуває у контексті впровадження роботизованого зварювання для відновлення та посилення деталей, а також для виконання високовідповідальних швів на обладнанні переробних виробництв, де відмови конструкцій можуть призвести до значних економічних втрат і загроз для безпеки персоналу. Роботизовані зварювальні системи інтегрують джерела зварювального струму, маніпулятори, позиціонери, системи подачі дроту, кабельно-трубні пакети, пристосування для базування виробів, а також засоби вимірювання та машинного зору. Це створює складне техногенне середовище, у якому питання безпеки повинні бути враховані вже на етапі проєктування, монтажу та програмування, а не лише під час експлуатації.

На відміну від ручних процесів, де основні небезпеки безпосередньо пов'язані з роботою зварювальника в зоні дуги, у роботизованому зварюванні ключовими стають ризики, що виникають у зоні досяжності маніпулятора. Роботизований комплекс виконує рухи з високими швидкостями і прискореннями, що створює небезпеку ударів, защемлення та затягування в рухомі частини для операторів, наладчиків і обслуговчого персоналу у разі порушення правил доступу до робочої зони. Одночасно з цим зберігаються характерні для дугових процесів фактори небезпеки, такі як інтенсивне ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання, висока температура металу та шва, утворення зварювальних аерозолів, газів і

бризок, а також електричні ризики, пов'язані з високими струмами і напругами в силовій частині обладнання. Комбінована дія цих чинників вимагає інтегрованого підходу до охорони праці, що поєднує функціональну безпеку робототехнічної системи та класичні вимоги безпеки зварювальних операцій.

З метою мінімізації виробничих ризиків робочі зони роботизованого зварювання, як правило, виконуються у форматі зварювальних осередків, огорожених механічними бар'єрами, світлозахисними екранами та захисними огорожами. Вхід до робочої зони має бути оснащений блокувальними пристроями, що забезпечують автоматичне відключення рухів робота та дуги під час відкриття дверей або порушення цілісності світлової завіси. Такі рішення запобігають несанкціонованому перебуванню людей у зоні дії маніпулятора під час автоматичного циклу. Водночас для налагодочних і навчальних режимів передбачаються спеціальні режими зниженої швидкості руху робота, при яких оператор має можливість безпечно перебувати поруч із маніпулятором для точного позиціонування траєкторій і коригування програм.

Суттєву роль у забезпеченні безпечної експлуатації роботизованих зварювальних комплексів відіграють системи функціональної безпеки, інтегровані у контролери робота та джерела зварювання. Вони включають ланцюги аварійної зупинки, які мають багатоканальне виконання, системи контролю категорії зупинки, захист від перевищення швидкості, моніторинг положення і конфігурації робота, контроль доступу до параметрів програмування. Коректне проектування та періодична перевірка цих систем дають змогу гарантувати, що у випадку аварійної ситуації робот буде переведений у безпечний стан, а подача енергії до зварювальної системи буде припинена. Усі елементи аварійного відключення повинні бути чітко промарковані, розташовані у доступних місцях і включені до обов'язкових процедур передпускового контролю.

Необхідною умовою безпечної роботи є також контроль параметрів технологічного процесу, що виконуються роботизованою системою. Режимми зварювання, зокрема сила струму, напруга, швидкість подачі дроту і швидкість переміщення пальника, впливають не тільки на якість шва, але й на кількість тепла, ультрафіолетового випромінювання та об'єм зварювальних газів і аерозолів, які утворюються у зоні процесу. Перевищення розрахункових параметрів, зокрема тривале зварювання на максимальних токах без належного охолодження і вентиляції, може призвести до перегріву кабельно-трубних пакетів, пальників, елементів технологічної оснастки і створити додаткові ризики займання або теплового руйнування. Тому сучасні роботизовані комплекси оснащуються системами моніторингу стану пальника, охолоджувальних контурів, а також датчиками витрати і тиску захисного газу, які при виході параметрів за встановлені межі подають сигнал тривоги або блокують виконання програми.

Важливим елементом системи охорони праці при роботизованому зварюванні є організація ефективного видалення зварювальних димів і аерозолів, а також визначення вимог до мікроклімату зварювальних осередків. Локальні вентиляційні системи мають забезпечувати видалення диму без порушення стабільності дуги і без значного впливу на траєкторію руху захисного газу. Застосування витяжних зонтів, стільниць з відсмоктуванням або інтегрованих у пальник систем аспірації повинно узгоджуватися з роботою роботизованого комплексу і не створювати додаткових перешкод для руху маніпулятора. Одночасно з цим на рівні підприємства мають бути встановлені нормативні параметри освітлення, шуму і мікроклімату, що відповідають чинним санітарним нормам для зварювальних дільниць.

