

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: «ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СМТ-ЗВАРЮВАННЯ
ЛИСТОВОЇ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ РОБОТИЗОВАНИМ КОМПЛЕКСОМ»

Виконав: студент VI курсу групи Маш-

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

Володимир РУЩАК
(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

РУЩАК Володимир Миколайович

1. Тема роботи: «Обґрунтування параметрів процесу СМТ-зварювання листової нержавіючої сталі роботизованим комплексом»

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

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 1.12.2025 року

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

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

4.1. Огляд інформаційних джерел

4.2. Основний розділ досліджень

4.3. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки і пропозиції

5. Перелік графічного ілюстраційного матеріалу:

Графічна частина до кваліфікаційної роботи оформляється у вигляді презентації.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання «28» лютого 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент _____ Володимир РУЩАК
(підпис)

Керівник роботи _____ Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(підпис)

УДК 621.791.75:669.15-194.56:621.865.8

Обґрунтування параметрів процесу СМТ-зварювання листової нержавіючої сталі роботизованим комплексом. Рушак Володимир Миколайович. Кафедра машинобудування. Дубляни, Львівський НУВМБТ. 2025.

78 с. текст. част., 15 рис., 69 літературних джерел.

У кваліфікаційній роботі виконано системний огляд сучасних технологій дугового зварювання з мінімальним тепловкладенням для тонколистової нержавіючої сталі. Проаналізовано обмеження традиційних роботизованих режимів MIG/MAG щодо рівня тепловкладення, деформацій, залишкових напружень, дефектності та корозійної стійкості у порівнянні з процесом Cold Metal Transfer (CMT). Показано, що саме керованість тепловкладення й стабільність перенесення металу визначають можливість забезпечення геометричних допусків і ресурсу вузлів.

Розроблено та реалізовано комплексну методику експериментального дослідження роботизованих процесів СМТ, яка поєднує високочастотний моніторинг струму та напруги, термографію, вимірювання геометрії шва, металографічний аналіз і оцінку дефектності. Виконано кількісне порівняння лінійної енергії, параметрів теплових циклів, деформацій, залишкових напружень та структурних змін у зоні термічного впливу, встановлено зв'язок із показниками втомної й корозійної довговічності.

Оцінено продуктивність роботизованих процесів СМТ і MIG/MAG на основі повного часу циклу з урахуванням переробок, післяопераційної обробки та енерговитрат. На цій основі сформовано інженерні критерії вибору технології та режимів СМТ для тонколистової нержавіючої сталі, а також практичні рекомендації щодо організації роботизованих складально-зварювальних комплексів, спрямовані на зменшення деформацій, частки браку й підвищення ресурсу конструкцій.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1. Сучасні технології зварювання з мінімальним тепловкладенням	10
1.2 Особливості зварювання тонколистової нержавіючої сталі	16
2 ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ	32
2.1 Методи дослідження процесів СМТ зварювання	32
2.2. Зміна структурного стану нержавіючої сталі при зварюванні та деформації в процесах СМТ зварювання тонколистової сталі	40
2.3. Побудова моделі машинного навчання для прогнозування глибини проплавлення при СМТ зварюванні	45
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	54
3.1. Охорона праці при використанні роботизованого зварювального обладнання для процесу СМТ зварювання	54
3.2 Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому зварюванні	62
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	725

ВСТУП

Розвиток сучасного машинобудування, харчового, фармацевтичного та пакувального обладнання супроводжується швидким зростанням частки конструкцій із тонколистової нержавіючої сталі, для яких визначальними є корозійна стійкість, чистота поверхні, стабільність геометрії та ресурс. За товщин у межах 0,6–2,0 мм зварювання стає технологічно критичною операцією: поєднання відносно низької теплопровідності та високого коефіцієнта лінійного розширення аустенітних сталей призводить до значних температурних градієнтів, короблення, залишкових напружень та зміни пасивного шару навіть за відносно невеликої довжини шва. У таких умовах саме вибір технології дугового зварювання та керуваність тепловкладення визначають не лише локальну якість шва, а й можливість забезпечити геометричні допуски та довговічність вузлів у експлуатації.

Традиційні режими роботизованого MIG/MAG зварювання у короткодуговому та імпульсному виконанні, попри широку розповсюдженість, характеризуються відносно високим тепловкладенням і нестабільним перенесенням металу. Часті піки струму в фазі короткого замикання зумовлюють інтенсивне розбризкування, розширення зони термічного впливу, підвищення рівня залишкових деформацій і напружень, а також ризик пропалів і підрізів при мінімальних відхиленнях зазору або притиску. Для тонколистової нержавіючої сталі це призводить до збільшення частки переробок, обсягу післяопераційного шліфування та правки, погіршення корозійної стійкості й ресурсних характеристик. Прагнення підвищити продуктивність простим збільшенням струму або швидкості без контролю лінійної енергії часто лише поглиблює деформаційні та корозійні проблеми.

На цьому тлі технології зварювання з мінімальним тепловкладенням, насамперед Cold Metal Transfer (CMT) та його модифікації, розглядаються як перспективний інструмент для керованого “охолодження” процесу без втрати

металургійної надійності та форми шва. Фізична суть СМТ полягає у керованому короткозамикальному перенесенні з синхронізованим реверсивним рухом дроту, що дозволяє відокремлювати краплю при суттєво нижчих пікових струмах і з мінімальним розбризкуванням. Це забезпечує зменшення лінійної енергії майже вдвічі порівняно з традиційними режимами, звуження зони термічного впливу, зниження деформацій та значне скорочення обсягу післяопераційної механічної обробки. Інженерні розрахунки й експериментальні дані свідчать, що при переході до СМТ не лише скорочується номінальний час зварювання, а й зменшується ефективний час циклу за рахунок нижчої частки браку та переробок, що безпосередньо підвищує реальну продуктивність роботизованих дільниць.

Водночас мінімізація тепловкладення не є самоціллю: надмірне “охолодження” дуги може призвести до непровару, локальної відсутності сплавлення та прихованих дефектів, які критично знижують втомну міцність і надійність. Для тонколистової нержавіючої сталі додатково ускладнюють ситуацію металургійні чинники – небезпека сенсibiliзації в діапазоні 450–850 °С, ризик гарячих тріщин, вплив теплових циклів на структуру аустенітно-феритної суміші та пасивний шар. Тому техніко-економічні переваги СМТ у виробництві можуть бути повністю реалізовані лише за умови науково обґрунтованого підбору режимів, що забезпечують необхідну глибину проплавлення, керовану ширину зони термічного впливу, прийнятний рівень залишкових напружень і стабільний цикл без зростання дефектності.

Сучасний рівень розвитку вимірювальних і діагностичних засобів створює можливості для комплексного аналізу роботизованих процесів СМТ. Високочастотний запис струму і напруги дуги, високошвидкісна візуалізація перенесення металу, інфрачервона термографія, контактні термопари, 3D-сканування геометрії та металографічні дослідження дозволяють встановити причинно-наслідкові зв'язки між режимами СМТ, тепловими циклами, структурним станом металу, деформаціями й дефектністю швів. У поєднанні з інженерними розрахунками повного часу циклу, енергоспоживання та матеріальних втрат (на бризки, переробки, правку) така методика надає основу для

кількісного порівняння СМТ з традиційним роботизованим MIG/MAG у реалістичних умовах серійного складання тонколистової нержавіючої сталі.

У цьому контексті особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на наукове обґрунтування вибору й оптимізації режимів роботизованого СМТ зварювання тонколистових нержавіючих конструкцій з урахуванням повного виробничого циклу. Їхня мета – не лише показати потенціал зниженого тепловкладення для зменшення деформацій і енерговитрат, а й встановити кількісні критерії впливу СМТ на структурний стан, залишкові напруження, втомну й корозійну довговічність, а також на реальну продуктивність та стабільність якості. Отримані результати мають практичне значення для проектування і модернізації роботизованих складально-зварювальних комплексів, орієнтованих на тонколистову нержавіючу сталь у харчовій, фармацевтичній, хімічній та суміжних галузях.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні та розробленні науково-технічних підходів до підвищення продуктивності, якості й довговічності роботизованого СМТ зварювання тонколистової нержавіючої сталі порівняно з традиційним роботизованим MIG/MAG з урахуванням тепловкладення, структурного стану, деформацій, залишкових напружень та вимог до корозійної стійкості.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні технології дугового зварювання з мінімальним тепловкладенням і особливості зварювання тонколистової нержавіючої сталі, визначивши обмеження традиційних роботизованих режимів MIG/MAG щодо деформацій, дефектності та корозійної стійкості.
2. Розробити й реалізувати комплексну методику експериментального дослідження роботизованих процесів СМТ.
3. Сформулювати практичні рекомендації щодо вибору режимів СМТ, організації роботизованого осередку, спрямовані на зменшення деформацій, частки браку і підвищення ресурсу конструкцій.

Об'єктом дослідження є роботизовані технологічні процеси дугового зварювання тонколистової нержавіючої сталі у складі складально-зварювальних ліній машинобудівного виробництва.

Предметом дослідження є закономірності формування тепловкладення, теплових циклів, структурного стану, деформацій, залишкових напружень, дефектності та показників продуктивності при роботизованому СМТ і традиційному MIG/MAG зварюванні тонколистової нержавіючої сталі.

РОЗДІЛ І. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Сучасні технології зварювання з мінімальним тепловкладенням

Розвиток сучасного машинобудування, транспортного та енергетичного машинобудування супроводжується підвищенням вимог до точності геометрії, ресурсу та масової ефективності конструкцій, що зумовлює перехід до технологій зварювання з контрольованим і мінімально можливим тепловкладенням. У традиційних режимах дугового зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів (процес MIG/MAG) тепловий потік до виробу є достатньо високим, що призводить до широкої зони термічного впливу, значних зварювально-термічних деформацій, утворення залишкових напружень і, відповідно, до зниження втомної міцності та ресурсу елементів. Особливо критичним це стає для тонколистових конструкцій, високоміцних сталей та алюмінієвих сплавів, де навіть невелике перевищення тепловкладення здатне спричинити прожоги, локальне розм'якшення металу або втрату стабільності геометрії [1–3].

На цьому тлі технології зі зниженим тепловкладенням, серед яких особливе місце посідає процес Cold Metal Transfer (CMT), розглядаються як інструмент керованого «охолодження» зварювального процесу без втрати якості формування шва та металургійної надійності. Технологія CMT, розроблена як модифікація процесу GMAW з керованим коротким замиканням, поєднує цифрове формування зварювального струму з примусовою осьовою реверсацією зварювального дроту у фазі відриву краплі. Завдяки цьому середній струм та питоме тепловкладення істотно зменшуються, а перенесення металу краплі стає практично безбризковим, із чітко контрольованими моментами короткого замикання [2; 4]. У результаті формується вузька зона термічного впливу, зменшується рівень деформацій і

залишкових напружень, а також розширюються можливості якісного зварювання тонколистових деталей і різнорідних матеріалів [3–5].

Фізична сутність СМТ полягає у циклічній послідовності «коротке замикання – реверсація дроту – відрив краплі – стабілізація дуги», яка реалізується завдяки високошвидкісній взаємодії джерела живлення та приводу подачі. У фазі короткого замикання струм обмежується, що зменшує тепловий імпульс до основного металу; у момент відриву краплі дріт примусово відтягується назад, що знижує ймовірність утворення бризок і викидання кратера. Перенесення металу відбувається малими порціями з високою частотою, що забезпечує стабільну геометрію валика навіть за зварювання у положеннях, відмінних від нижнього. При цьому, на відміну від класичних імпульсних режимів, середній струм і теплова енергія, підведена до вузької зони металу, є значно нижчими, що безпосередньо відображається на ширині зони термічного впливу та рівні деформацій [2–4].

У контексті роботизованого зварювання процес СМТ особливо привабливий завдяки високій повторюваності перенесення металу та цифровій інтеграції з системою керування робота. Стабільність дуги й відсутність значного розбризкування зменшують вимоги до очищення міжпрохідних поверхонь, знижують ризик утворення включень та підрізів, а також спрощують підтримання якісного формування шва при зміні положення пальника. Для довгомірних швів на рамних, кузовних, резервуарних і профільних конструкціях зменшення тепловкладення через СМТ безпосередньо означає зниження рівня прогинів і скручувань, а отже, зменшення обсягу правки та доопрацювання, що традиційно складають значну частку витрат часу і ресурсів у зварювальному виробництві [5–7].

Порівняння продуктивності роботизованого СМТ зварювання зі звичайним MIG/MAG доцільно виконувати не лише за швидкістю переміщення пальника або питомою продуктивністю наплавлення, а й за інтегрованими показниками, які

включають частку браку та переробок, обсяг післяопераційної механічної обробки, енерговитрати на одиницю довжини шва, а також непрямі втрати часу через необхідність корекції деформацій. Традиційні режими дугового зварювання забезпечують високий рівень наплавлення, проте часто супроводжуються значними деформаціями, підвищеним розбризкуванням та ширшою зоною термічного впливу. Це вимагає збільшених припусків під механічну обробку, застосування жорсткіших кондукторів, додаткових операцій шліфування, наплавлення або вирізання дефектних ділянок. Натомість СМТ, завдяки нижчому тепловкладенню та практично безбризковому перенесенню, зменшує потребу у післяопераційній обробці, а також дозволяє зменшити жорсткість оснастки, зберігаючи прийнятний рівень точності геометрії [3; 6–8].

Ще одним важливим аспектом є зв'язок між продуктивністю, якістю шва та довговічністю деталей. Зменшення тепловкладення через СМТ призводить до звуження зони термічного впливу та зменшення градієнтів температур, що знижує рівень залишкових напружень і деформацій. Це, у свою чергу, позитивно впливає на втомну міцність і тріщиностійкість з'єднань, особливо на вузлах, що працюють у змінних навантаженнях або за наявності корозійно-втомних впливів. Дослідження показують, що для тонколистових сталей і алюмінієвих сплавів використання СМТ дозволяє уникнути локального перегріву, зменшити зеренну грубозернисту зону та забезпечити більш сприятливий розподіл твердості в околі шва, що є критично важливим для ресурсних характеристик конструкції [4; 7–9].

Для кількісного зіставлення продуктивності та тепловкладення розглянемо інженерний приклад порівняння роботизованого зварювання кутового шва довжиною $L = 500$ мм на тонколистовому сталевому профілі товщиною 3 мм у двох режимах: традиційний MIG/MAG та СМТ. Припустимо, що для традиційного режиму використовується струм $I_1 = 200$ А, напруга $U_1 = 24$ В, ефективний коефіцієнт використання тепла $\eta_1 = 0,8$, а швидкість переміщення пальника $v_1 = 6$

мм/с, що відповідає 360 мм/хв. Тоді питоме тепловкладення H_1 , кДж/мм, можна оцінити за загальноприйнятою формулою

$$H = (U \cdot I \cdot 60 \cdot \eta) / (1000 \cdot v),$$

де U є напругою, I є струмом, η є коефіцієнтом корисного використання тепла, v є швидкістю зварювання в мм/хв [8]. Для традиційного режиму маємо $U_1 \cdot I_1 = 24 \cdot 200 = 4800$ Вт; $4800 \cdot 60 = 288000$ Дж/хв; $288000 \cdot 0,8 = 230400$ Дж/хв. У знаменнику $1000 \cdot 360 = 360000$. Отже, $H_1 = 230400 / 360000 = 0,64$ кДж/мм. Час зварювання шва становить $t_1 = L / v_1 = 500 / 6 \approx 83,3$ с.

Для СМТ-режиму припустимо струм $I_2 = 130$ А, напругу $U_2 = 18$ В, коефіцієнт $\eta_2 = 0,85$, швидкість $v_2 = 7,5$ мм/с, тобто 450 мм/хв. Аналогічний розрахунок дає $U_2 \cdot I_2 = 18 \cdot 130 = 2340$ Вт; $2340 \cdot 60 = 140400$ Дж/хв; $140400 \cdot 0,85 = 119340$ Дж/хв. Знаменник $1000 \cdot 450 = 450000$. Питоме тепловкладення для СМТ дорівнює $H_2 = 119340 / 450000 \approx 0,27$ кДж/мм. Таким чином, при дещо більшій швидкості зварювання питоме тепловкладення в СМТ приблизно у 2,4 раза нижче, ніж у традиційного режиму, тоді як час зварювання шва зменшується до $t_2 = 500 / 7,5 \approx 66,7$ с.