З огляду на те, що оператор роботизованої системи зазвичай перебуває поза безпосередньою зоною дії дуги, особлива увага приділяється захисту персоналу, який виконує наладку, програмування і технічне обслуговування. У цих режимах

працівник може наблизитися до зони дії робота, виконувати маніпуляції з teach-пультом або коригувати положення пальника вручну. У таких випадках обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту зварника, включаючи маску з автоматичним затемненням, захисний одяг та рукавиці, а також суворе дотримання режиму зниженої швидкості руху робота. Крім того, мають бути запроваджені чіткі процедури блокування і розблокування робочої зони, які виключають можливість випадкового запуску програми під час перебування людини в межах робочої області маніпулятора.

Не менш значущим є питання підготовки та кваліфікації персоналу, що обслуговує роботизовані зварювальні комплекси. Програма навчання повинна включати не лише традиційні питання техніки безпеки при зварюванні, а й специфіку роботизованих систем: розуміння робочого простору робота, зон досяжності, обмежень по швидкості, принципів функціональної безпеки, правил використання teach-пульта, послідовностей запуску і зупинки. Ефективним інструментом підготовки є імітаційні тренування з використанням офлайн-програмування та цифрових двійників зварювальних осередків, що дозволяють моделювати небезпечні ситуації без ризику для персоналу та обладнання. Регулярні інструктажі, перевірка знань і періодичний аудит дотримання вимог з охорони праці є обов'язковими складовими системи управління безпекою.

Упровадження концепцій Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0 посилює можливості управління ризиками при роботизованому зварюванні. Використання мережевих сенсорів, систем моніторингу стану обладнання, аналітики великих даних і цифрових двійників дає змогу виявляти відхилення у роботі роботизованих комплексів на ранніх стадіях, прогнозувати відмови і планувати технічне обслуговування до настання аварійних ситуацій. Інтеграція систем відеоспостереження, машинного зору і аналітичних модулів дозволяє у режимі реального часу відслідковувати стан зварювальної ванни, стабільність дуги і

дотримання траєкторії, що опосередковано впливає і на рівень техногенного навантаження на персонал через зменшення кількості переробок і випадків аварійного втручання. У межах людиноорієнтованої парадигми Індустрії 5.0 акцент робиться на ергономіку робочих місць операторів, зниження стресового навантаження і формування безпечної та передбачуваної взаємодії людини і робота.

3.2 Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому зварюванні

Безпека у надзвичайних умовах під час експлуатації роботизованих зварювальних комплексів є ключовою складовою системи управління виробничими ризиками, оскільки поєднує потенційні аварійні сценарії роботи промислового робота та джерела дугового зварювання. У таких системах одна аварія може одночасно охопити кілька підсистем: механічну, електричну, газову та вентиляційну. Отже, планування заходів безпеки в надзвичайних ситуаціях повинно проводитися не ізольовано для кожного елемента, а в межах інтегрованої концепції, яка враховує можливі ланцюгові реакції і комбіновані наслідки відмов.

До типових аварійних ситуацій, пов'язаних із роботизованим зварюванням, належать раптові відмови приводів робота, збій у системі керування, некоректне виконання програми, що може спричинити неконтрольований рух маніпулятора, руйнування оснастки чи зіткнення з виробом. Паралельно можуть виникати аварії, пов'язані з джерелом зварювання, зокрема короткі замикання, відмова систем охолодження, прорив газових магістралей або займання зварювальних аерозолів та відкладень у зоні процесу. Комбінація таких сценаріїв у замкненому зварювальному осередку створює високий рівень небезпеки для персоналу та обладнання, що вимагає чітко розроблених процедур аварійної зупинки і евакуації.

На технічному рівні забезпечення безпеки у надзвичайних умовах передбачає створення багаторівневої системи аварійної зупинки. Локальні кнопки аварійного вимкнення мають вимикати рух робота, зупиняти подачу дроту і припиняти дугу, а

також, за необхідності, перекривати подачу захисного газу. Центральні системи безпеки на рівні дільниці або цеху повинні забезпечувати можливість одночасного відключення кількох роботизованих осередків у випадку генералізованої аварії, наприклад, у разі пожежі або задимлення. Важливим елементом є автономні системи виявлення пожежі та диму в межах зварювального осередку, які можуть ініціювати аварійну зупинку комплексу та запуск систем локального пожежогасіння. Практика проектування таких систем передбачає резервування критичних ланцюгів безпеки і регулярну перевірку їх працездатності в рамках планового технічного обслуговування.

З організаційного погляду, безпека у надзвичайних умовах базується на чітких регламентах дій персоналу, що повинні бути задокументовані у вигляді інструкцій, планів евакуації та процедур локалізації аварій. Для кожного роботизованого зварювального осередку мають бути визначені потенційні сценарії аварій, зокрема відмова системи вентиляції, раптове задимлення, виявлення витoku газу, відмова охолоджувальної системи, некоректна траєкторія руху робота або руйнування оснастки. Для кожного сценарію слід сформулювати послідовність дій: зупинка комплексу, перекриття подачі енергоносіїв, оповіщення відповідальних осіб, евакуація персоналу з небезпечної зони. Персонал повинен регулярно проходити навчання і тренування щодо виконання цих дій, у тому числі з використанням імітаційних навчань та аналізу результатів.

Особливе значення в умовах надзвичайних ситуацій має інформаційна підтримка оператора та змінного персоналу. Людина, яка відповідає за роботу зварювального осередку, повинна оперативно отримувати достовірну інформацію про стан усіх підсистем комплексу. Для цього сучасні роботизовані установки обладнуються інтегрованими панелями оператора, де у режимі реального часу відображаються параметри зварювального режиму, статус систем вентиляції, охолодження, газопостачання, стан огорожень та блокувань, а також повідомлення

про помилки і попередження. У випадку аварійної ситуації інтерфейс має надавати зрозумілі і недвозначні інструкції, які спрямовують оператора щодо послідовності необхідних дій, що дозволяє скоротити час реакції і мінімізувати наслідки інциденту.

Важливою складовою сучасної концепції безпеки є використання цифрових технологій моніторингу й аналізу. Підключення роботизованих зварювальних комплексів до локальних або хмарних систем моніторингу дозволяє накопичувати історичні дані про параметри процесу, спрацювання систем безпеки, аварійні зупинки та інші події. Подальший аналіз цих даних дає змогу виявляти закономірності, пов'язані з передаварійними станами, формувати прогностичні моделі виникнення відмов та впроваджувати превентивні заходи. Наприклад, якщо статистика свідчить про зростання кількості коротких замикань або відмов охолодження у певному режимі, можна завчасно скоригувати параметри зварювання, провести додаткове обслуговування або модернізацію обладнання.

У рамках парадигми Індустрії 5.0 безпека у надзвичайних умовах розглядається не лише з позицій технічної надійності, а й з точки зору психологічної готовності персоналу до дій у стресових ситуаціях. Це передбачає формування культури безпеки, за якої кожен працівник усвідомлює власну відповідальність за дотримання регламентів і своєчасне повідомлення про відхилення. Важливу роль відіграє зворотний зв'язок між операторами, інженерами з автоматизації та службою охорони праці, що дозволяє оперативно вдосконалювати інструкції, алгоритми аварійної зупинки і сценарії тренувань. Такий підхід сприяє зменшенню ймовірності паніки у разі інциденту і підвищує керованість ситуації.

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОБОТІВ

Виконали економічний розрахунок операції роботизованого зварювання СМТ корпусної деталі з використанням спеціалізованого зварювального робота. Розрахунок орієнтований на деталь кінцевою вартістю 25 тис. грн, що має сумарну довжину зварних швів 2 м, та показує, як змінюються норми часу і собівартість зварювання при різній програмі випуску.

1. Вихідні дані та припущення для розрахунку

Розглядається корпусна деталь з низьковуглецевої сталі, що зварюється в захисному газі процесом СМТ на роботизованій комірці з промисловим роботом АВВ. Загальна довжина робочих швів на деталі становить 2 м; шви кутові, катет приблизно 4 мм, положення просторове переважно нижнє.

Приймаються такі основні технологічні параметри СМТ процесу для зварювання корпусної деталі:

- діаметр дроту 1,0–1,2 мм, сталева суцільна проволока;
- захисний газ суміш $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$;
- зварювальний струм близько 120 А, напруга дуги приблизно 18 В;
- середня швидкість зварювання 0,5 м/хв (30 м/год) з урахуванням необхідної якості проплавлення для корпусних елементів.

Для розрахунку організаційно економічних показників задаємо такі припущення:

- місячна тарифна заробітна плата оператора роботизованої комірки 30 000 грн;
- ефективний фонд робочого часу оператора 168 год на місяць, що відповідає 10 080 хв;
- повна вартість роботизованої зварювальної комірки (робот, СМТ джерело, позиціонер, безпекова огорожа, периферія) 3 000 000 грн;

- строк амортизації та розрахункової експлуатації комірки 7 років;
- ефективний фонд робочого часу комірки 2 000 год/рік, тобто 120 000 хв/рік;
- вартість зварювального дроту 120 грн/кг, вартість газової суміші 100 грн/м³, вартість електроенергії 6 грн/кВт·год;
- одноразовий час офлайн/онлайн програмування траєкторій та налагодження робота для даної деталі 16 год;
- додатковий час переналагодження та перевірки траєкторій на партію виробів 1 год.

Такі припущення є типовими для сучасної зварювальної роботизованої ділянки машинобудівного підприємства і достатні для демонстраційного розрахунку норм часу та собівартості.

2. Розрахунок норми часу на одну деталь

Спочатку визначаємо чистий час горіння дуги, що безпосередньо залежить від довжини шва та швидкості зварювання. Для сумарної довжини швів $L = 2$ м і швидкості $v = 0,5$ м/хв час основної зварювальної операції становитиме

$$t_{\text{дуги}} = L / v = 2 / 0,5 = 4 \text{ хв.}$$

До цього часу додаються допоміжні елементи: підвід пальника до початку шва, відвід наприкінці, проміжні переміщення між окремими сегментами швів, спрацьовування затискачів, продувка газом до і після зварювання, короткі зупинки на візуальний огляд. Для корпусної деталі середньої складності доцільно прийняти орієнтовний допоміжний час на рівні $t_{\text{доп}} \approx 6$ хв на деталь.