У контексті роботизованої лінії вирішальним є не лише номінальний час проходження шва, а й додаткові витрати часу на переробку та механічну обробку. Припустимо, що через вищі деформації та більшу кількість бризок при традиційному зварюванні близько 20 % виробів потребують додаткової правки та шліфування, на що витрачається $\Delta t = 60$ с на деталь, тоді як при СМТ таких виробів лише 5 %. Тоді ефективний середній час циклу на одну деталь можна оцінити як $te_{ф1} = t_1 + 0,2 \cdot \Delta t = 83,3 + 12 = 95,3$ с для традиційного режиму та $te_{ф2} = t_2 + 0,05 \cdot \Delta t = 66,7 + 3 = 69,7$ с для СМТ. Навіть якщо припустити однакову ефективну продуктивність наплавлення, різниця у часі циклу становить близько 27 %, при цьому СМТ забезпечує менші деформації, нижче тепловкладення та зменшені енерговитрати.

Енергетичний аспект також має практичне значення. Повна енергія, підведена до зони шва на довжині 500 мм, дорівнює $E_1 = H_1 \cdot L = 0,64 \cdot 500 = 320$ кДж для традиційного режиму та $E_2 = 0,27 \cdot 500 \approx 135$ кДж для СМТ. Тобто при зварюванні однієї деталі СМТ споживає приблизно в 2,4 раза менше теплової енергії у зону шва. З огляду на те, що частина цієї енергії переходить у деформації, залишкові напруження та небажаний нагрів оснастки, зменшення тепловкладення безпосередньо пов'язане не лише з ресурсом деталі, а й з довговічністю пристроїв та зниженням температурного навантаження на елементи роботизованого осередку [5; 8–9].

З точки зору дефектності з'єднань технологія СМТ демонструє помітно нижчий рівень розбризкування, зменшену ймовірність підрізів, незаплавлених кратерів та пористості, що було підтверджено численними експериментальними дослідженнями, зокрема при зварюванні алюмінієвих сплавів та тонколистових сталей [2–4; 7]. Зменшення розбризкування знижує ймовірність включень неметалевих частинок у метал шва та поверхневих дефектів, які можуть виступати концентраторами напружень при циклічних навантаженнях. У конструкціях, де втомна міцність є лімітуючим фактором, це безпосередньо впливає на ресурс, оскільки навіть невеликі поверхневі нерівності та включення здатні істотно знижувати число циклів до зародження та поширення тріщини. Звужена зона термічного впливу при СМТ також означає меншу протяжність областей з небажаною зміною твердості, що є критичним для високоміцних сталей та тонкостінних елементів [3; 7–9].

Водночас мінімізація тепловкладення не є самоціллю, оскільки надмірне зниження енергії дуги може призвести до непровару та локальної відсутності сплавлення кромки. При роботизованому СМТ важливо забезпечити коректне узгодження струму, напруги, швидкості подачі дроту та швидкості переміщення пальника з геометрією шва й типом матеріалу. Неправильний вибір параметрів,

особливо при зварюванні матеріалів з високою теплопровідністю, може призвести до дефектів типу «непровар кореня» або «неповне проплавлення», які часто є менш помітними за поверхневими підрізами, але мають набагато більший вплив на статичну та втомну міцність з'єднання. Тому у практичних рекомендаціях підкреслюється необхідність поєднання СМТ з якісною підготовкою кромок, застосуванням коригуючих коливальних рухів пальника, а також ізв'язуванням режимів із результатами неруйнівного контролю [4; 6; 9].

Переваги СМТ особливо проявляються в інтегрованих роботизованих лініях, де зварювання є однією з ланок технологічного ланцюга, що включає попереднє складання, фіксацію, міжопераційний контроль та, за потреби, обробку поверхні. Зменшення деформацій і стабілізація геометрії швів спрощують процес складання та дозволяють зменшити число компенсуючих пристроїв і регулювань у кондукторах. Як наслідок, час наладки лінії скорочується, а варіативність положення деталей у робочому просторі робота зменшується, що позитивно впливає на роботизовані траєкторії і зменшує ризик наближення до сингулярних конфігурацій. Знизившись до рівня «керованого низького тепловкладення», СМТ не лише покращує локальні характеристики шва, а й створює передумови для загального підвищення стабільності та гнучкості роботизованого виробництва [6; 7].

Слід також відзначити, що технологія СМТ отримала подальший розвиток у вигляді модифікацій СМТ Advanced, СМТ Pulse, СМТ Twin тощо, які поєднують низьке тепловкладення з імпульсними режимами або використанням двох дротів і орієнтовані на ще більш високу продуктивність та кращу адаптацію до складної геометрії швів [5; 7–8]. Такі модифікації, будучи інтегрованими у роботизовані комплекси, дозволяють досягати ще більшого діапазону керування тепловкладенням і продуктивністю, проте вимагають більш складного узгодження параметрів джерела живлення з кінематикою та програмним забезпеченням робота.

Це підкреслює важливість системного підходу, у якому вибір СМТ або його модифікацій розглядається не ізольовано, а у зв'язку з вимогами до геометрії шва, типом матеріалу, очікуваним ресурсом конструкції та архітектурою роботизованої лінії.

1.2. Особливості зварювання тонколистової нержавіючої сталі

Тонколистова нержавіюча сталь широко застосовується у харчовому, фармацевтичному, хімічному машинобудуванні та при виготовленні обладнання з підвищеними вимогами до корозійної стійкості, гігієнічності та зовнішнього вигляду. Типові товщини 0,6–2,0 мм формують специфічні обмеження на тепловкладення і геометричну стабільність, оскільки навіть помірні локальні перегріви спричиняють прожоги, значні короблення та зміну пасивного стану поверхні. Додаткову складність створюють високий коефіцієнт лінійного розширення аустенітних сталей і відносно низька теплопровідність порівняно з вуглецевими сталями, через що зона термічного впливу прогрівається нерівномірно, а деформації після охолодження мають вищу амплітуду при однаковому тепловкладенні [1–3]. У цих умовах роботизація процесу та застосування керованих режимів перенесення металу, зокрема Cold Metal Transfer (CMT), розглядаються як інструменти системного зниження тепловкладення й варіативності, зменшення частки переробок і стабілізації якості шва в серійному виробництві [8, 10].

Металургійні особливості тонколистової нержавіючої сталі визначають вимоги до режимів зварювання і критеріїв приймання з'єднань. Для аустенітних марок типу AISI 304L або 316L характерні висока пластичність і в'язкість руйнування, однак у зварному шві та зоні термічного впливу можливі явища гарячого тріщиноутворення, які пов'язані з кристалізаційною сегрегацією і наявністю низькоплавких евтектик у міждендритних ділянках. Ризик підвищується

при збільшенні тепловкладення, розширенні ванни та зниженні швидкості кристалізації, тому для тонких листів доцільно підтримувати коротку ванну і стабільний перенос металу без надмірного проплавлення [1, 2]. Інша суттєва проблема пов'язана із сенсibiliзацією у температурному діапазоні близько 450–850 °С, коли відбувається виділення карбідів хрому на межах зерен і локальне збіднення матриці хромом, що знижує стійкість проти міжкристалітної корозії. Для тонких листів час перебування в небезпечному температурному інтервалі значною мірою визначається питомим тепловкладенням і умовами охолодження, тому режими з нижчим тепловкладенням зазвичай є сприятливішими для корозійної довговічності, особливо у разі відсутності повноцінної післязварювальної пасивації [1, 3, 9]. На практиці це підсилює значущість вибору режиму, оскільки підвищення продуктивності шляхом збільшення струму без урахування тепловкладення може збільшити не лише деформації, а і схильність до корозійних відмов у реальній експлуатації.

Технологічна підготовка тонколистового з'єднання має вирішальний вплив на можливість стабільно реалізувати роботизовані режими. Для стикових з'єднань товщиною до 1,5 мм критичними є постійність зазору, точність крайок і наявність якісного притиску в зоні шва, оскільки навіть невелике збільшення зазору викликає спад тепловідведення і може призвести до прожогу при короткодугових режимах або до провалів кореня при спробі підвищити швидкість [2, 10]. У разі виготовлення корпусних тонкостінних деталей застосовують технологічні пристрої з мідними підкладками або тепловідвідними планками, а також точкове прихоплення з мінімальним тепловкладенням, що дозволяє зберегти геометрію до моменту виконання основного шва роботом. Для аустенітних сталей додатковою вимогою є захист зворотного боку кореня інертним газом при зварюванні стикових швів без підкладки, оскільки окиснення кореня призводить до утворення грубої оксидної плівки і втрати корозійної стійкості, а також до появи концентраторів напружень

[1, 9]. Отже, продуктивність роботизованого процесу визначається не лише швидкістю переміщення пальника, але й якістю підготовки з'єднання та організацією газового захисту.

У роботизованому MIG/MAG зварюванні тонколистової нержавіючої сталі традиційно застосовують короткодуговий перенос (short circuit) або імпульсний режим з обмеженою енергією імпульсу. Перевага роботизації полягає у високій повторюваності траєкторії, стабільності вильоту електрода та можливості точно підтримувати кут пальника, що для нержавіючих сталей важливо через чутливість до окиснення та формування валика. Проте у звичайному короткодуговому режимі відокремлення краплі супроводжується циклічними короткими замиканнями з відносно високими струмовими піками, які збільшують розбризкування, формують нестабільні коливання ванни та підвищують ризик локального перегріву при найменших відхиленнях зазору або притиску [2, 10]. Імпульсний MIG/MAG покращує контроль перенесення, але для товщин близько 1 мм часто вимагає дуже вузького технологічного вікна, оскільки збільшення енергії імпульсу одразу підвищує проплавлення і деформації, а зменшення призводить до непровару або нестабільного формування валика. На фоні цих обмежень метод СМТ розглядають як технологію, що дозволяє отримати стабільний перенос з нижчим тепловкладенням і мінімальним розбризкуванням без втрати керованості процесу [8, 10].

Фізична суть СМТ полягає в керованому короткозамикальному переносі, де відокремлення краплі забезпечується не лише електродинамічними силами дуги, а й синхронізованим реверсивним рухом дроту. У момент контакту краплі з ванною система керування зменшує струм і одночасно відтягує дріт, сприяючи відриву краплі при нижчому тепловиділенні, а потім знову подає дріт у дугу. Така схема зменшує середній струм, обмежує пікові значення та знижує енергію, що передається у ванну на одиницю довжини шва, що особливо важливо для тонкого

листа [8]. Оскільки ванна є менш перегрітою, зменшується ширина зони термічного впливу та амплітуда деформацій, а через мінімальне розбризкування зменшується потреба у механічному очищенні поверхні, що для нержавіючої сталі має окрему цінність, бо будь-які абразивні впливи і залишки бризок можуть погіршувати формування пасивної плівки і провокувати локальні осередки корозії [1, 9]. Роботизоване застосування СМТ забезпечує додаткові переваги, оскільки стабільний вильот дроту і повторюваний кут пальника зменшують варіативність тепловкладення, а отже і варіативність кольорів побіжності та оксидних плівок у зоні шва.

Порівняння продуктивності СМТ та традиційного роботизованого MIG/MAG для тонколистової нержавіючої сталі доцільно виконувати у термінах повного циклу, а не лише швидкості зварювання. Під продуктивністю в серійному складанні розуміють кількість деталей за одиницю часу за умови дотримання критеріїв якості та мінімальної частки переробок. На практиці цикл включає підведення робота, запалювання дуги, власне зварювання, закінчення дуги, переходи між швами, а також післяопераційні дії, які можуть виконуватися в окремій позиції або в тому ж такті. Для нержавіючої сталі післяопераційна обробка часто включає видалення бризок, локальне шліфування, травлення або пасивацію, а також виправлення деформацій, якщо вони виходять за допуски складання [1, 9]. У традиційному MIG/MAG короткодуговому режимі, навіть при роботизації, вірогідність мікродефектів і бризкоутворення вища, тому збільшуються витрати на очищення і зростає частка переробок, пов'язаних з прожогами, нестабільністю кореня або локальними підрізами. СМТ, за умови правильно підбраного дроту і газової суміші, здатний зменшувати ці непродуктивні витрати часу, що і формує реальну різницю в продуктивності [8, 10].

Взаємозв'язок між продуктивністю, якістю шва та довговічністю деталей для тонколистової нержавіючої сталі має чіткий причинно-наслідковий характер.

Прагнення максимізувати швидкість зварювання і скоротити такт без контролю тепловкладення призводить до збільшення деформацій і залишкових напружень, що у тонких деталях може спричинити зміни геометрії, утруднення складання та концентрацію напружень у вузлах кріплення. Підвищені залишкові напруження у поєднанні з нерівномірною мікроструктурою зони термічного впливу збільшують чутливість до втоми при вібраціях та циклічних навантаженнях обладнання, а також можуть погіршувати корозійну стійкість у хлоридних середовищах через інтенсифікацію локальних електрохімічних процесів у зонах напруженого стану [1, 3]. Додатково, наявність бризок та термобарв у зоні шва є не лише естетичною проблемою, а й індикатором ступеня окиснення поверхні. За відсутності повного відновлення пасивного шару ці ділянки можуть ставати осередками точкової корозії, що з часом призводить до зниження герметичності корпусних виробів та скорочення ресурсу [9]. Тому технології, що дозволяють зменшити окиснення і обсяг післяопераційної обробки, одночасно підвищують продуктивність і довговічність.

Особливої уваги потребують типові дефекти при зварюванні тонколистової нержавіючої сталі, оскільки їх фізична природа по-різному впливає на експлуатаційну надійність. Прожог є наслідком надмірного локального тепловкладення або збільшення зазору і майже завжди призводить до переробки, що означає повторний нагрів і додаткове розширення зони термічного впливу. Непровар або нестача проплавлення, навпаки, може бути малопомітним при візуальному контролі, але створює різкий концентратор напружень, який знижує втомну міцність і підвищує ризик тріщиноутворення у вузлах, що працюють під циклічним навантаженням [1, 4]. Підрізи та нерівномірність валика впливають на концентрацію напружень і корозійну стійкість, а бризки і включення шлакоподібних оксидів підсилюють локальне руйнування пасивного шару. Саме тому критерії приймання зварних з'єднань і рівні якості встановлюють із

прив'язкою до умов експлуатації, а у виробництві доцільно застосовувати стандартизовані критерії оцінки дефектів і процедури контролю, зокрема за ISO 5817 та візуальним контролем відповідно до ISO 17637 [4, 5]. У контексті порівняння СМТ та традиційного режиму ключовим є те, що СМТ зменшує ймовірність прожогів і розбризкування, а отже скорочує частку переробок і обсяг післяопераційного очищення, що прямо відображається на часі циклу.

Для кількісного порівняння продуктивності СМТ і традиційного роботизованого MIG/MAG розглянемо інженерний приклад з реалістичними вихідними даними для серійного складання. Нехай зварюється тонколистовий корпус з аустенітної сталі AISI 304L товщиною $t = 1,5$ мм зі стиковим швом довжиною $L = 800$ мм у нижньому положенні. Роботизований осередок виконує один основний шов у такті; допоміжні переміщення, позиціювання та команди запалювання і гасіння дуги сумарно займають $t_{доп} = 12$ с на деталь. Для оцінки тепловкладення використовується лінійна енергія, яку для дугового зварювання в інженерній практиці задають співвідношенням $q = \eta \cdot U \cdot I / v$, де η є коефіцієнт корисного використання потужності дуги, U є напруга, I є середній струм, v є швидкість зварювання, а q отримують у Дж/мм при U в В, I в А і v в мм/с [2, 3]. Для роботизованого процесу η часто приймають у межах 0,75–0,85 залежно від режиму і тепловідведення, у розрахунку приймемо $\eta = 0,8$ як інженерно обґрунтоване значення для порівняння [2].

Для СМТ режиму приймемо параметри, характерні для тонкого листа: середній струм $I_{СМТ} = 80$ А, напруга $U_{СМТ} = 16$ В, швидкість зварювання $v_{СМТ} = 1,1$ м/хв. Швидкість у мм/с становить $v_{СМТ} = 1,1 \cdot 1000 / 60 \approx 18,33$ мм/с. Тоді лінійна енергія $q_{СМТ} = 0,8 \cdot 16 \cdot 80 / 18,33 \approx 55,9$ Дж/мм. Час власне зварювання $t_{зв_СМТ} = L / v_{СМТ} = 800 / 18,33 \approx 43,6$ с. Базовий час циклу без урахування переробок та очищення становить $t0_{СМТ} = t_{доп} + t_{зв_СМТ} = 12 + 43,6 = 55,6$ с.