Тоді сумарний операційний час на одну деталь без урахування регламентованих перерв

$$t_{\text{оп}} = t_{\text{дуги}} + t_{\text{доп}} = 4 + 6 = 10 \text{ хв.}$$

З урахуванням коефіцієнта, що враховує регламентовані перерви, мікрозатримки, відхід оператора, введемо коефіцієнт $K_{\text{нр}} = 1,1$. Нормативний штучний час на одну деталь становитиме

$$t_{\text{шт}} = t_{\text{оп}} \cdot K_{\text{нр}} = 10 \cdot 1,1 = 11 \text{ хв.}$$

Отже, роботизована комірка при таких параметрах процесу СМТ забезпечує продуктивність приблизно

$$Q = 60 / t_{\text{шт}} \approx 60 / 11 \approx 5,4 \text{ деталі на годину}$$

за умови безперервної роботи на даній номенклатурі.

3. Визначення вартості однієї хвилини праці оператора та роботи комірки

Вартість однієї хвилини праці оператора визначимо як відношення місячної заробітної плати до фонду робочого часу:

$$C_{\text{опер,тариф}} = 30\,000 / 10\,080 \approx 2,98 \text{ грн/хв.}$$

З урахуванням нарахувань на оплату праці, премій та інших накладних витрат по персоналу можна прийняти коефіцієнт збільшення 1,4. Тоді повна вартість хвилини праці оператора

$$C_{\text{опер}} = 2,98 \cdot 1,4 \approx 4,17 \text{ грн/хв.}$$

Для розрахунку амортизації роботизованої комірки визначаємо сумарний фонд робочого часу за строк служби. При 2 000 год/рік та 7 роках експлуатації маємо 14 000 год, тобто

$$T_{\text{комірки}} = 14\,000 \cdot 60 = 840\,000 \text{ хв.}$$

Амортизаційна складова вартості 1 хв роботи комірки

$$C_{\text{аморт}} = 3\,000\,000 / 840\,000 \approx 3,57 \text{ грн/хв.}$$

Додаючи витрати на технічне обслуговування, ремонт, енергоносії, можна прийняти коефіцієнт 1,3. Тоді узагальнена вартість хвилини роботи роботизованої комірки

$$C_{\text{комірка}} = 3,57 \cdot 1,3 \approx 4,64 \text{ грн/хв.}$$

4. Матеріальні витрати на одну деталь

Спочатку оцінюємо витрату зварювального дроту. Для кутового шва катетом 4 мм можна прийняти орієнтовну питому витрату дроту 0,08 кг/м. Для 2 м сумарної довжини швів витрата дроту становитиме

$$G_{\text{дріт}} = 0,08 \cdot 2 = 0,16 \text{ кг.}$$

При ціні 120 грн/кг маємо вартість дроту на деталь

$$C_{\text{дріт}} = 0,16 \cdot 120 = 19,2 \text{ грн.}$$

Витрата захисного газу для процесу СМТ приймається на рівні 15 л/хв. З урахуванням часу горіння дуги 4 хв і додаткової продувки до і після зварювання загальний час подачі газу можна прийняти близько 5 хв. Тоді обсяг витраченого газу

$$V_{\text{газ}} = 15 \cdot 5 = 75 \text{ л} = 0,075 \text{ м}^3.$$

За ціни 100 грн/м³ вартість газу на деталь становитиме

$$C_{\text{газ}} = 0,075 \cdot 100 = 7,5 \text{ грн.}$$

Витрата електроенергії визначається добутком зварювальної потужності на час горіння дуги. При струмі 120 А та напрузі 18 В потужність

$$P \approx 2,16 \text{ кВт.}$$

Час горіння дуги 4 хв, тобто 4/60 год. Тоді енергоспоживання

$$W = 2,16 \cdot 4/60 \approx 0,144 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

За тарифом 6 грн/кВт·год маємо

$$C_{\text{ел}} = 0,144 \cdot 6 \approx 0,86 \text{ грн.}$$

З урахуванням незначних додаткових втрат можна округлити до 1 грн.

Сумарні матеріальні витрати на одну деталь становлять

$$C_{\text{мат}} = C_{\text{дріт}} + C_{\text{газ}} + C_{\text{ел}} \approx 19,2 + 7,5 + 1 \approx 27,7 \text{ грн.}$$

5. Змінна собівартість зварювальної операції на одну деталь

Змінна частина собівартості складається з вартості праці оператора, вартості роботи комірки та матеріальних витрат.

Вартість праці оператора на одну деталь

$$C_{\text{опер,дет}} = C_{\text{опер}} \cdot t_{\text{шт}} = 4,17 \cdot 11 \approx 45,9 \text{ грн.}$$

Вартість роботи роботизованої комірки на одну деталь

$$C_{\text{комірка,дет}} = C_{\text{комірка}} \cdot t_{\text{шт}} = 4,64 \cdot 11 \approx 51,0 \text{ грн.}$$

Тоді змінна собівартість зварювальної операції на одну корпусну деталь

$$C_{\text{змін}} = C_{\text{опер,дет}} + C_{\text{комірка,дет}} + C_{\text{мат}} \approx 45,9 + 51,0 + 27,7 \approx 124,6 \text{ грн.}$$

Для подальших розрахунків доцільно округлити до 125 грн на деталь без урахування витрат на програмування та разові налагодочні роботи.

На фоні кінцевої вартості корпусу 25 000 грн така собівартість зварювальної операції становить менше 1 % ціни виробу, що добре узгоджується з практикою машинобудівних підприємств, де значну частку собівартості формують матеріали, механічна обробка, складальні та випробувальні операції.

6. Витрати на програмування та наладку роботизованого СМТ процесу

Одноразове програмування робота для зварювання конкретної корпусної деталі включає створення траєкторій, налаштування параметрів СМТ процесу, налагодження захватів та позиціонера, а також пробні проходи і коригування програм. Припустимо, що сумарний час таких робіт становить 16 год.

Для інженера програміста та використання часу комірки доцільно прийняти консолідовану ставку 700 грн/год. Тоді повна вартість програмування

$$C_{\text{прог}} = 16 \cdot 700 = 11\,200 \text{ грн.}$$

Крім того, на кожну виробничу партію необхідно виконати короткі налагодочні роботи, перевірити стан оснастки, коректність базування корпусу та актуальність програм. Нехай час такої наладки $t_{\text{нал}} = 1$ год з тією ж ставкою 700 грн/год, отже вартість наладки на партію

$$C_{\text{нал}} = 700 \text{ грн.}$$

Ці витрати є умовно постійними щодо окремої деталі та мають розподілятися на весь обсяг виробничої програми.

7. Розрахунок собівартості зварювання при різних програмах виготовлення

Розглянемо три варіанти річної або партійної програми випуску корпусів: малосерійне виробництво 50 шт, серійне 500 шт і великосерійне 2 000 шт.

У кожному разі повна собівартість зварювальної операції на одну деталь визначатиметься сумою змінної собівартості та частки витрат на програмування і наладку, розподілених на відповідний обсяг N:

$$C_{\text{повн}} = C_{\text{змін}} + C_{\text{прог}}/N + C_{\text{нал}}/N.$$

1. При програмі $N = 50$ корпусів:

- частка витрат на програмування на одну деталь $C_{\text{прог}}/50 = 11\,200 / 50 = 224$ грн;
- частка витрат на наладку на одну деталь $C_{\text{нал}}/50 = 700 / 50 = 14$ грн.

Тоді повна собівартість зварювання одного корпусу

$$C_{\text{повн},50} = 124,6 + 224 + 14 \approx 362,6 \text{ грн.}$$

2. При програмі $N = 500$ корпусів:

- частка витрат на програмування $C_{\text{прог}}/500 = 11\,200 / 500 = 22,4$ грн;
- частка витрат на наладку $C_{\text{нал}}/500 = 700 / 500 = 1,4$ грн.

Повна собівартість зварювання одного корпусу

$$C_{\text{повн},500} = 124,6 + 22,4 + 1,4 \approx 148,4 \text{ грн.}$$

3. При програмі $N = 2\,000$ корпусів:

- частка витрат на програмування $C_{\text{прог}}/2\,000 = 11\,200 / 2\,000 = 5,6$ грн;
- частка витрат на наладку $C_{\text{нал}}/2\,000 = 700 / 2\,000 = 0,35$ грн.

Тоді повна собівартість

$$C_{\text{повн},2000} = 124,6 + 5,6 + 0,35 \approx 130,6 \text{ грн.}$$

Отримані результати добре ілюструють економічний ефект від збільшення програми випуску. При малосерійному виробництві значну частку собівартості становлять разові витрати на програмування; при переході до серійного та великосерійного виробництва ця частка швидко зменшується, і домінуючим стає змінний компонент, пов'язаний з матеріалами та часом роботи комірки.

На основі прийнятих вихідних даних показано, що роботизоване зварювання корпусної деталі методом Cold Metal Transfer на комірці з роботом забезпечує нормативний штучний час близько 11 хв на деталь при сумарній довжині швів 2 м. При цьому змінна собівартість однієї деталі на рівні 125 грн включає витрати на працю оператора, роботу комірки та матеріали і становить менше одного відсотка від кінцевої вартості корпусу 25 тис. грн. З урахуванням одноразових витрат на програмування та наладку, повна собівартість зварювальної операції істотно залежить від програми випуску: від приблизно 363 грн на корпус при 50 шт у партії до 131–149 грн при програмах 500–2 000 шт.

Такий підхід до розрахунку норм часу та собівартості дає змогу кількісно обґрунтувати доцільність впровадження роботизованого процесу СМТ для корпусних деталей, співвіднести витрати на розгортання й експлуатацію роботизованої комірки з отримуваним ефектом від підвищення продуктивності, стабільності якості та експлуатаційної стійкості обладнання. Для реального підприємства наведені розрахунки є базовою моделлю, що надалі уточнюється з урахуванням конкретних тарифів, цін на матеріали та енергоносії, фактичного фонду часу, структури накладних витрат і вимог до якості зварних швів.