Для традиційного роботизованого MIG/MAG у короткодуговому режимі, який забезпечує прийнятний контроль для товщини 1,5 мм, приймемо середній струм $I_{\text{MIG}} = 110$ А, напругу $U_{\text{MIG}} = 18$ В, швидкість зварювання $v_{\text{MIG}} = 0,8$ м/хв, що відповідає $v_{\text{MIG}} = 0,8 \cdot 1000/60 \approx 13,33$ мм/с. Тоді лінійна енергія $q_{\text{MIG}} = 0,8 \cdot 18 \cdot 110/13,33 \approx 118,8$ Дж/мм. Час зварювання $t_{\text{зв_MIG}} = 800/13,33 \approx 60,0$ с, а базовий час циклу $t0_{\text{MIG}} = 12 + 60,0 = 72,0$ с. Уже на цьому етапі видно, що різниця у швидкості і стабільності процесу формує приріст продуктивності СМТ через скорочення чистого часу горіння дуги, а різниця у тепловкладенні майже вдвічі означає суттєво іншу імовірність короблення, прожогів і зміни поверхневого стану у зоні шва [1–3].

Для реального виробництва необхідно врахувати непродуктивні витрати часу, які зумовлені бризками, локальною механічною обробкою та переробками. Нехай післяопераційне очищення і локальне шліфування для СМТ займає $t_{\text{оч_СМТ}} = 10$ с на деталь через мінімальне розбризкування і більш рівномірний валик, а для традиційного MIG/MAG $t_{\text{оч_MIG}} = 35$ с через необхідність видалення бризок та доведення зовнішнього вигляду. Нехай імовірність переробки через прожог або нестабільний корінь для СМТ становить $p_{\text{СМТ}} = 0,02$, а середній час переробки $t_{\text{пер_СМТ}} = 60$ с, тоді очікуваний внесок у цикл дорівнює $p_{\text{СМТ}} \cdot t_{\text{пер_СМТ}} = 1,2$ с. Для традиційного режиму приймемо $p_{\text{MIG}} = 0,08$ і $t_{\text{пер_MIG}} = 120$ с, що відповідає очікуваному внеску 9,6 с, оскільки прожоги та підрізи у тонкому листі часто вимагають локального вирізання, підварювання і повторного очищення [1, 4]. Тоді очікуваний повний час циклу для СМТ становить $t_{\text{СМТ}} = t0_{\text{СМТ}} + t_{\text{оч_СМТ}} + p_{\text{СМТ}} \cdot t_{\text{пер_СМТ}} = 55,6 + 10 + 1,2 = 66,8$ с, а для традиційного MIG/MAG $t_{\text{MIG}} = 72,0 + 35 + 9,6 = 116,6$ с.

Оцінимо продуктивність як кількість деталей за годину: $N = 3600/t$. Для СМТ $N_{\text{СМТ}} = 3600/66,8 \approx 53,9$ дет./год, для традиційного режиму $N_{\text{MIG}} = 3600/116,6 \approx 30,9$ дет./год. Відношення $N_{\text{СМТ}}/N_{\text{MIG}} \approx 1,74$ означає, що за прийнятих умов

СМТ забезпечує близько 74 відсотків приросту продуктивності, причому близько половини виграшу формується не лише швидкістю зварювання, а скороченням очищення та зменшенням очікуваного часу переробок. Така структура виграшу є принципово важливою для управління виробничою надійністю: зменшення частки переробок означає меншу кількість повторних термічних циклів, меншу ширину зони термічного впливу та нижчий рівень залишкових напружень у критичних зонах, що в кінцевому підсумку зменшує ризик корозійно-втомних пошкоджень і підвищує стабільність геометрії корпусних деталей у складанні [1, 3, 9]. Крім того, нижче тепловкладення $q_{\text{СМТ}} \approx 56$ Дж/мм порівняно з $q_{\text{MIG}} \approx 119$ Дж/мм означає суттєво менший обсяг металу, прогрітого до температур, де можливе виділення карбідів хрому і деградація пасивного шару, що підвищує імовірність збереження корозійної довговічності без агресивних післязварювальних обробок, особливо якщо виріб працює в середовищах з підвищеним вмістом хлоридів або піддається частому миттю і дезінфекції [1, 9].

Отримані розрахункові результати слід інтерпретувати в контексті надійності експлуатації обладнання та стабільності якості. По-перше, коротший час циклу при СМТ зменшує завантаження обладнання і дає можливість працювати із нижчими резервами потужності, що позитивно впливає на термін служби роботизованого осередку і стабільність планування. По-друге, зменшення обсягу післяопераційного очищення означає менший ризик введення поверхневих дефектів від абразивної обробки, що для нержавіючих сталей критично, оскільки подряпини і залишки частинок можуть ініціювати корозійні осередки і погіршувати гігієнічність поверхні [9]. По-третє, нижчий тепловкладення і вища стабільність перенесення металу зменшують розкид параметрів шва, що підвищує повторюваність результатів контролю і знижує ймовірність прихованих дефектів, які могли б проявитися у вигляді тріщин або негерметичності під час експлуатації. Виробничі системи зварювання, орієнтовані на забезпечення якості, підкреслюють

необхідність керованості процесу, документації параметрів та відтворюваності, що є передумовою довговічності відповідальних виробів [6].

Разом із тим, використання СМТ у роботизованому зварюванні тонколистової нержавіючої сталі потребує коректного налаштування технологічної системи. Вибір дроту, газової суміші та режиму подачі має забезпечувати достатню змочуваність і формування валика без надмірного підвищення тепловкладення, а програмування робота повинно враховувати стабільність вильоту дроту і захисної атмосфери. Для тонких листів особливо важливими є режими запалювання та гасіння дуги, оскільки локальний перегрів на старті може призвести до прожогу, а на фініші до кратерних дефектів, що знижують втомну міцність. Використання керованих функцій заповнення кратера та адаптивних підходів до підводу пальника зменшує ці ризики, а стандартизований візуальний контроль забезпечує раннє виявлення тенденцій до дефектності [5, 6]. З позицій виробничої системи це означає, що переваги СМТ найбільш повно реалізуються у поєднанні з стабільною підготовкою з'єднання, жорсткою оснасткою та регламентованими процедурами контролю якості, які дозволяють підтримувати низьку частку переробок і зберігати корозійну стійкість поверхні [4–6, 9].

Підсумовуючи, зварювання тонколистової нержавіючої сталі відрізняється високою чутливістю до тепловкладення, геометрії з'єднання та стану захисної атмосфери, що зумовлено низькою теплопровідністю, високим тепловим розширенням і вимогами до корозійної стійкості поверхні [1–3, 9]. Роботизоване СМТ зварювання забезпечує зниження лінійної енергії, мінімізацію розбризкування і стабілізацію перенесення металу, що зменшує деформації, скорочує обсяг післяопераційної обробки та знижує частку переробок у порівнянні з традиційним роботизованим MIG/MAG, особливо у короткодугових режимах [8, 10]. Розрахунковий приклад показав, що сумарний виграш у продуктивності формується як через вищу швидкість виконання шва, так і через менші

непродуктивні витрати часу, а зниження тепловкладення майже вдвічі створює передумови для підвищення довговічності деталей за рахунок нижчих деформацій, менших залишкових напружень і кращого збереження корозійної стійкості в зоні зварювання. У виробничій практиці це означає, що вибір СМТ як базового роботизованого режиму для тонколистової нержавіючої сталі є технологічно обґрунтованим шляхом одночасного підвищення такту, стабільності якості та надійності експлуатації зварних конструкцій за умови належної підготовки з'єднань і регламентованого контролю [4–6, 9, 10].

Тонколистова нержавіюча сталь (переважно аустенітні марки типу AISI 304/304L, 316/316L) широко застосовується в харчовому, фармацевтичному та пакувальному обладнанні, де визначальними є корозійна стійкість, чистота поверхні та стабільність геометрії тонких панелей і кожухів. Саме для таких деталей з товщиною 0,8–1,5 мм зварювання є технологічно критичною операцією, оскільки поєднання відносно низької теплопровідності й високого коефіцієнта лінійного теплового розширення спричиняє значні температурні градієнти, локальні деформації, короблення та залишкові напруження навіть за невеликої довжини шва [30–31]. Додатково, нагрів у діапазоні 450–850 °C підвищує ризик сенсibiлізації (виділення карбідів хрому на межах зерен) зі зниженням міжкристалітної корозійної стійкості, а надмірний тепловклад або нестійке перенесення металу збільшують імовірність пропалів, підрізів і надмірного підсилення, що прямо впливає на довговічність вузлів та потребу в післяопераційній обробці [31]. У роботизованих комплексах ці ризики посилюються через високу повторюваність траєкторії: якщо режим обрано неправильно, робот стабільно відтворює дефект по всій партії, перетворюючи локальну проблему якості на системну втрату продуктивності.

Традиційне роботизоване MIG/MAG зварювання тонкого нержавіючого листа реалізують у короткодуговому або імпульсному режимі з дротом малого

діаметра (0,8–1,0 мм) та інертно-активними сумішами захисних газів із мінімальною часткою активної компоненти. Фізична суть процесу зводиться до перетворення електричної енергії дуги на теплоту в зоні плавлення, формування зварювальної ванни та кристалізації металу шва при одночасному керованому підведенні присадного дроту. Для тонкого листа ключовими стають не стільки граничні значення струму й напруги, скільки стабільність перенесення крапель, контроль довжини дуги, обмеження тепловкладення на одиницю довжини шва та керування завершенням шва (заповнення кратера, мінімізація пористості) [30–31]. У класичному MIG/MAG короткодугове перенесення супроводжується частими короткими замиканнями, під час яких відбуваються піки струму та неконтрольоване відривання краплі, що генерує бризки й нестабільність ванни. Для тонкого нержавіючого листа це означає зростання витрат на очищення поверхні, погіршення зовнішнього вигляду шва, а інколи і локальні пропали, що потребують переробки або вибракування деталі.

Процес Cold Metal Transfer (CMT) розроблено як керований різновид короткодугового перенесення, у якому момент відриву краплі задається не випадковою взаємодією електромагнітних сил і гідродинаміки ванни, а координованою дією джерела струму та механізму подачі дроту [32–36]. У CMT дріт не лише подається вперед, а й у фазі короткого замикання керовано відводиться назад на задану величину, що зменшує механічний «тиск» дроту на ванну та дозволяє відокремити краплю при суттєво нижчому струмі. Це знижує миттєву потужність дуги та, відповідно, тепловкладення, одночасно стабілізуючи перенесення металу і різко скорочуючи кількість бризок [36]. Для тонколистової нержавіючої сталі цей механізм має принципове значення: менший тепловклад зужує зону термічного впливу, зменшує деформації й залишкові напруження, а низька кількість бризок скорочує або повністю усуває операції механічного

очищення поверхні, що у виробничому циклі часто є «прихованим» споживачем часу.

Фізично тепловклад у дугових процесах доцільно оцінювати питомою енергією на одиницю довжини шва. Для інженерних порівнянь застосовують співвідношення ($q = \eta \cdot U \cdot I / v$), де (q) – лінійний тепловклад, Дж/мм; (η) – коефіцієнт корисного використання тепла дуги; (U) – напруга, В; (I) – струм, А; (v) – швидкість зварювання, мм/с [30, 35]. Для тонкого нержавіючого листа задача полягає у збереженні (q) достатнім для проплавлення та формування валика без непровару, але нижчим за рівень, який ініціює пропали, надмірне розтікання ванни та деформації. Саме в цьому діапазоні СМТ проявляє перевагу: процес забезпечує менші амплітуди теплових піків і кращу відтворюваність перенесення, що зменшує технологічну дисперсію якості шва по довжині та від деталі до деталі [32–35]. У роботизованому виконанні це означає більшу «керованість» процесу: після підбору синергетичної програми та параметрів подачі дроту робот здатний тримати вузьке вікно режимів, мінімізуючи вплив коливань зазору та теплового стану деталі в серії.

Різновидності СМТ зварювання в промислових джерелах та дослідженнях зазвичай трактують як сімейство керованих хвильових форм і циклів перенесення, що змінюють співвідношення між стабільністю перенесення, тепловкладенням та формуванням шва [32–36]. Базовий СМТ орієнтований на мінімізацію тепла і бризок у короткодуговому режимі при високій повторюваності відриву краплі завдяки зворотному ходу дроту [36]. Для тонкого нержавіючого листа базовий СМТ є технологічним аналогом «м'якого» короткого замикання, який зберігає можливість роботи на малих струмах, що критично при стикових з'єднаннях без підкладки, коли надлишкове тепло безпосередньо підвищує ризик пропалу.

Модифікації типу СМТ Pulse або СМТ Mix (у практиці частина виробників подає їх як різні синергетичні лінії) вводять у цикл додаткові керовані імпульси

струму, підвищуючи стабільність формування валика та керованість проплавлення при збереженні низької кількості бризок [32–36]. Фізично це означає зміну балансу: короткодугові фази відповідають за «холодність» і контрольоване перенесення, а імпульсні фази забезпечують змочування кромки і стабілізацію ванни у випадках, коли геометрія з'єднання, локальний зазор або вимоги до форми шва вимагають більшої енергії, ніж дає базовий СМТ. Для тонколистової нержавіючої сталі це корисно на кутових або нахлесткових з'єднаннях, де потрібне надійне з'єднання кромки з листом при мінімальному підпалі поверхні.

Окремою групою розглядають циклічно-модульовані різновиди СМТ, у яких енерговкладення змінюють у часі за заданим законом для компенсації теплового накопичення в деталі та керування напружено-деформованим станом. У роботизованому зварюванні тонких панелей накопичення тепла на довгих ділянках спричиняє прогресивне зростання деформацій та погіршення повторюваності зазору у наступних виробках. Тому процеси з періодичною зміною енергії, паузами або «сходінками» режиму дозволяють технологічно відтворити логіку теплового менеджменту без зупинки робота, тобто зберегти продуктивність і одночасно знизити короблення [32–35]. З огляду на металургію нержавіючих сталей, контроль теплового циклу також є засобом зниження ширини зони термічного впливу і часу перебування в критичних температурних інтервалах, що позитивно впливає на корозійну стійкість і стабільність властивостей [31].

У практичній роботизації різновидності СМТ доцільно інтерпретувати через їх функціональну придатність до конкретних виробничих сценаріїв. Якщо вузол має короткі шви з частими стартами і зупинками, визначальною стає стабільність запалювання, мінімізація бризок та кероване завершення шва з заповненням кратера. У цьому випадку базовий СМТ забезпечує максимальний ефект за рахунок скорочення післяопераційних робіт і зменшення дефектів поверхні [36]. Якщо ж деталь містить довгі протяжні шви або зварювання виконується по тонких кромках

із підвищеним ризиком непровару через варіації зазору, модифікований СМТ з імпульсними вставками дозволяє підвищити «стійкість» процесу до збурень, зберігаючи відносно низьке середнє тепловкладення [32–35]. У будь-якому випадку для нержавіючих сталей важливе коректне узгодження захисного газу та присадного матеріалу, оскільки надлишок активної компоненти в газі підвищує окиснення і погіршує зовнішній вигляд, а неправильно підібраний дріт може змінити схильність до гарячих тріщин або форму валика [31, 38].

Порівняння продуктивності роботизованого СМТ і традиційного роботизованого MIG/MAG у тонколистовій нержавіючій сталі коректно виконувати не лише за швидкістю зварювання, а за повним часом циклу виготовлення одиниці виробу. Для роботизованих зварних операцій час циклу формується сумою часу зварювання по довжині шва, часу переміщень між швами, часу допоміжних дій (підведення, відведення, корекція траєкторії, продувка газом), а також очікуваних витрат часу на післяопераційну обробку і переробки. Саме останні дві складові часто визначають відмінність між СМТ і традиційним MIG/MAG: навіть якщо швидкість зварювання відрізняється помірно, різниця у брызках, рівні браку, потребі в шліфуванні та виправленні деформацій радикально змінює вихідну продуктивність дільниці [32–36]. Крім того, зменшення тепловкладення знижує енерговитрати на одиницю продукції та теплове навантаження на оснастку, що підвищує надійність обладнання в серійному режимі.

Зв'язок продуктивності, якості шва та довговічності деталей у випадку тонколистового нержавіючого зварювання має прямий причинно-наслідковий характер. Підвищення продуктивності шляхом збільшення струму або зменшення часу перебування дуги над ділянкою без збереження стабільності перенесення збільшує ризик локальних дефектів і деформацій. Дефекти геометрії шва, такі як підріз, нерівномірне підсилення чи місцеві пропали, створюють концентрації напружень і погіршують втомну міцність, а перегрів і грубіший тепловий цикл

можуть знижувати корозійну стійкість зони термічного впливу [31]. З іншого боку, технологія, що зменшує бризки й стабілізує тепловклад, знижує ймовірність дефектів, спрощує забезпечення вимог за рівнями якості, прийнятими у нормативних документах для зварних з'єднань, та скорочує обсяг контролю і переробок [37–39]. У виробничому сенсі це означає, що СМТ здатний «перетворювати» підвищення стабільності якості на зростання випуску придатної продукції, а не лише на локальне поліпшення зовнішнього вигляду шва.