ВИСНОВКИ

1. Метод Cold Metal Transfer завдяки низькому тепловкладенню, керованому перенесенню металу та високій стабільності процесу створює сприятливі передумови для підвищення довговічності зварних з'єднань деталей машинобудівного обладнання. Зменшення ширини зони термічного впливу, обмеження рівня залишкових напружень розтягу, формування більш однорідної структури та гладкої геометрії шва знижують імовірність зародження та розвитку втомних тріщин, а отже підвищують експлуатаційну стійкість вузлів [17, 18]. Ефективність використання СМТ як інструмента підвищення ресурсу деталей суттєво зростає за умов його поєднання з обґрунтованими конструктивними рішеннями, коректним розрахунком на довговічність, застосуванням сучасних методів неруйнівного контролю та післязварювальної обробки, що формує цілісну систему забезпечення надійності зварних конструкцій у машинобудуванні.

2. Отже, основні сучасні підходи до моделювання процесу зварювання методом Cold Metal Transfer зосереджуються на поєднанні класичних аналітичних рішень для рухомих джерел теплоти, еліпсоїдальних моделей теплового джерела, тривимірних скінченно елементних та термо- гідродинамічних моделей, а також редукованих та інверсних методик ідентифікації параметрів. Їхня актуальність обумовлена потребою в надійному прогнозуванні розподілу температур, мікроструктури, залишкових напружень і деформацій, що визначають експлуатаційну стійкість конструкцій, а також необхідністю інтеграції з системами машинного зору та цифровими двійниками зварювальних процесів. Попри суттєвий прогрес, зберігаються проблеми, пов'язані з повнотою й точністю вихідних даних, складністю опису нестационарних особливостей СМТ циклу та великими обчислювальними витратами, однак саме їх розв'язання визначатиме подальший розвиток математичних і чисельних моделей зварювання у високотехнологічному машинобудуванні.

3. Охорона праці при використанні роботизованого зварювального обладнання є комплексною міждисциплінарною задачею, що поєднує інженерні рішення з функціональної безпеки, організаційні заходи, сучасні цифрові технології та системну підготовку персоналу. Забезпечення безпеки у роботизованих зварювальних осередках ґрунтується на поєднанні фізичного відокремлення робочої зони, інтегрованих систем контролю і блокування, ефективної вентиляції, чітких процедур експлуатації та підвищеної уваги до навчання операторів і наладчиків. Реалізація цих підходів дозволяє не лише знизити рівень травматизму і техногенних ризиків, а й підвищити надійність та ефективність роботизованих зварювальних процесів у сучасному машинобудівному виробництві.

4. Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому зварюванні є багатовимірним завданням, що поєднує технічні, організаційні, інформаційні та людські чинники. Ефективна система безпеки передбачає багаторівневий захист на рівні обладнання, наявність чітких регламентів дій персоналу, використання сучасних засобів моніторингу та аналізу, а також постійне удосконалення процедур на основі накопиченого досвіду. Лише за таких умов можливо забезпечити надійне функціонування роботизованих зварювальних комплексів, мінімізувати ймовірність важких аварій та створити передумови для стійкого розвитку машинобудівного виробництва з високим рівнем автоматизації.

5. Показано, що роботизоване зварювання корпусної деталі методом Cold Metal Transfer на комірці з роботом забезпечує нормативний штучний час близько 11 хв на деталь при сумарній довжині швів 2 м. При цьому змінна собівартість однієї деталі на рівні 125 грн включає витрати на працю оператора, роботу комірки та матеріали і становить менше одного відсотка від кінцевої вартості корпусу 25 тис. грн. З урахуванням одноразових витрат на програмування та наладку, повна собівартість зварювальної операції істотно залежить від програми випуску: від приблизно 363 грн на корпус при 50 шт у партії до 131–149 грн при програмах 500–2 000 шт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang J., Zhang H., Li Y. A review of algorithms for surface defect detection in welds based on machine learning. *Expert Systems with Applications*. 2025. Vol. 299. Art. 130188. 26 с. DOI 10.1016/j.eswa.2025.130188.
2. Zhang W., Li X., Chen Y., Liu Z. Deep Learning-Based Automated Detection of Welding Defects in Pressure Pipeline Radiograph. *Coatings*. 2025. Vol. 15, No. 7. Art. 808. 22 с. DOI 10.3390/coatings15070808.
3. Kokolakis G. Laser Brazed Defect Detection Using Deep Learning : master's thesis. Gothenburg : Chalmers University of Technology, 2024. 95 с.
4. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Неруйнівні методи контролю : навч. посіб. Ужгород : Видавництво УжНУ, 2016. 192 с.
5. Lobanov L. M., Pashchyn M. O., Tymoshenko O. M., Goncharov P. V., Mikhodui O. L., Shiyan K. V. Increase in the life of welded joints of AMg6 aluminum alloy. *The Paton Welding Journal*. 2020. No. 4. P. 2–8. DOI 10.37434/tpwj2020.04.01.
6. Hobbacher A., Kassner M. On Relation Between Fatigue Properties of Welded Joints, Quality Criteria and Groups in ISO 5817. *Welding in the World*. 2012. Vol. 56. P. 153–169. DOI 10.1007/BF03321405.
7. ISO 5817:2014. Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys. Quality levels for imperfections. Geneva : International Organization for Standardization, 2014. 27 p.
8. Рябцев І. О., Книш В. В., Бабінець А. А., Соловей С. О. Втомна довговічність наплавлених деталей : монографія. Київ : Інтерсервіс, 2022. 204 с.
9. Пороховський Ю. В., Кіндрацький Б. І. Міцність і довговічність кільцевих зварних з'єднань оболонкових елементів машинобудівних конструкцій : монографія. Львів : ДВЦ НТШ, 2019. 158 с.