Інженерний приклад порівняння продуктивності доцільно розглянути для реалістичної складальної деталі, характерної для тонколистових нержавіючих виробів. Нехай виготовляється панель кожуха з AISI 304L товщиною ($\delta = 1,2$) мм для харчового обладнання, де потрібно виконати чотири кутові шви з'єднання панелі з ребрами жорсткості. Загальна довжина зварювання становить ($L = 1,6$) м, тобто 1600 мм. Зварювання виконується в роботизованій комірці; між швами робот здійснює позиціонування та переходи, а після завершення операції деталь проходить візуальний контроль і, за потреби, очищення поверхні шва. Для порівняння приймаються два режими: роботизований СМТ (низькотепловкладний) та традиційний роботизований MIG/MAG у короткодуговому режимі з підвищеним тепловкладом для забезпечення змочування. Для обох варіантів використовується дріт типу ER308LSi діаметром 0,8 мм та газова суміш з низькою активністю, що відповідає рекомендаціям для нержавіючих сталей [31, 38].

Для режиму СМТ приймемо типові значення середніх електричних параметрів ($I_{\text{CMT}} = 85$) А, ($U_{\text{CMT}} = 15,5$) В та швидкість зварювання ($v_{\text{CMT}} = 1,2$) м/хв. Переведення швидкості дає ($v_{\text{CMT}} = 1200$) мм/хв, або 20 мм/с. Для традиційного MIG/MAG приймемо ($I_{\text{MIG}} = 120$) А, ($U_{\text{MIG}} = 18$) В та ($v_{\text{MIG}} = 0,9$) м/хв, що дорівнює 900 мм/хв або 15 мм/с. Різниця більш ніж удвічі означає, що при традиційному режимі очікувано зростуть деформації і ймовірність пропалів на

нестабільних ділянках зазору, а зона термічного впливу буде ширшою, що підвищує ризик погіршення корозійної стійкості у чутливих вузлах [31].

Навіть за помірної різниці в швидкості зварювання основний виграш СМТ формується за рахунок скорочення очищення та зменшення очікуваних переробок. У контексті виробничої надійності це важливо тим, що переробки створюють нерегулярні пікові навантаження на робота, позиціонери й персонал, знижують ритмічність, а також збільшують теплові цикли деталі, погіршуючи стабільність властивостей і геометрії [31, 37–39].

Зниження енерговитрат майже вдвічі корелює зі зниженням тепловкладення та деформацій, а також із меншим тепловим навантаженням на контактні поверхні оснащення та захисні елементи пальника, що опосередковано підвищує ресурс обладнання у серійному виробництві [32–36]. Для тонколистових виробів це має додатковий ефект: зменшення короблення знижує потребу у правці, а відсутність інтенсивного шліфування зберігає пасивний шар нержавіючої сталі, тобто підтримує корозійну стійкість і довговічність вузла [31].

Важливо підкреслити, що перевага СМТ проявляється не автоматично, а за умови коректного налаштування та дисципліни процесу. Низькотепловкладні режими більш чутливі до забруднень кромek, нестабільної подачі дроту, коливань вильоту електрода та витрати газу. У роботизованій комірці це означає необхідність стабільної геометрії пристосування, відтворюваного затиску, а для довгих швів бажаної наявності відстеження стику або компенсації допусків. З точки зору забезпечення якості, вимоги до приймання швів та рівнів допустимих недосконалостей доцільно узгоджувати зі стандартами, що регламентують візуальний контроль і класифікацію дефектів за рівнями якості, оскільки саме ці критерії визначають межу між «прийнятним» і «потрібно переробити», тобто напряду впливають на реальну продуктивність лінії [37–39]. Для тонколистового нержавіючого зварювання, де вимоги до зовнішнього вигляду та чистоти поверхні часто є високими, нижча кількість бризок і більш керований профіль шва у СМТ фактично перетворюються на зниження частки дефектів, які класифікуються як неприйнятні.

РОЗДІЛ II ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Методи дослідження процесів СМТ зварювання

Дослідження процесів Cold Metal Transfer у роботизованому виконанні для тонколистової нержавіючої сталі потребує поєднання електрофізичних, теплотехнічних, металографічних і виробничо-економічних методів, оскільки технологічні переваги СМТ проявляються не лише у формуванні шва, а й у відтворюваності перенесення металу, стабільності тепловкладення, частці переробок і сумарному часі циклу. Тонколистовий аустенітний прокат товщиною 0,6–2,0 мм є чутливим до локального перегріву, прожогів і короблення, а також до окиснення поверхні і втрати корозійної стійкості в зоні термічного впливу, тому методи дослідження мають фіксувати як швидкоплинні явища в дузі, так і інтегральні наслідки у вигляді деформацій, структури та властивостей з'єднання [39–41]. В умовах роботизованого виробництва значущою стає також метрологія процесу, тобто здатність методів забезпечити порівнянність режимів СМТ і традиційного роботизованого MIG/MAG, а також відокремити вплив джерела живлення, траєкторії робота, підготовки крайок і газового захисту від власне ефекту керованого перенесення металу [41, 47].

Методологічно дослідження СМТ доцільно будувати як ієрархію рівнів. На першому рівні фіксують параметри дуги і перенесення металу, тобто струм, напругу, швидкість подачі дроту, частоту і тривалість коротких замикань, характер реверсивного руху дроту та синхронізацію цих подій з переміщенням робота. На другому рівні оцінюють тепловкладення і теплові цикли тонкого листа, оскільки саме вони визначають деформації, ширину зони термічного впливу і ризики сенсibilізації або локального окиснення. На третьому рівні виконують контроль геометрії шва, дефектів і механічних властивостей, формуючи зв'язок між параметрами процесу і показниками якості згідно з нормованими критеріями. На

четвертому рівні оцінюють продуктивність як характеристику виробничого циклу, включно з простоєм, переробками, післяопераційними роботами та енерговитратами, порівнюючи СМТ з традиційним роботизованим MIG/MAG у близьких умовах [42, 47, 48]. Така структура дозволяє уникати типового методичного перекосу, коли продуктивність ототожнюють лише зі швидкістю зварювання, ігноруючи вартість якості та повторюваність.

Для роботизованого СМТ ключовим експериментальним інструментом є високочастотний запис електричних сигналів дуги, оскільки відмінність СМТ від короткодугового MIG/MAG полягає в активному керуванні струмом і механікою перенесення дроту у фазі короткого замикання. Запис струму і напруги з частотою дискретизації, достатньою для розділення коротких замикань і перехідних режимів, дозволяє відновити статистику циклів перенесення, визначити середню та миттєву потужність $P(t) = U(t) \cdot I(t)$, а також оцінити енергію, введену у виріб на одиницю довжини. У порівняльних дослідженнях СМТ і традиційного MIG/MAG принципово важливо розрізняти середні параметри від параметрів пікових, оскільки саме пікові струмові значення визначають інтенсивність розбризкування, перегрів ванни і чутливість до зазору при зварюванні тонкого листа [40, 47]. Практична реалізація цього методу передбачає синхронізацію запису електричних сигналів із даними робота, зокрема з положенням ТСП, швидкістю переміщення і тригерами запалювання та гасіння дуги. У роботизованих системах це досягається через інтерфейси джерела живлення і контролера робота, що дозволяє прив'язати коливання дуги до конкретних ділянок шва, стартових і фінішних зон, а також до змін орієнтації пальника.

Візуалізація перенесення металу, зокрема високошвидкісна зйомка дуги та краплі, доповнює електричні вимірювання і дозволяє інтерпретувати механізми формування дефектів. Для СМТ характерною є менша енергія відокремлення краплі та контрольована взаємодія дроту з ванною, що має відображатися у меншій

амплітуді коливань ванни та нижчій інтенсивності бризкоутворення. Порівняння з традиційним короткодуговим MIG/MAG на основі відеоаналізу дозволяє оцінити частоту викидів металу, стабільність довжини дуги, змочуваність і симетрію формування валика. Для тонколистової нержавіючої сталі ці аспекти важливі не лише для естетики, а й для корозійної довговічності, оскільки бризки і локальні перегріті ділянки формують осередки порушення пасивного шару і потребують додаткової механічної обробки [39, 48]. Методично коректне порівняння передбачає однакову підготовку поверхні, однаковий тип дроту і газового захисту, а також контроль відстані від контактного наконечника до виробу, оскільки зміна вильоту дроту впливає на нагрів дроту і стабільність перенесення.

Оцінювання тепловкладення є центральним методичним блоком, який пов'язує електричні параметри з металургійними наслідками. У прикладних дослідженнях застосовують розрахункове визначення лінійної енергії $q = \eta \cdot U \cdot I / v$, де η інтерпретують як ефективність передачі потужності дуги у виріб, а також експериментальні підходи для уточнення η та теплового балансу [40, 41]. Для тонкого листа корисними є калориметричні методи, наприклад вимірювання тепла, що поглинається водоохолоджуваним калориметром або тепловідвідною пластиною, оскільки вони дозволяють відокремити змінність тепловідведення від змінності режиму перенесення. Для СМТ очікуваним результатом є нижчий ефективний тепловкладення за однакової наплавленої маси, оскільки частина енергії у традиційному MIG/MAG витрачається на розбризкування і перегрів ванни, тоді як СМТ обмежує ці втрати керуванням коротким замиканням [47]. У разі порівняння методів важливо враховувати, що одне лише зниження середнього струму не гарантує зниження пікового нагріву, тому інтегральні теплові оцінки повинні доповнюватися аналізом електричних піків.

Методи реєстрації теплових циклів, зокрема інфрачервона термографія та контактні термопари, застосовують для визначення максимальних температур,

швидкостей охолодження і тривалості перебування матеріалу в критичних інтервалах. Для аустенітних нержавіючих сталей ці параметри важливі з позицій сенсibilізації і формування зон з пониженою корозійною стійкістю, а для тонкого листа вони прямо пов'язані з амплітудою деформацій і схильністю до короблення [39, 41]. Термографія є зручною для роботизованих осередків, оскільки дозволяє аналізувати просторовий розподіл температур та виявляти зони перегріву на старті і фініші шва, де ймовірні прожоги або кратерні дефекти. Контактні термопари, хоча й локальні, забезпечують більш надійне визначення температурних максимумів у заданій точці і придатні для калібрування термографічних вимірювань. Методично важливо враховувати емісійність нержавіючої сталі, яка змінюється з окисненням і забрудненням поверхні, тому при порівнянні СМТ і MIG/MAG необхідно застосовувати однакову підготовку поверхні або використовувати калібрувальні ділянки.

Контроль геометрії шва і виявлення дефектів виконують методами візуального контролю, макрошліфів та вимірювання параметрів провару. Візуальний контроль є базовим для серійного виробництва і стандартизований, що дозволяє порівнювати процеси за одними й тими самими критеріями наявності подрізів, нерівномірності, пористості, кратерів і поверхневих тріщин [42, 43]. Макрошліфи та мікрошліфи застосовують для оцінки глибини проплавлення, ширини зони термічного впливу, симетрії шва та виявлення внутрішніх пор. Для порівняння СМТ і традиційного MIG/MAG для тонкого листа це принципово, оскільки СМТ часто забезпечує достатній провар при нижчій ширині термічного впливу, що зменшує деформації і знижує ризик втрати корозійної стійкості [44, 47]. Методи виконання макрошліфів і критерії оцінювання їх результатів регламентують, що підвищує відтворюваність результатів між різними серіями дослідів [44]. Для роботизованих процесів корисним є також 3D-сканування валика і профілометрія, оскільки вони дозволяють кількісно оцінити повторюваність

висоти і ширини валика, а отже і стабільність перенесення металу, що є однією з ключових переваг СМТ.

Механічні методи дослідження, зокрема випробування на розтяг і згин, а також вимірювання твердості та мікротвердості, застосовують для перевірки того, що зменшення тепловкладення і зміна характеру перенесення металу не знижують несучу здатність з'єднання і не створюють небажаних структурних градієнтів. Для тонколистової нержавіючої сталі особливе значення мають випробування на згин, оскільки вони чутливі до поверхневих дефектів та до локальних зон крихкості, а також вимірювання твердості в зоні термічного впливу, що може відображати явища локального зміцнення або структурної неоднорідності [45, 46]. У порівнянні СМТ і MIG/MAG доцільно контролювати розкид твердості та наявність локальних максимумів, оскільки підвищена неоднорідність часто корелює з більшою чутливістю до втоми. У випадках, коли зварні тонколистові деталі працюють у режимі циклічних навантажень або вібрацій, методи втомних випробувань і оцінювання чутливості до концентраторів напружень стають визначальними для обґрунтування переваг технології з позицій довговічності [39, 48]. Для нержавіючих сталей також актуальні корозійні випробування або принаймні оцінювання стану поверхні, оскільки вибір режиму зварювання може змінювати інтенсивність окиснення, що впливає на пасивацію і подальшу експлуатацію.

Окремим класом методів є дослідження залишкових напружень і деформацій, які для тонкого листа часто стають головним фактором відмов за геометричними допусками у складальних вузлах. У роботизованих дослідженнях застосовують лазерне сканування геометрії до і після зварювання, цифрову кореляцію зображень для вимірювання полів деформацій, а у спеціалізованих випадках рентгенівську дифракцію або метод свердління для оцінки напружень. Порівняння СМТ і традиційного MIG/MAG за деформаціями повинно виконуватися при однаковому закріпленні та однаковій послідовності накладання швів, оскільки технологічна

оснастка і порядок проходів для тонколистової сталі можуть змінити деформації не менше, ніж сам режим перенесення металу [41, 48]. Методично коректним є введення показників інтегральної деформації, наприклад максимального прогину або середньоквадратичного відхилення поверхні, які можна прямо пов'язати з потребою у правці та, відповідно, з непродуктивними витратами часу.

Чисельне моделювання є важливим доповненням до експерименту, оскільки дозволяє інтерпретувати причинно-наслідкові зв'язки між режимом дуги, тепловими циклами і деформаціями, а також виконувати параметричні дослідження без надмірної кількості натурних проб. Для тонколистової нержавіючої сталі найпоширеніші скінченно-елементні моделі теплопровідності та термомеханіки, в яких джерело тепла задається у вигляді розподіленої функції, каліброваної за виміряними тепловими циклами і параметрами провару [40, 41]. Для порівняння СМТ і MIG/MAG такі моделі корисні тим, що дозволяють перевести різницю в електричних сигналах у різницю в ефективному тепловкладенні, а потім у прогноз деформацій і напружень. Обмеженням є те, що спрощене подання джерела тепла не описує детально перенесення краплі, однак для інженерних оцінок деформацій тонкого листа калібрована теплова модель є достатньо інформативною. У виробничих дослідженнях доцільно застосовувати моделювання як інструмент оптимізації послідовності швів, закріплення і швидкості охолодження, що у сукупності з режимом СМТ може забезпечити максимальний ефект від зниженого тепловкладення.

Порівняння методів оцінки продуктивності СМТ і традиційного роботизованого MIG/MAG повинно враховувати, що продуктивність для тонколистової нержавіючої сталі є багатокомпонентною величиною, яка залежить від часу дуги, швидкості, кількості переробок, післяопераційних робіт і енергоспоживання. Найбільш надійним є підхід, який базується на декомпозиції виробничого циклу на часи позиціонування, запалювання, зварювання, переходів,

завершення дуги та дій після зварювання. Для роботизованих осередків така декомпозиція виконується на основі логів контролера робота і джерела живлення, де фіксують події старту і стопу дуги, швидкість переміщення, активні програми і технологічні затримки. Методично важливо обчислювати не лише середній час циклу, а й варіативність, оскільки нестабільність процесу в тонкому листі проявляється у випадкових паузах через спрацювання контролю вакууму газового захисту, у повторних проходах або в ручних втручаннях для усунення дефектів. У цьому сенсі СМТ часто дає перевагу саме через зниження розбризкування і частки прожогів, що зменшує як середній час, так і розкид, забезпечуючи більш передбачуваний такт лінії [47, 48].

Кількісна оцінка продуктивності може бути виражена через випуск виробів N за зміну або годину, що обчислюється як $N = 3600/t_{\text{ц}}$ для годинної продуктивності, де $t_{\text{ц}}$ є середній повний час циклу. Проте для коректного порівняння СМТ і MIG/MAG слід вводити поправки на якість, оскільки вироби, що потребують переробки або додаткового очищення, фактично знижують ефективний випуск. Методично обґрунтованим є використання показника ефективної продуктивності $N_{\text{еф}} = N \cdot (1 - p_{\text{б}})$, де $p_{\text{б}}$ є частка браку або переробок за заданими критеріями якості. Для тонколистової нержавіючої сталі $p_{\text{б}}$ істотно залежить від стабільності перенесення і чутливості режиму до зазору, тому методи оцінювання мають включати статистику дефектів за стандартизованими рівнями якості і протоколами візуального контролю [42, 43]. Саме тут проявляється різниця методів дослідження: якщо оцінювати продуктивність лише за швидкістю переміщення пальника, СМТ може здаватися порівняним із традиційним режимом; якщо оцінювати за повним циклом, включно з переробками і післяопераційними роботами, перевага СМТ у тонколистовому виробництві зазвичай зростає [47, 48].

Окремою складовою порівняння продуктивності є енерговитрати та витрати матеріалів, які визначають економічну ефективність технології. Для коректної

оцінки застосовують енергометри для електричної частини та вимірювання витрати стисненого повітря, якщо система охолодження або допоміжні пристрої є пневматичними. У випадку дугового зварювання доцільно використовувати інтегральну енергію $E = \int U(t) \cdot I(t) dt$ за час горіння дуги, що дозволяє порівняти реальне енергоспоживання для СМТ і MIG/MAG, а також співвіднести його з введеним теплом і результатами деформацій [40, 47]. Матеріальні витрати оцінюють через коефіцієнт наплавлення, тобто відношення маси наплавленого металу до маси поданого дроту, що у традиційних режимах знижується через розбризкування. Для СМТ очікуваним є вищий коефіцієнт наплавлення та менший обсяг бризок, що прямо зменшує витрати на очищення і ризик поверхневих дефектів, які можуть впливати на корозійну довговічність [39, 47]. У методичному плані це означає, що оцінка продуктивності повинна включати вимірювання або хоча б обґрунтовану оцінку втрат металу на бризки та часу, необхідного для їх видалення.

Порівняння методів дослідження продуктивності також стосується вибору рівня деталізації. Для оперативного контролю у виробництві застосовують прості показники, наприклад час дуги, час циклу і частку відхилень за візуальним контролем, тоді як для досліджень і впровадження технології доцільні розширені методи, що включають аналіз причин відхилень і статистичне моделювання. У роботизованому СМТ це може бути кореляція між ознаками нестабільності дуги у записах струму і напруги та появою конкретних дефектів у шві, що дозволяє побудувати превентивні критерії зупинки або адаптації параметрів. Для традиційного MIG/MAG подібні підходи також застосовні, але чутливість короткодугового процесу до випадкових змін зазору і забруднення поверхні часто підвищує частку неврахованих факторів, що погіршує прогнозованість [40, 41]. Відповідно, методи дослідження СМТ мають виразну перевагу, коли їх

використовують як основу для цифрового моніторингу і відтворюваного керування якістю у серійному виробництві.

2.2. Зміна структурного стану нержавіючої сталі при зварюванні та деформації в процесах СМТ зварювання тонколистової сталі

Тонколистова нержавіюча сталь типу AISI 304, 304L або 316 є базовим матеріалом для резервуарів, теплотехнічного обладнання, харчової та фармацевтичної промисловості, де конструкції часто мають невелику товщину стінки, проте високі вимоги до стабільності розмірів, корозійної стійкості та втомної довговічності. При традиційному дуговому зварюванні MIG/MAG або GTAW для таких виробів ключовою проблемою стає поєднання значних локальних тепловкладень, широкої зони термічного впливу та високих розтягувальних залишкових напружень, що призводить до викривлень, втрати геометричної точності і зниження ресурсу [39; 40]. У цьому контексті процес Cold Metal Transfer розглядають як одну з основних технологій зварювання з мінімальним тепловкладенням, здатну суттєво обмежувати ширину зони термічного впливу, зменшувати деформації і контролювати впливати на структурний стан нержавіючих сталей [41; 42].

Аустенітні нержавіючі сталі, які належать до системи Fe-Cr-Ni, у вихідному стані мають однорідну аустенітну структуру з невеличким вмістом δ -фериту, що формується для підвищення стійкості проти гарячих тріщин у зварному металі [43]. При дуговому зварюванні відбувається послідовність фазових перетворень: у зоні зварного металу формується литий аустеніт з дендритною або клітинною структурою та включеннями δ -фериту, у зоні термічного впливу спостерігаються перегрів, ріст зерна, виділення карбідів хрому по межах зерен, а при тривалих високотемпературних витримках можливе формування σ -фази [44; 45]. Високе тепловкладення та повільне охолодження сприяють інтенсивній дифузії вуглецю і

хрому, що приводить до локального збіднення меж зерен хромом і зниження корозійної стійкості у середовищах з хлоридною активністю. Для тонколистової сталі, де співвідношення площі нагріву до маси металу є дуже високим, ці процеси йдуть особливо інтенсивно, що посилює ризики міжкристалітної корозії та деформацій.

СМТ відрізняється від традиційного короткодугового GMAW керованим режимом переносу металу, при якому після виникнення короткого замикання джерело зварювального струму активно зменшує струм і одночасно механічно відтягує дріт назад, відокремлюючи краплю з мінімальним тепловим внеском у ванну [41; 46]. Це забезпечує низьке середнє значення струму і лінійної енергії, стабільний переніс металу без брызг і можливість роботи з тонкими листами без пропалів. Результатом є суттєве зменшення ширини зони термічного впливу та максимальних температур у приповерхневих шарах. Експериментальні дослідження показують, що при переході від традиційних режимів MIG/MAG до СМТ ширина зони термічного впливу в нержавіючих сталях зменшується приблизно на 30–50 %, а середній розмір зерна у зоні перегріву стає істотно меншим, що позитивно впливає на втомну довговічність [42; 47].

Особливістю тонколистової нержавіючої сталі є висока чутливість до деформацій вигину, хвилястості та кручення під впливом нерівномірного нагріву й охолодження. При зварюванні одна частина листа нагрівається до температур близьких до температури плавлення, розширюється і потім стає жорсткою після кристалізації, тоді як холодніші зони обмежують її вільне стиснення. Це формує поле власних напружень із значними розтягувальними компонентами в зоні шва та стискальними у віддалених областях [39; 48]. Для традиційних режимів MIG/MAG характерні лінійні енергії порядку 0,6–1,0 кДж/мм, що для листів товщиною 1–2 мм приводить до помітного прогину, утворення хвилі та потреби у трудомісткій механічній правці. Зменшення тепловкладення у СМТ приблизно удвічі знижує

величину тимчасового теплового розширення, а отже і рівень залишкових деформацій, що підтверджується як експериментальними вимірюваннями, так і результатами числового моделювання [41; 49].

Структурні зміни при зварюванні нержавіючої сталі у режимі СМТ мають низку важливих відмінностей. Низька лінійна енергія та скорочений час перебування в небезпечному інтервалі температур 500–800 °С обмежують виділення карбідів хрому і утворення σ -фази, що сприяє збереженню корозійної стійкості у зоні термічного впливу [44; 50]. У зварному металі кількість δ -фериту залишається в межах, достатніх для запобігання гарячим тріщинам, але його морфологія стає більш дисперсною, без великих витягнутих колонок, які є концентраторами напружень. За рахунок низької теплової навантаженості і високої стабільності дуги формується рівномірний дрібнозернистий литий аустеніт з незначними мікропорами. У порівнянні з традиційним GMAW з високим тепловкладенням, СМТ демонструє менше зміцнення в зоні термічного впливу і нижчий рівень жорстких розтягувальних залишкових напружень, що позитивно позначається на стійкості проти холодних тріщин і втомного руйнування [42; 51].

Деформаційна поведінка тонколистової нержавіючої сталі при зварюванні значною мірою визначається співвідношенням між лінійною енергією процесу і жорсткістю елемента. Для якісної оцінки впливу процесу СМТ на деформації розглянемо стикове з'єднання двох листів AISI 304 товщиною $t = 1,5$ мм, шириною $b = 200$ мм та довжиною шва $L = 500$ мм, що є типовим для панелей корпусних конструкцій. Для традиційного режиму MIG/MAG приймемо зварювальний струм $I_1 = 160$ А, напругу $U_1 = 19$ В, швидкість зварювання $v_1 = 6$ мм/с, для СМТ – $I_2 = 110$ А, $U_2 = 16$ В, $v_2 = 8$ мм/с. Лінійну енергію процесу можна оцінити за формулою $q_l = U \cdot I \cdot \eta / v$, де η – коефіцієнт корисної дії дуги, який для GMAW у захисних газах можна прийняти $\eta \approx 0,8$ [41; 44].

Для традиційного режиму MIG/MAG отримаємо $q_{л1} = 19 \cdot 160 \cdot 0,8/6 \approx 2432/6 \approx 405$ Дж/мм, що відповідає приблизно 0,405 кДж/мм. Для СМТ $q_{л2} = 16 \cdot 110 \cdot 0,8/8 = 1408/8 = 176$ Дж/мм, тобто близько 0,176 кДж/мм. Таким чином, лінійна енергія при СМТ приблизно у 2,3 раза менша, ніж при традиційному режимі. Якщо припустити, що середня максимальна температура в зоні термічного впливу пропорційна відношенню $q_{л}/t$, то відношення пікових температур $\Delta T_1/\Delta T_2$ буде близьким до $405/176 \approx 2,3$. Менший нагрів і менша ширина HAZ безпосередньо зменшують величину тимчасового теплового розширення та амплітуду пластичних деформацій на стадії охолодження.

Для оцінки усадки вздовж шва припустимо, що середня пластична деформація ε_p приблизно пропорційна середньому перепаду температур ΔT та коефіцієнту лінійного розширення α . Для аустенітної сталі $\alpha \approx 16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [43]. Для традиційного режиму MIG/MAG при перепаді температур ΔT_1 , а для СМТ – приблизно удвічі меншому $\Delta T_2 \approx \Delta T_1/2$, отримаємо співвідношення $\varepsilon_{p2} \approx 0,5 \cdot \varepsilon_{p1}$. Поздовжня усадка шва ΔL може бути оцінена як $\Delta L = \varepsilon_p \cdot L$. Якщо для MIG/MAG припустити $\varepsilon_{p1} = 1,5 \cdot 10^{-3}$, що відповідає усадці $\Delta L_1 \approx 0,75$ мм на довжині 500 мм, то для СМТ з $\varepsilon_{p2} \approx 0,75 \cdot 10^{-3}$ отримаємо $\Delta L_2 \approx 0,38$ мм. Така різниця за абсолютним значенням здається невеликою, проте у тонколистовій конструкції вона безпосередньо проявляється як зменшення кутових деформацій та хвилястості панелі приблизно у 1,5–2 рази [48; 49].

Окрім лінійних викривлень, важливим є рівень залишкових напружень. Відомо, що для тонких аустенітних сталей традиційне дугове зварювання формує значні розтягувальні залишкові напруження вздовж осі шва, які можуть наближатися до межі текучості матеріалу при кімнатній температурі [39; 48]. Це знижує стійкість проти локального поздовжнього вигину і сприяє ініціації втомних тріщин у зонах концентрації напружень. При зменшенні тепловкладення в СМТ спостерігають відчутне зниження пікових розтягувальних напружень та вужчу

область їх локалізації. Експериментальні вимірювання методом отвору, рентгенівської дифракції та спотворення контуру показують, що зниження лінійної енергії приблизно удвічі може зменшити максимальні залишкові напруження на 30–40 % та відповідно підвищити втомну довговічність шва [42; 48; 51].

З точки зору експлуатаційних властивостей тонколистової нержавіючої сталі особливо критичною є стійкість проти локального розтріскування в корозійно-активних середовищах та втоми при циклічних температурно-силових навантаженнях. Менший розмір зерна у зоні термічного впливу та пригнічений процес утворення карбідів хрому при СМТ сприяють більш однорідному розподілу хрому і відповідно кращій корозійній стійкості, що підтверджується випробуваннями у розчинах хлоридів та результатами електрохімічної поляризації [44; 50]. У зварному металі СМТ, завдяки дрібнозернистій аустенітно-феритній структурі та меншій пористості, спостерігають підвищену втомну міцність порівняно з традиційними режимами. Для тонких швів це означає більший ресурс при циклічному навантаженні, характерному для резервуарів, теплообмінників та елементів машин з вібраційними впливами.

Окремою перевагою СМТ у тонколистовій нержавіючій сталі є зниження потреби в післяопераційній механічній обробці. Завдяки мінімальній кількості брызг, рівномірному профілю валика і зменшеним деформаціям значно скорочується обсяг шліфування, правки та рихтування, що зменшує концентрації напружень від локальної механічної дії та додатково підвищує ресурс конструкції [41; 47]. Це безпосередньо пов'язує продуктивність СМТ, якість шва і довговічність деталей: зниження тепловкладення не тільки скорочує деформації, а й зменшує потребу у вторинній обробці, яка часто сама може ініціювати дефекти.

Узагальнюючи, можна відзначити, що зміна структурного стану тонколистової нержавіючої сталі при зварюванні в режимі СМТ істотно відрізняється від традиційних процесів MIG/MAG і GTAW. Поєднання низької

лінійної енергії, керованого переносу металу та вузької зони термічного впливу забезпечує дрібнозернисту структуру, обмежене виділення карбідів хрому, знижені залишкові напруження і менші деформації, що у підсумку підвищує втомну довговічність і корозійну стійкість зварних з'єднань. Натомість традиційні режими при високому тепловкладенні формують широку зону термічного впливу з грубозернистою структурою, високими розтягувальними залишковими напруженнями та значним рівнем деформацій, що потребує додаткових операцій правки і знижує ресурс конструкції. Інженерний приклад розрахунку лінійної енергії та усадки для стикового з'єднання показує, що зменшення тепловкладення приблизно удвічі при переході до СМТ дозволяє істотно зменшити усадку, деформації та рівень залишкових напружень, а отже прямо впливає на надійність експлуатації обладнання.

2.3 Побудова моделі машинного навчання для прогнозування глибини проплавлення при СМТ зварюванні

Для отримання набору даних змінювали зварювальний струм 100, 125, 150, 175А; 16,5–20 В, діаметр дроту 1 мм, витрата газу 18 л/хв ($\text{Ar} + 1\text{--}2\% \text{CO}_2$), довжина дуги – 10-12мм, швидкість зварювання 2-8 мм/с. Замірювали глибину проплавлення. Товщина нержавіючої пластини 3 мм.

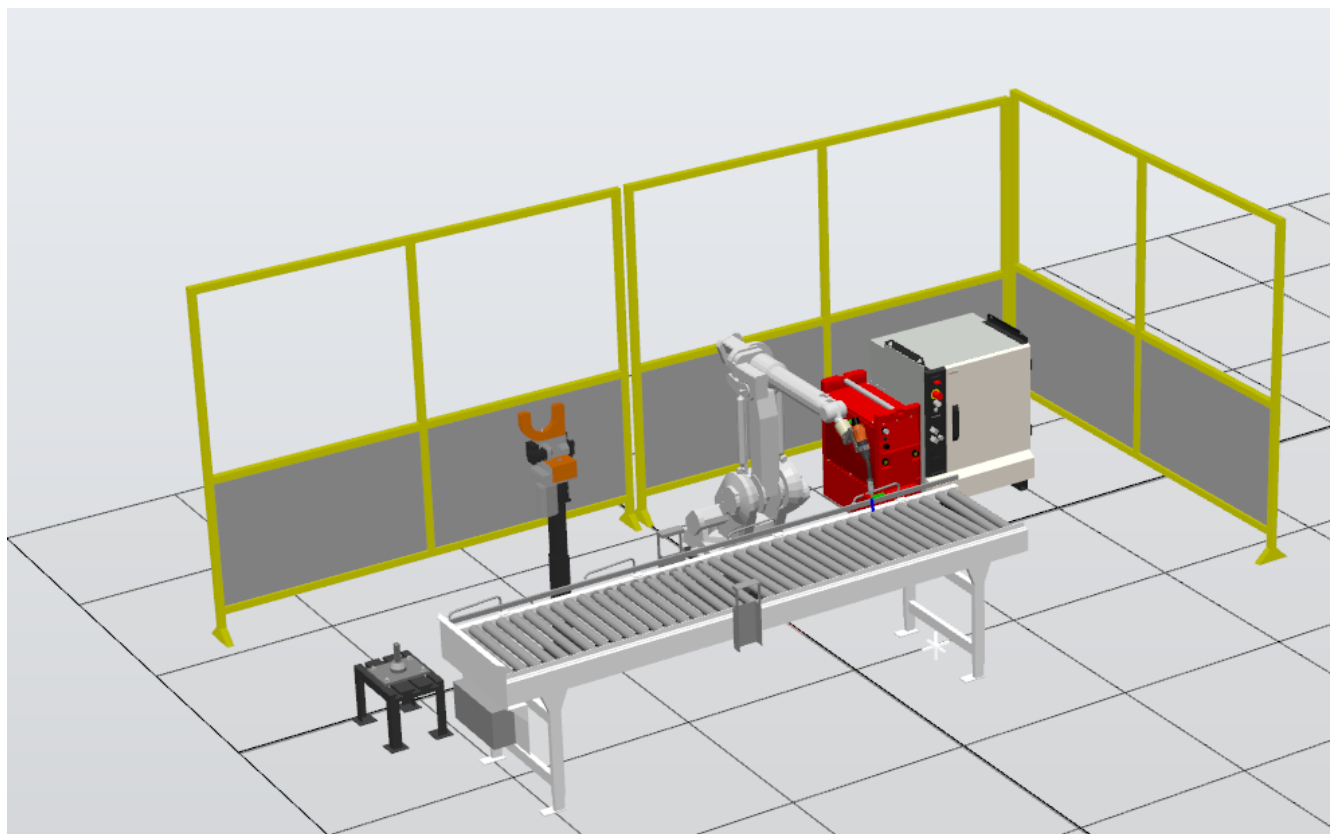


Рисунок 2.1 Загальний вигляд зварювальної комірки СМТ зварювання роботом IRB 1520ID-4-150-02