- 10.Макаренко В. Д., Білик С. І., Чигиринець О. І. та ін. Кінетика тріщиноутворення в сталевих конструкціях : монографія. Київ : НУБіП України, 2023. 248 с.
- 11.Гуменюк І. В. Обладнання та технології зварювальних робіт : навч. посіб. Київ : Грамота, 2014. 120 с.
- 12.Pickin C. G., Young K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2006. Vol. 11, No. 5. P. 583–585. DOI 10.1179/174329306X120886.
- 13.Selvi S., Vishvaksenan A., Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology: An overview. *Defence Technology*. 2018. Vol. 14, No. 1. P. 28–44. DOI 10.1016/j.dt.2017.08.002.
- 14.Gungor B., Kaluc E., Taban E., Sik S. A. Mechanical and microstructural properties of robotic cold metal transfer (CMT) welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminium alloys. *Materials and Design*. 2014. Vol. 54. P. 207–213. DOI 10.1016/j.matdes.2013.08.018.
- 15.Talalaev R., Veinthal R., Laansoo A., Sarkans M. Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products. *Estonian Journal of Engineering*. 2012. Vol. 18, No. 3. P. 243–250. DOI 10.3176/eng.2012.3.09.
- 16.Brezinová J., Hašul' J. Evaluation of fillet welds properties performed by cold metal transfer robotic metal active gas welding technology. *Transport*. 2023. Vol. 38, No. 1. P. 44–51. DOI 10.3846/transport.2023.19084.
- 17.Fang Y., Yang S., Huang Y., Meng X. Study of microstructure and fatigue in aluminum/steel butt joints made by CMT fusion-brazing technology. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 7. Art. 2367. DOI 10.3390/ma15072367.
- 18.Літовченко П. І., Іванова Л. П. Технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. 306 с. DOI відсутній.

19. Кухар В. В., Бойко І. О., Пашинський В. В., Цимбалюк Д. В. Мікроструктура зварного шва та зони термічного впливу армувальних профілів з киплячих сталей після лазерного зварювання. Науковий журнал «Метінвест Політехніка. Серія: Технічні науки». 2025. № 5. С. 164–171. DOI 10.32782/3041-2080/2025-5-18.
20. Перепічай А. О., Лагодзінський І. М. Вплив GMAW-CMT та PULSE процесів адитивного зварювання наплавкою CuSi3 на будову і напружено-деформований стан зразків. Автоматичне зварювання. 2024. № 2. С. 3–12. DOI 10.37434/as2024.02.01.
21. Wei W., Sun Y., Zhang C. та ін. Effect of CMT and MIG welding on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu-Er-Zr alloy. Materials. 2025. Vol. 18, No. 20. P. 4688. DOI 10.3390/ma18204688.
22. Bellamkonda P. N., Dwivedy M., Addanki R. Cold metal transfer technology – a review of recent research developments. Results in Engineering. 2024. Vol. 23. P. 102423. DOI 10.1016/j.rineng.2024.102423.
23. Zhu Z. L., Li H. B., Wang G. Z. та ін. Correlation between microstructure, hardness and strength in HAZ of dissimilar welds of rotor steels. Materials Science and Engineering A. 2010. Vol. 527. P. 4035–4042. DOI 10.1016/j.msea.2010.03.066.
24. Han T., Li J., Chen X. та ін. Fatigue behavior of X65 pipeline steel welded joints prepared by CMT/GMAW backing process. International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 164. P. 107156. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.107156.
25. Ahmad R., Reza-E-Rabby M., Huda N. та ін. Effect of a post-weld heat treatment on the mechanical and microstructure properties of AA6061 joints welded by the gas metal arc welding cold metal transfer method. Materials and Design. 2011. Vol. 32. P. 5120–5126. DOI 10.1016/j.matdes.2011.06.007.
26. Yang L., Liu A., Zhang Y. та ін. Heat input, intermetallic compounds and mechanical properties of Al/steel cold metal transfer joints. Journal of Materials