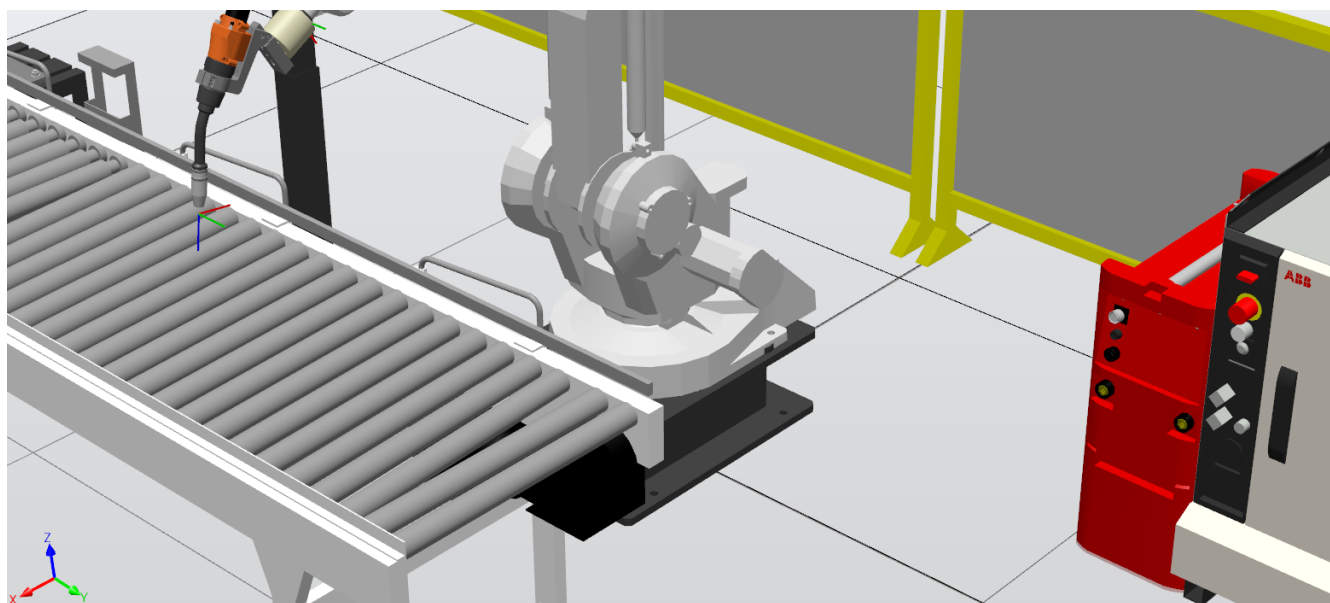


Рисунок 2.2 Загальний вигляд обладнання для СМТ зварювання роботом IRB 1520ID-4-150-02. Джерело живлення Fronius CMT Advanced.

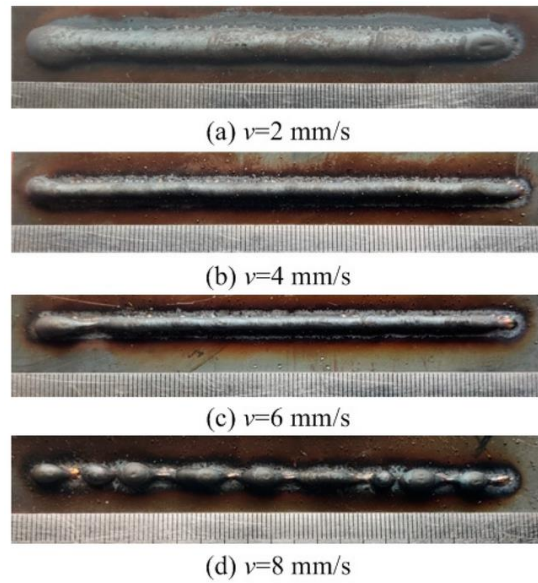


Рисунок 2.3 Зварювальні валики, нанесені СМТ процесом для досліджень

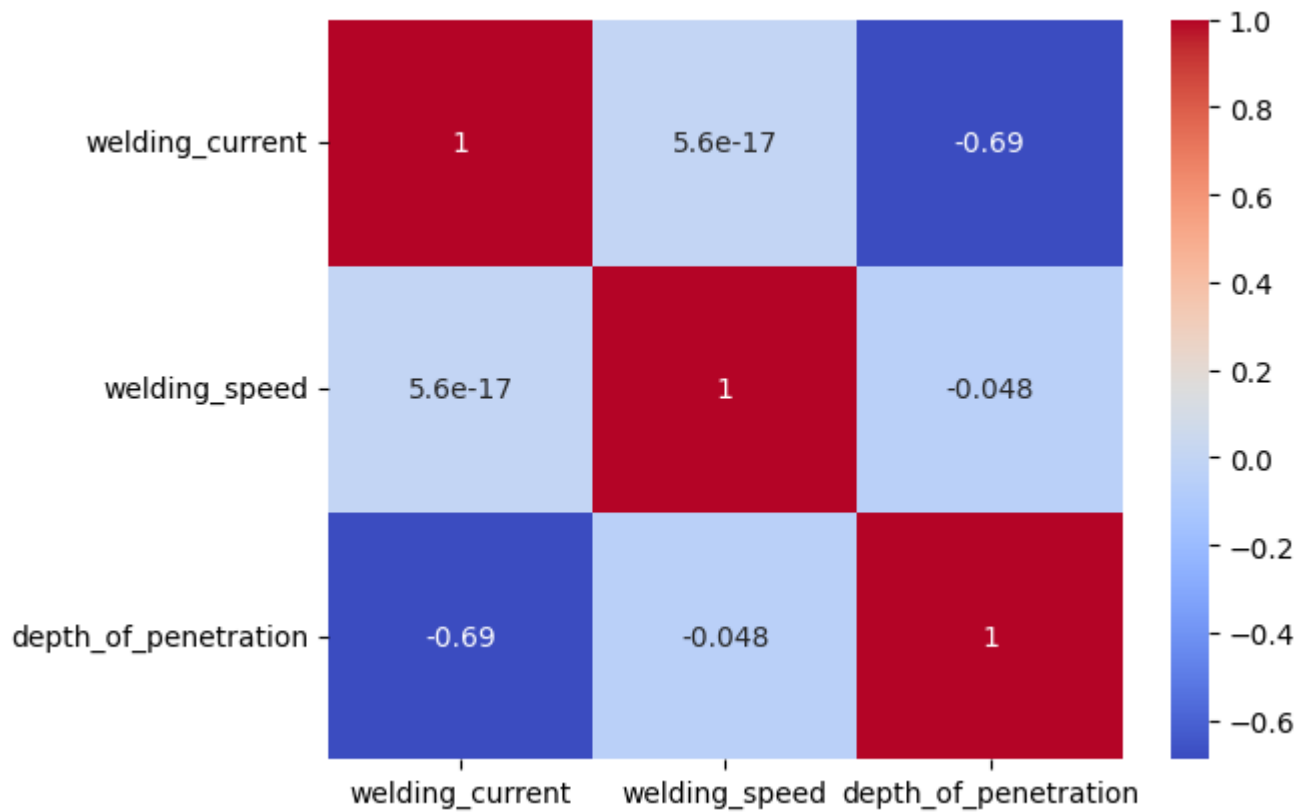


Рисунок 2.4 Матриця кореляцій між показниками зварювальний струм, швидкість зварювання та глибина проплавлення.

Для оцінки використовували 6 моделей регресії: Linear Regression, Polynomial Regression, Ridge Regression (L2), Lasso Regression (L1), Random Forest Regression, XGBoost Regression.

Лінійна регресія розглядає зв'язок між вхідними параметрами та цільовою змінною як лінійну комбінацію ознак. Модель легко інтерпретується, дозволяє однозначно оцінити вплив кожного параметра процесу на результат і швидко навчається навіть на невеликих вибірках. Її ключова перевага – простота, прозорість і можливість отримання аналітичних залежностей для подальшого інженерного аналізу.

Поліноміальна регресія розширює лінійну модель, додаючи степеневі та перехресні члени, що дозволяє описувати суттєво нелінійні залежності між параметрами процесу та вихідною характеристикою. За правильного вибору ступеня полінома вона здатна точно відтворювати криволінійні тренди без переходу до «чорних скриньок». Її головна перевага – гнучкість відображення складних кінематичних і теплових ефектів із збереженням аналітичної форми.

Ridge-регресія (L2-регуляризація) доповнює лінійну модель штрафом за велику суму квадратів коефіцієнтів, зменшуючи їхні абсолютні значення. Це пригнічує нестабільність оцінок за наявності мультиколінеарності та шуму в даних, покращує узагальнювальну здатність моделі на тестових вибірках. Її основна перевага – підвищена стійкість до переобучення при збереженні всіх ознак у моделі.

Lasso-регресія (L1-регуляризація) вводить лінійний штраф за модуль коефіцієнтів, що приводить до їх часткового занулення. Таким чином модель одночасно виконує апроксимацію та відбір найбільш інформативних ознак, спрощуючи структуру й покращуючи інтерпретованість. Її ключова перевага – можливість автоматизованого скорочення розмірності задачі та усунення слабоінформативних параметрів процесу без окремого етапу feature selection.

Random Forest Regression будується як ансамбль великої кількості дерев рішень, що навчаються на випадкових підмножинах ознак і вибірки. Усереднення їхніх прогнозів значно знижує дисперсію та робить модель стійкою до шуму, викидів та локальних нелінійностей. Основна перевага – висока точність і здатність відтворювати складні нелінійні залежності без вимог до попередньої лінеаризації або глибокого препроцесингу.

XGBoost Regression реалізує градієнтний бустинг над деревами рішень з поетапним нарощуванням ансамблю, де кожне наступне дерево компенсує похибки попередніх. Механізми регуляризації, контролю глибини дерев і навчальної швидкості забезпечують баланс між точністю та узагальнювальною здатністю. Її головна перевага – дуже висока прогностична якість для складних, шумних і багатовимірних даних за прийнятних обчислювальних витрат.

	MAE	MSE	RMSE	MAPE_%	R2
Model					
Linear	2.861989	11.631217	3.410457	239.229288	0.464089
Polynomial (deg=2)	0.988130	1.629398	1.276479	108.105110	0.924925
Ridge	2.859947	11.578647	3.402741	240.446275	0.466511
Lasso	2.865024	11.631866	3.410552	239.771522	0.464059
Random Forest	0.194621	0.099962	0.316167	8.288923	0.995394
XGBoost	0.078276	0.017816	0.133478	4.224887	0.999179

Рисунок 2.5 Результати моделювання – показники точності моделей.

У задачі моделювання глибини проплавлення за струмом зварювання та швидкістю переміщення середня абсолютна похибка (MAE) характеризує середню за модулем різницю між розрахунковими та експериментально виміряними значеннями глибини проплавлення. Вона має ті самі одиниці виміру (наприклад,

мм) і відображає типову величину «помилки інженера» при використанні моделі для прогнозу реального процесу.

Середньоквадратична похибка (MSE) є середнім значенням квадратів відхилень розрахункової глибини проплавлення від експериментальної. Через піднесення до квадрату вона сильніше «штрафує» великі промахи моделі, тому є чутливою до поодиноких, але суттєвих помилок у режимах, де, наприклад, поєднуються високий струм та мала швидкість переміщення пальника.

Корінь із середньоквадратичної похибки (RMSE) повертає міру помилки до тих самих одиниць, що й глибина проплавлення, але зберігає посилену вагу великих відхилень. У контексті зварювального датасету RMSE зручно інтерпретувати як типове «середнє квадратичне» відхилення глибини проплавлення, яке безпосередньо співвідноситься з допусками на проникнення шва та вимогами до ресурсної надійності з'єднання.

Середня абсолютна відсоткова похибка (MAPE) показує, на скільки відсотків у середньому модель помиляється відносно фактичної глибини проплавлення. Цей показник є особливо зручним для інженерного порівняння різних регресійних моделей і для формулювання критеріїв точності, наприклад, «допустима середня похибка не більше 5–10 % від номінальної глибини проплавлення».

Коефіцієнт детермінації R^2 характеризує частку варіації глибини проплавлення, яку модель пояснює за рахунок змін сили струму та швидкості переміщення. Значення R^2 , близькі до 1, свідчать, що більшість змін у глибині проплавлення детермінується саме варіаціями режимів зварювання, тоді як низькі значення вказують на необхідність врахування додаткових факторів (наприклад, підготовки крайок, коливальних рухів пальника, стану поверхні).

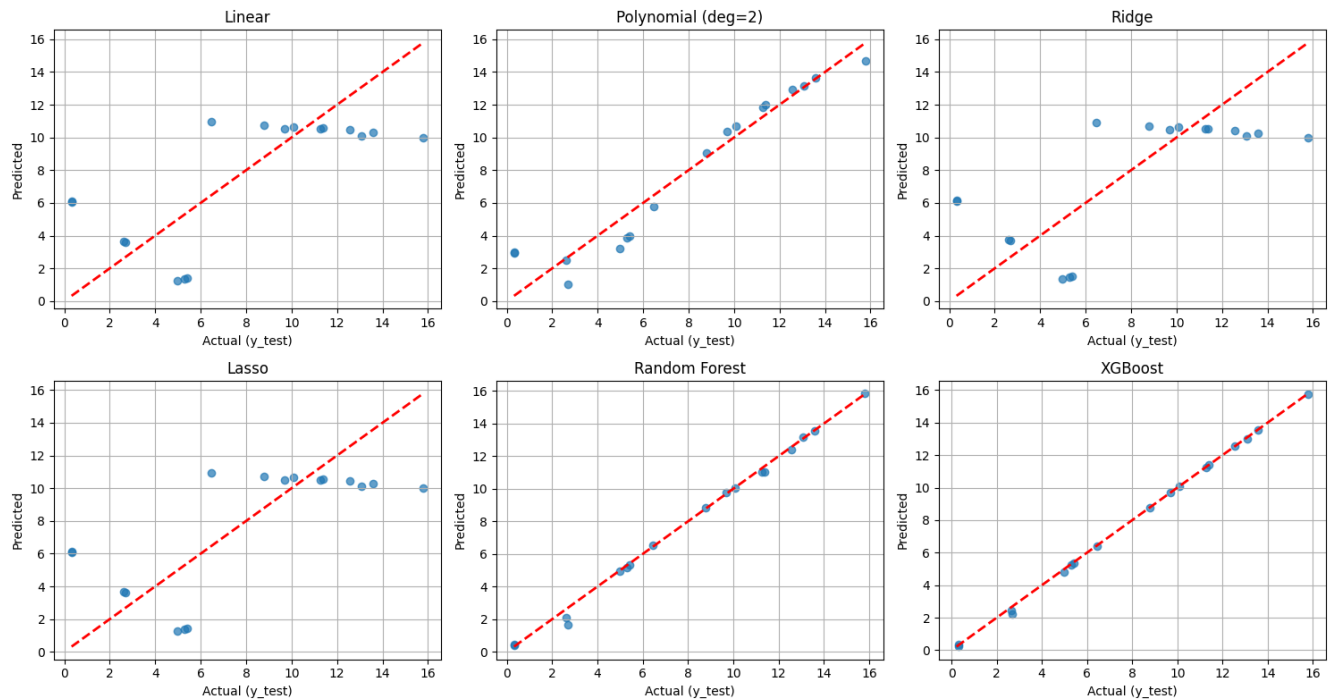


Рисунок 2.6 Графічне представлення точності отриманих моделей.

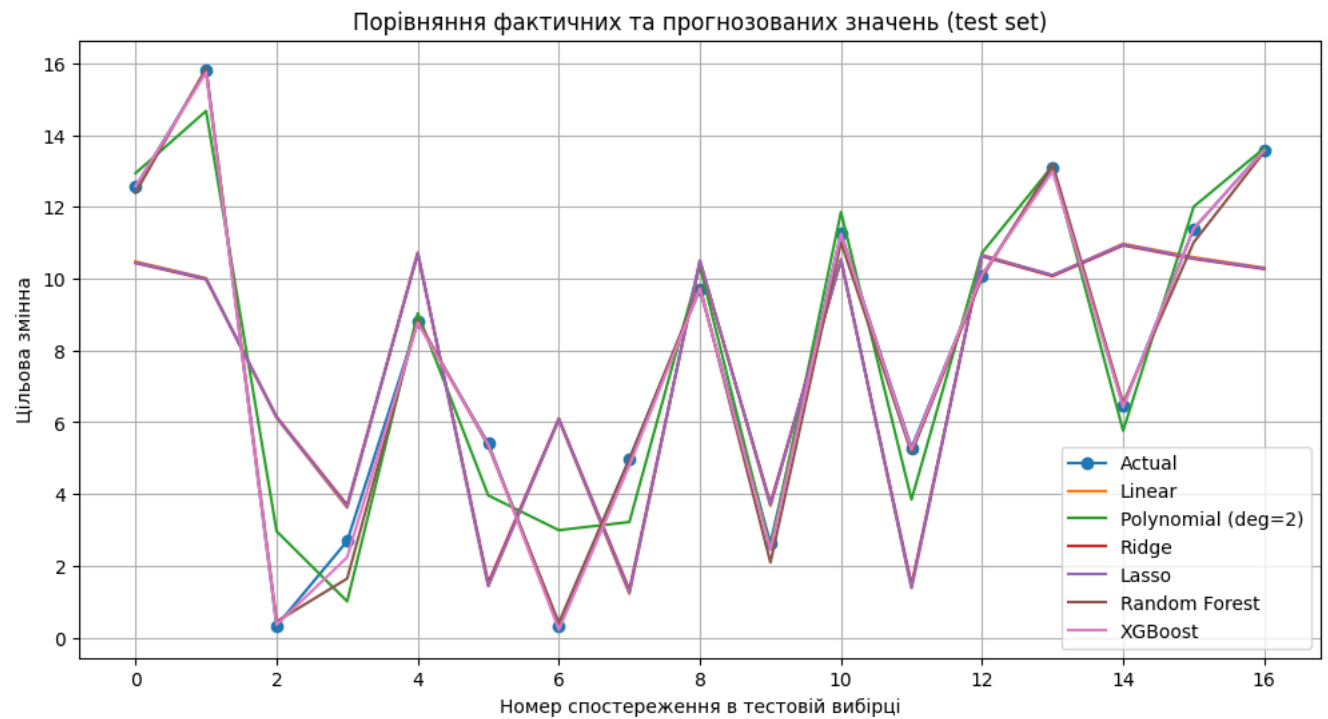


Рисунок 2.7 Фактичні та прогнозовані значення моделей машинного навчання для прогнозування глибини проплавлення зразка товщиною 3 мм

Дерево прогнозу RANDOM FOREST може мати декілька значень прогнозу, тому краще використати XGBOOST для прогнозування

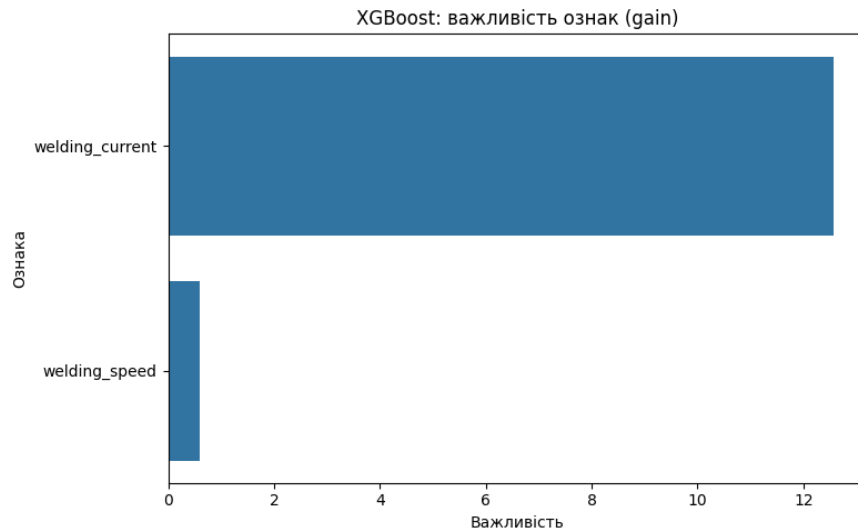


Рисунок 2.8 Важливість ознак XGBOOST

Таким чином сила струму впливає на глибину проплавлення набагато більше ніж швидкість переміщення пальника.

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

3.1. Охорона праці при використанні роботизованого зварювального обладнання для процесу СМТ зварювання

Роботизоване зварювання в середовищі захисних газів з перенесенням металу за схемою Cold Metal Transfer (СМТ) належить до високопродуктивних процесів виготовлення тонколистової нержавіючої сталі та інших матеріалів, у яких стабільність тепловкладення поєднується зі зниженим розбризкуванням і деформаціями. Водночас поєднання джерела дуги, механізмів подавання дроту, багатовісного промислового робота, позиціонерів та допоміжної оснастки формує комплекс небезпек різної фізичної природи, тому охорона праці має розглядатися як інженерна функція системної інтеграції. Базовою методологією виступає оцінювання ризиків із подальшим зниженням їх до прийнятного рівня шляхом конструктивних рішень, технічних засобів безпеки та організаційних процедур, що відповідає загальним принципам безпечності машин [67].

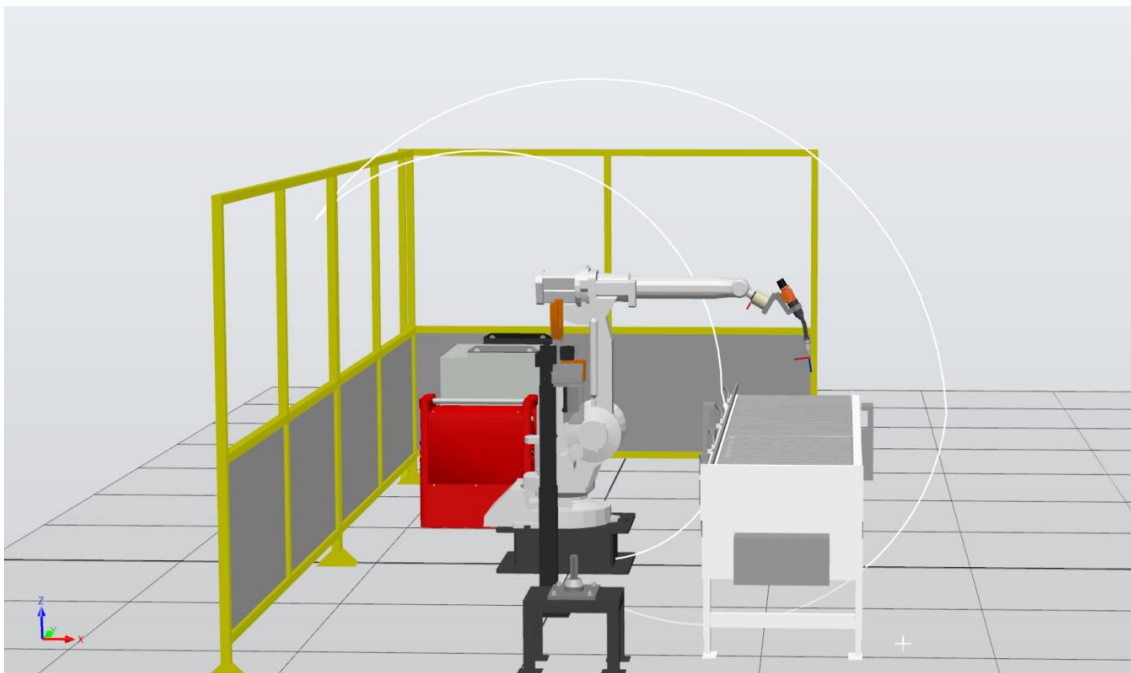


Рисунок 3.1 Робоча зона використання зварювальної комірки

Визначальною особливістю СМТ є кероване короткозамикальне перенесення з активним реверсом дроту в момент відриву краплі, унаслідок чого дугова потужність і середня погонна енергія зменшуються порівняно з класичним короткозамикальним та імпульсним MIG/MAG, а також істотно знижується маса бризок і інтенсивність післяопераційного зачищення. Зменшення розбризкування має прямі наслідки для охорони праці, оскільки знижується ймовірність опіків від крапель розплаву та ризики займання від гарячих частинок у зоні шва; одночасно стабілізація перенесення сприяє кращій відтворюваності, зменшує частку переробок і знижує сумарний час перебування персоналу в небезпечній зоні під час переналагодження та контролю. Разом із тим СМТ не усуває ключових небезпек дугового процесу, а саме оптичного випромінювання, токсичних компонентів аерозолю та газів, електричних ризиків, термічних уражень від гарячих поверхонь і механічних ризиків, пов'язаних із рухом робота та периферійних осей [64–65].

У роботизованій комірці основними механічними небезпеками є зіткнення людини з роботом або затиснення між рухомими елементами, включно з інструментом, пальником, тримачами деталей і позиціонерами. Імовірність травм визначається не лише швидкістю та масою ланок, а й кінематикою траєкторій, наявністю сліпих зон та сценаріями доступу під час навчання, налагодження і технічного обслуговування. Стандарти з безпеки промислових роботів регламентують вимоги до інтеграції роботизованих систем, вибору захисних огорожень, керування режимами та організації безпечного доступу до комірки, оскільки саме етапи програмування і сервісних робіт статистично формують підвищений ризик [64–65]. Причинно-наслідковий зв'язок у цьому випадку полягає в тому, що зростання частки ручного втручання через нестабільність процесу або часті переробки збільшує експозицію оператора до рухомих елементів; відповідно, технологічна стабільність СМТ здатна опосередковано знижувати травмонебезпечність за рахунок зменшення потреби у вході в клітку.

Електробезпека при СМТ та традиційному MIG/MAG має спільну природу, оскільки джерело живлення дуги, високі струми, наявність вологих або металевих контактів і ризик пошкодження ізоляції формують умови для ураження електричним струмом. Для роботизованих систем критичною є інтеграція електрообладнання відповідно до вимог безпечної електроінженерії машин, зокрема коректне заземлення, розділення силових і сигнальних контурів, захист від коротких замикань, а також забезпечення безпечного вимкнення під час аварії та обслуговування [69]. У практичному вимірі це означає, що навіть за меншого тепловкладення СМТ неприпустимо знижувати увагу до стану кабель-пакетів, з'єднань пальника, контактних наконечників і ізоляційних елементів, оскільки деградація ізоляції під дією температури, бризок або механічного тертя призводить до зростання ризику пробою та небезпечних потенціалів.

Оптичні та термічні фактори при СМТ мають принципову схожість із MIG/MAG, оскільки дуга генерує інтенсивне ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання, здатне викликати ураження органів зору і шкіри, а також озон та оксиди азоту як вторинні продукти фотохімічних процесів. Зменшення середньої потужності дуги в СМТ може знижувати загальну теплову емісію та частину випромінювання, проте для тонколистових нержавіючих сталей часто застосовують режими з достатньою щільністю струму для забезпечення формування шва без непровару, тому оптичний захист залишається обов'язковим. У роботизованій комірці пріоритет має інженерна ізоляція безпеки, тобто використання стаціонарних або мобільних екранів та завіс, які забезпечують захист персоналу, що перебуває поза коміркою, від розсіяного випромінювання і відблисків [71]. Внаслідок цього знижується імовірність випадкового “спостереження” дуги сторонніми працівниками, що є типовою проблемою в цехах із кількома роботизованими постами.

Аерозоль та гази при зварюванні є одним із найбільш значущих ризиків довгострокової дії, і порівняння СМТ з традиційним MIG/MAG доцільно виконувати через фізику утворення частинок. У MIG/MAG значна частина аерозолі пов'язана з випаровуванням металу у зоні дуги та з перенесенням дрібних крапель бризок, які охолоджуються і формують твердий пил. У СМТ кероване короткозамикальне перенесення з мінімізацією бризок зменшує частку твердих частинок, що корелює зі зниженням забруднення робочої зони та обсягів прибирання, а також із нижчою ймовірністю вторинного пиління при механічній обробці поверхні. Разом із тим на утворення озону впливає насамперед ультрафіолетова складова дуги та склад газового середовища, тому СМТ не гарантує пропорційного зниження газових компонентів; це пояснює, чому навіть для “холодніших” режимів необхідно проєктувати ефективну місцеву витяжну вентиляцію та контролювати параметри повітрообміну [72]. Стандартизовані методи відбору проб та оцінювання параметрів аерозолі потрібні для валідації інженерних рішень і для доведення, що досягнуто стійкого зниження концентрацій у робочій зоні [72].

Пожежна безпека при роботизованому СМТ має специфічний причинно-наслідковий аспект. Зменшення маси та дальності розльоту бризок, характерне для СМТ, знижує ймовірність займання від гарячих частинок, а також зменшує ризики потрапляння бризок у кабель-канали та на полімерні елементи оснастки. Однак наявність горючих матеріалів у комірці, зокрема шлангів, ущільнень, мастил, пакувальних матеріалів на палетах або залишків розчинників після знежирення, може створювати умови для локального займання навіть за нижчого розбризкування. Тому раціональним є принцип розділення зон: у комірці залишають лише технологічно необхідні матеріали, а засоби пожежогасіння та датчики диму або температури інтегрують із системою зупинки робота і джерела

живлення дуги, щоб аварійний сценарій призводив до швидкого припинення теплогенерації та руху.

Функціональна безпека систем керування є центральним елементом охорони праці в роботизованому зварюванні. У роботі комірки присутні множинні стани: автоматичний цикл, наладка, навчання, ручне переміщення, технічне обслуговування. Перехід між цими станами має супроводжуватися апаратно-програмними блокуваннями, які унеможливають неконтрольований запуск або небезпечну швидкість у режимах, де оператор перебуває близько до робота. Для оцінювання достатності таких рішень застосовують підхід до визначення рівнів продуктивності систем безпеки та побудови архітектури захисних каналів, зокрема для функцій аварійної зупинки, захисної зупинки, контролю огорожень та дозволу руху [68]. У практичному вимірі це означає, що огорожі, двері доступу, світлові бар'єри або сканери повинні бути інтегровані із системою безпеки так, щоб будь-яке порушення периметра приводило до керованого зупинення, а повторний запуск вимагав усвідомленої дії оператора за регламентом.

Порівняння вимог охорони праці для СМТ і “звичайного” роботизованого MIG/MAG доцільно виконувати з позицій джерел небезпек та їх інтенсивності. Традиційний MIG/MAG, особливо в режимах з короткозамикальним перенесенням без активного контролю, характеризується вищою нестабільністю і підвищеним бризкоутворенням, що збільшує ризики опіків, пожежі та потребу в післяопераційному зачищенні. Післяопераційна обробка, у свою чергу, підвищує ризики травм від абразивного інструменту, шуму і пилу та збільшує загальний час експозиції працівника у виробничій зоні. СМТ, навпаки, зміщує акцент від “боротьби з наслідками” до керування параметрами процесу, оскільки стабільність перенесення і нижче тепловкладення можуть зменшувати частоту дефектів і переробок, але водночас підвищують вимоги до точності налаштування траєкторії, стану контактних елементів і стабільності подавання дроту. Причинно-наслідковий

зв'язок тут полягає в тому, що при зниженні тепловкладення зростає чутливість до відхилень зазорів, виносу дроту та динаміки руху; отже, зростає ймовірність втручання персоналу у разі “дрібних” збоїв, якщо система моніторингу та профілактики побудована недостатньо.

Суттєвим елементом сучасних роботизованих комплексів є моніторинг процесу та технічного стану, який має прямий вплив на охорону праці. Для СМТ характерна інтенсивна динаміка подавання дроту, що забезпечує контроль відриву краплі; це підвищує важливість справності механізму подавання, стану роликів, наявності буферів дроту та контактної системи. Погіршення контакту або знос наконечника призводять до нестабільності дуги, локального росту розбризкування та ризиків неочікуваних спалахів і відхилень дуги, що небезпечно під час наладки та випробувань із відкритими огороженнями. Технічні матеріали виробників підкреслюють, що переваги СМТ у вигляді значного зменшення бризок і тепловкладення досягаються за умови правильної конфігурації системи, узгоджених витрат газу і стабільного дротоподавача; інакше технологічна перевага зменшується, а обсяг ручних втручань зростає [73]. Саме тому інженерна логіка охорони праці включає превентивне обслуговування як інструмент зниження ризику, а не лише як засіб забезпечення якості шва.