- Processing Technology. 2019. Vol. 272. P. 40–50. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2019.05.004.
- 27.Selvi S., Vishvakshenan A., Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology – An overview. Defence Technology. 2018. Vol. 14, No. 1. P. 28–44. DOI: 10.1016/j.dt.2017.08.002.
- 28.Bellamkonda P. N., Dwivedy M., Addanki R. Cold metal transfer technology – A review of recent research developments. Results in Engineering. 2024. Vol. 23. P. 102423. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102423.
- 29.Zhang H. T., Feng J. C., He P. et al. The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel. Materials Science and Engineering A. 2009. Vol. 499, No. 1–2. P. 111–113. DOI: 10.1016/j.msea.2007.11.124.
- 30.Talalaev R., Veinthal R., Laansoo A., Sarkans M. Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products. Estonian Journal of Engineering. 2012. Vol. 18, No. 3. P. 243–250. DOI: 10.3176/eng.2012.3.09.
- 31.Han Y., Zhong S., Peng C. et al. Fatigue behavior of X65 pipeline steel welded joints prepared by CMT/GMAW backing process. International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 164. P. 107156. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107156.
- 32.Yan Y., Zhong S., Chen Z. et al. Corrosion fatigue behavior of X65 pipeline steel welded joints prepared by CMT/GMAW backing process. Corrosion Science. 2023. Vol. 225. P. 111568. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111568.
- 33.Kursun T. Cold metal transfer (CMT) welding technology. The Online Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 8, No. 1. P. 35–39.
- 34.Савуляк В. І., Заболотний С. А. Зварювання. Вступ до фаху : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2015. 136 с.

- 35.Selvi S., Vishvaksenan A., Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology: an overview. *Defence Technology*. 2018. Vol. 14, No. 1. P. 28–44. DOI 10.1016/j.dt.2017.08.002.
- 36.Elrefaey A., Ross N. G. Microstructure and mechanical properties of cold metal transfer welding similar and dissimilar aluminum alloys. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2015. Vol. 28, No. 6. P. 715–724. DOI 10.1007/s40195-015-0252-6.
- 37.Pickin C. G., Young K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2006. Vol. 11, No. 5. P. 583–585. DOI 10.1179/174329306X120886.
- 38.Balamurugan S., Ramamoorthi R., Kavin Jeysing I. K. та ін. Microstructure and mechanical properties of cold metal transfer welding AA6082-T4 alloys. *Indian Journal of Science and Technology*. 2019. Vol. 12, No. 42. P. 1–8. DOI 10.17485/ijst/2019/v12i42/143273.
- 39.Shu F., Lv Y., Liu Y. та ін. Residual stress modeling of narrow gap welded joint of aluminum alloy by cold metal transferring procedure. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 54. P. 224–235. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.056.
- 40.Zhu M., Yang S., Xie C. та ін. Research on microstructure and fatigue properties of 7050-T6 high-strength aluminum alloy cold metal transfer welded joint. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30. P. 7461–7471. DOI 10.1007/s11665-021-05885-z.
- 41.Мартинюк Р. Т. Основні дефекти зварних з'єднань. *Нафтогазова енергетика*. 2025. № 1(43). С. 109–116. DOI 10.31471/1993-9868-2025-1(43)-109-116.
- 42.Лобанов Л. М., Пащин М. О., Тимошенко О. М. та ін. Підвищення довговічності зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 4. С. 2–8. DOI 10.37434/as2020.04.01.

43. Craig J. J. Introduction to robotics: mechanics and control. 3rd ed. Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2005. 400 p.
44. Baron L. The joint-limits and singularity avoidance in robotic welding. *Industrial Robot*. 2008. Vol. 35, No. 5. P. 456–464. DOI: 10.1108/01439910810893626.
45. Abderrahmane A., Boudjema F., Boutar Y., Chettibi T. Study and validation of singularities for a Fanuc LR Mate 200iC robot. *IEEE International Conference on Electro/Information Technology, EIT 2014, Milwaukee, WI, USA, 5–7 June 2014*. Piscataway : IEEE, 2014. P. 432–437. DOI: 10.1109/EIT.2014.6871746.
46. Selvi S., Vishvakshenan A., Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology: An overview. *Defence Technology*. 2018. Vol. 14, No. 1. P. 28–44. DOI: 10.1016/j.dt.2017.08.002.
47. Bellamkonda P. N., Dwivedy M., Addanki R. Cold metal transfer technology: A review of recent research developments. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 23. Art. 102423. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102423.
48. Shanker H., Wattal R. A comprehensive survey on the cold metal transfer process in welding similar and dissimilar materials and for cladding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2023. Vol. 237, No. 10. P. 2360–2391. DOI: 10.1177/09544062221139947.
49. Talalaev R., Veinthal R., Laansoo A., Sarkans M. Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products. *Estonian Journal of Engineering*. 2012. Vol. 18, No. 3. P. 243–250. DOI: 10.3176/eng.2012.3.09.
50. Міленін О. С., Великоіваненко О. А., Розинка Г. П., Півторак Н. І. Чисельна методологія прогнозування надійності та залишкового ресурсу зварних трубопровідних елементів із корозійно-ерозійними дефектами. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 9. С. 11–21.