Окремого розгляду потребує питання відмінностей між колаборативними роботами і промисловими зварювальними роботами. Колаборативні роботи спроектовані для взаємодії з людиною за рахунок обмеження сил і потужності, а також реалізації функцій контролю швидкості та відстані. Проте зварювальна дуга створює небезпеки, які не можуть бути нейтралізовані лише обмеженням механічної енергії, оскільки оптичне випромінювання, гарячі поверхні, аерозоль та пожежні ризики залишаються домінуючими. Це означає, що навіть у сценаріях застосування колаборативних систем для зварювання необхідні додаткові бар'єри, екрани, керування доступом і процедурні обмеження, а оцінювання ризиків

повинно враховувати режими колаборації та їх застосовність до конкретного процесу [66–67]. Для промислових зварювальних роботів, навпаки, типовою є концепція відокремленої комірки з жорстким огородженням, де людина не перебуває в небезпечній зоні під час автоматичного циклу, а доступ дозволяється лише у спеціальних режимах з обмеженою швидкістю та дозволом руху.

Проблематика безпечного доступу до комірки безпосередньо пов'язана з ризиком неочікуваного запуску. Під час заміни дроту, сопла, обслуговування пальника, очищення брызок або заміни деталей оснастки персонал працює в зоні досяжності робота і може опинитися в небезпечному положенні при раптовому відновленні руху або подачі енергії. Вимоги до запобігання неочікуваному запуску передбачають технічні та організаційні заходи, які забезпечують стан “безпечної енергії” та контрольоване відновлення роботи лише після завершення обслуговування і підтвердження готовності [70]. У роботизованому зварюванні це має подвійний зміст, оскільки потрібно одночасно контролювати механічний рух робота, подавання дроту, подавання газу та стан джерела живлення дуги; недооцінка будь-якого з цих каналів породжує аварійні сценарії, включно з неконтрольованим запалюванням дуги.

Для забезпечення охорони праці принциповим є правильне проєктування людино-машинних інтерфейсів. Оператор має отримувати однозначні сигнали про стан комірки, готовність до циклу, причини зупинки та умови відновлення роботи. Така прозорість зменшує спокус “обходити” захисти й прискорювати запуск, що є типовим джерелом інцидентів у виробництві. У СМТ цей аспект підсилюється тим, що система часто використовується для тонких матеріалів, де найменші відхилення призводять до прожогу або непровару; унаслідок цього зростає частота коротких зупинок для корекції траєкторії або параметрів. Якщо інтерфейс не підтримує швидку діагностику, оператор збільшує кількість входів у комірку, а отже, і сумарний ризик, пов'язаний із механічними та термічними факторами.

Важливим компонентом охорони праці є технологічна дисципліна щодо газового господарства. Захисні гази та газові суміші у MIG/MAG та СМТ створюють ризики асфіксії при витоках, особливо у погано вентильованих зонах або при роботі в замкнених об'ємах. Додатково існують ризики високого тиску в балонах, механічні травми під час транспортування та пошкодження редукторів. У роботизованих системах доцільно інтегрувати контроль тиску та витрати газу як елемент процесної стабільності, оскільки порушення газового захисту одночасно збільшує дефектність шва і підвищує аерозольне навантаження, що погіршує умови праці. Таким чином, контроль газу виступає спільною технологічною та безпековою функцією.

Охорона праці у роботизованому СМТ має враховувати специфіку підготовки та подавання деталей. Тонколистові заготовки з нержавіючої сталі нерідко мають гострі кромки, мастильні або консервуючі плівки, залишки окалини чи абразивного пилю після різання. Ці фактори формують ризики порізів, дерматологічного подразнення, а також утворення токсичних продуктів при нагріванні забруднень у зоні дуги. Зниження тепловкладення в СМТ не гарантує відсутності розкладу органічних забруднень, тому санітарно-гігієнічні вимоги щодо очищення поверхні та контролю матеріалів підготовки мають прямий вплив на якість повітря у робочій зоні. У цьому контексті інженерна логіка полягає в тому, що “чисті” поверхні знижують нестабільність дуги, зменшують бризкоутворення і, як наслідок, скорочують обсяг ручного доопрацювання, що покращує і продуктивність, і безпечність.

Порівняльно з традиційним MIG/MAG, СМТ зазвичай асоціюється з підвищеною придатністю до тонких матеріалів, де критичною є деформація та корозійна стійкість. Для охорони праці це має непрямий, але суттєвий ефект: менші деформації знижують потребу у правці та механічному виправленні деталей, а отже зменшують важкі ручні операції, які є джерелом м'язово-скелетних ризиків і травм

від інструменту. Одночасно зменшення бризок знижує ймовірність забруднення поверхні нержавіючої сталі частинками вуглецевої сталі та продуктами окиснення, що може впливати на корозійну поведінку, а через збільшення частки браку спричиняти повторні цикли зварювання. Таким чином, технологічні переваги СМТ перетворюються на фактор охорони праці через зменшення повторюваних дій та контактів персоналу з небезпекою.

Практичне впровадження вимог охорони праці доцільно завершувати перевіркою відповідності комірки принципам інтеграції роботизованих систем, де ключовими є коректність огорожень, розміщення аварійних зупинок, логіка режимів роботи, забезпечення безпечної швидкості в режимі навчання, а також наявність зрозумілих інструкцій і маркувань [64–65]. Додатково, з урахуванням колаборативних сценаріїв, необхідно підтверджувати, що обрані режими взаємодії не створюють хибного відчуття безпечності, оскільки для зварювальних процесів домінують небезпеки, не пов'язані з механічною силою робота [66]. На завершення слід підкреслити, що охорона праці в роботизованому СМТ зварюванні є результатом системної узгодженості технологічних параметрів і засобів безпеки: стабільний процес знижує частоту втручань, а технічно коректна комірка мінімізує наслідки неминучих втручань під час наладки та сервісу.

3.2 Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому зварюванні

Процес СМТ є модифікацією дугового зварювання в захисних газах, у якій електроніка джерела керує рухом дроту та струмом таким чином, щоб фазу короткого замикання супроводжувало кероване відведення дроту від ванни. Це забезпечує низьке тепловкладення, зниження розбризкування, кращу керованість перенесення металу та стабільну геометрію шва, особливо при зварюванні тонколистової сталі й комбінації різнорідних матеріалів [59; 60]. Водночас із точки зору безпеки СМТ залишається різновидом дугового процесу з усіма притаманними

йому небезпеками: електрична дуга, ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання, зварювальні аерозолі, ризик займання навколишніх матеріалів, електротравм, опіків та механічних травм при русі робота. Тому вимоги до безпеки в нормальних і надзвичайних умовах формуються у рамках загальної парадигми безпечної машини за ISO 12100, ISO 10218-1/2, ISO 13849-1, IEC 60204-1, доповненої стандартами зварювальних процесів і контролю швів [61–63].

Специфікою промислового роботизованого СМТ-зварювання є глибока інтеграція джерела живлення (типу Fronius TPS/i CMT, TPS 4000 CMT тощо) з контролером робота через польові шини та спеціалізовані інтерфейси. Це дозволяє синхронізувати імпульсні режими, рух дроту, параметри дуги та траєкторію маніпулятора. У нормальних умовах така інтеграція підвищує повторюваність процесу і знижує ймовірність дефектів, пов'язаних із людським фактором. Однак у надзвичайних ситуаціях, пов'язаних із відхиленням параметрів від робочого діапазону (обрив або залипання дроту, втрата захисного газу, відмова охолодження, аномальний струм, зіткнення пальника з деталлю чи оснащенням, відмова затисків, вихід за межі зони доступу людини), саме інтегрований характер системи потребує чітко визначених сценаріїв переходу у безпечний стан. Системи безпеки мають забезпечувати гарантоване відключення енергії дуги (функція Safe Torque Off/категорія зупину 0 або 1 за IEC 60204-1), контрольовану зупинку руху робота в безпечній позиції, збереження притиску деталі для запобігання падінню гарячого виробу та сигналізацію оператору [64; 65].

Порівняно з традиційним короткодуговим або імпульсним MIG/MAG-зварюванням СМТ характеризується нижчим середнім тепловкладенням, більш дрібнокрапельним та керованим перенесенням металу й істотно зменшеним розбризкуванням [66]. Це позитивно впливає на пожежну безпеку: менша кількість бризок зменшує ймовірність займання відкладень пилу, мастил або легкозаймистих матеріалів у зоні зварювання; зниження теплових потоків на огорожувальні

конструкції та кабелі зменшує ризик їхнього перегріву. Проте з погляду нормативної бази СМТ класифікується як дуговий процес у захисних газах, тому принципові вимоги до огороження зони, вентиляції, відведення аерозолів, захисту від електричної дуги, теплового випромінювання та електробезпеки залишаються однаковими для СМТ і традиційного MIG/MAG. Різниця проявляється у деталях: при СМТ допускається зменшення товщини жаростійкого екранування ближніх елементів, спрощення протипожежних заслінок, однак це не скасовує вимоги до відсутності горючих матеріалів у зоні можливого потрапляння бризок, наявності відповідних вогнегасників, сигналізації диму та перегріву [67; 68].

Важливою відмінною рисою СМТ, яка впливає на сценарії надзвичайних ситуацій, є значно більша складність джерела живлення і блоку подачі дроту. В системах СМТ реалізовані високошвидкісні приводи подачі з можливістю реверсивного руху в циклі короткого замикання, складні алгоритми керування струмом і напругою, розширені діагностичні функції. Відмова окремих компонентів (датчиків положення дроту, модулів силової електроніки, системи охолодження) може призвести до нестандартних режимів горіння дуги, стрибкоподібних змін довжини дуги чи повної втрати стабільності процесу. Для того, щоб такі ситуації не переросли у надзвичайні (пожежа, опік персоналу, руйнування оснастки), виробник джерела та інтегратор роботизованого комплексу повинні передбачити функції самодіагностики, блокування запуску при критичних помилках, обмеження струму, а також взаємодію контурів безпеки роботи й джерела живлення. На рівні вимог ISO 12100, ISO 13849-1 і IEC 60204-1 це означає реалізацію безпечних функцій з певним рівнем забезпечення безпеки (PLr/SIL) для ланцюгів аварійного відключення дуги, зупинки руху, контролю охолодження, тиску газу та стану захисних огорож [61; 69].

Порівняння вимог безпеки до СМТ та звичайного роботизованого MIG/MAG-зварювання в надзвичайних умовах доцільно проводити за кількома групами

ризиків: теплові та пожежні, електричні, механічні, аерозольні та організаційні. Для теплових ризиків СМТ має перевагу за рахунок нижчого тепловкладення й розбризкування, що зменшує ймовірність займання та розповсюдження вогню по відкладеннях шламу та пилю на обладнанні. Однак пожежонебезпека все одно залишається високою через тривалу присутність відкритої дуги, нагрівання металу до температур плавлення, наявність конструкцій зі значною теплоємністю й можливість накопичення горючих матеріалів у складальній оснастці. Електричні небезпеки (дотик до частин під напругою, пошкодження ізоляції, помилки заземлення, пробій між корпусами) практично не залежать від типу дугового процесу, тому вимоги ІЕС 60204-1 та відповідних частин стандартів на зварювальні джерела застосовуються однаково як до СМТ, так і до традиційного MIG/MAG. Механічні ризики (зіткнення робота з огорожею, падіння деталі, руйнування пальника, пошкодження шланг-пакета) також мають спільну природу, але в СМТ-осередках часто застосовуються складніші пальникові системи і подовжені шланг-пакети, що підвищує вимоги до захисту від перегину та термічного перевантаження [70].

Ключовий аспект безпеки у надзвичайних умовах – поведінка роботизованого осередку при виникненні небезпечної події. Для промислових роботів, що виконують СМТ-зварювання, ISO 10218-1/2 та ISO 11161 вимагають реалізації функцій аварійної зупинки, захисту при відкриванні дверей, контролю зони досяжності, обмеження швидкості в сервісних режимах, а також блокування небезпечних рухів при відмові сенсорів або контролерів [62; 71]. У надзвичайних ситуаціях (раптовий вхід оператора в клітку, спрацювання датчика диму, падіння тиску газу нижче допустимого, відмова охолодження, неконтрольована траєкторія робота, значне відхилення електричних параметрів дуги від заданих меж) система повинна переходити до безпечного стану, який, залежно від сценарію, може означати: негайне вимкнення дуги і зупинку робота; контрольований відхід

пальника зони контакту; збереження затиску деталі й відключення головних приводів; активацію сигналізації, блокування повторного запуску до з'ясування причин.

Особливої уваги потребує порівняння вимог до безпеки при використанні колаборативних роботів (cobots) та традиційних промислових роботів для СМТ-зварювання. Стандарт ISO/TS 15066 визначає режими колаборативної роботи (обмеження сили/енергії контакту, кероване вручну наведення, моніторинг швидкості та відстані, безпечний контрольований зупин) для задач, де допустимий фізичний контакт людини й робота [72]. Однак СМТ, як і будь-яке дугове зварювання, генерує високі рівні теплового випромінювання, аерозолів та електричної енергії, які несумісні з постійною безпосередньою присутністю людини в зоні дії процесу. Тому навіть у разі використання колаборативного маніпулятора для СМТ-зварювання повноцінна фізична колаборація у фазі горіння дуги, як правило, не допускається; cobot може працювати в «колаборативному» режимі лише на етапах налаштування, навчання траєкторії, прихватки, позиціонування або завантаження/розвантаження виробів, тоді як під час власне зварювання зона має бути огорожена, а доступ – блокований. На відміну від цього, промисловий робот із початку проєкту передбачається для роботи за фізичними бар'єрами (огорожа, світлові завіси, міжзамки), що спрощує дотримання вимог щодо ізоляції людини від небезпечних енергій, але висуває більш жорсткі умови до системи захисту при обслуговуванні [73; 74].

У надзвичайних умовах (пожежа в клітці, сильне задимлення, руйнування газових комунікацій, падіння деталі, обрив пальника) різниця між колаборативними та промисловими системами проявляється насамперед у сценаріях евакуації та доступу рятувальних служб. Для промислового робота пріоритетом є збереження цілісності огорожі та відключення енергій всередині клітки, тоді як для колаборативних систем, які можуть працювати в напіввідкритих робочих

просторах, необхідно додатково враховувати маршрути евакуації людей, що перебувають у безпосередній близькості, та можливість неконтрольованого контакту гарячих деталей з оператором. Це означає, що застосування СМТ разом із cobots потребує особливо ретельного аналізу ризиків, доказу того, що колаборативний режим не використовується під час горіння дуги, і чіткого розмежування зон: зона фізичної взаємодії людини й робота (без дуги) та зона зварювання, яка має характеристики класичної «гарячої» клітки для промислового робота [72].

Ще одним важливим аспектом безпеки у надзвичайних умовах при СМТ-процесі є взаємозв'язок між продуктивністю, якістю шва та експлуатаційною стійкістю обладнання. Висока продуктивність роботизованих ліній, характерна для СМТ за рахунок зростання швидкості зварювання, зниження переробок і обсягу післяопераційної механічної обробки, призводить до зростання сумарного часу, упродовж якого система перебуває в небезпечному стані (дуга горить, деталі нагріті, шланг-пакет під струмом, газ подається). Це означає, що навіть при зниженні інтенсивності окремих ризиків (бризки, теплове навантаження) інтегральний аварійний ризик за час життєвого циклу може залишатися високим, якщо не впроваджено систематичні заходи: регулярне технічне обслуговування, прогнозне обслуговування за станом (наприклад, за показниками стабільності дуги, температурою силових модулів, витратою газу), періодичні перевірки ланцюгів безпеки, навчання персоналу діям у надзвичайних ситуаціях, тренування з евакуації [75].

З позицій інженерії безпеки важливо, щоб процедури дій при надзвичайних ситуаціях були інтегровані в алгоритми керування комплексом. Це включає визначення критеріїв, за якими нормальне відхилення режиму переходить у аварійне (наприклад, перевищення заданої межі напруги дуги, падіння витрати газу, перевищення температури в корпусі джерела, кількість спроб повторного

запалювання дуги за одиницю часу), та прив'язку цих критеріїв до конкретних функцій: попереджувальна сигналізація та перехід у «м'який» аварійний режим (зупинка зварювання, але не всього робота), повна аварійна зупинка осередку, блокування повторного запуску без участі відповідальної особи. У СМТ-системах такі механізми потенційно можуть бути глибше інтегровані завдяки розвинутих діагностичним можливостям джерела живлення, що, за умови коректної реалізації, підвищує рівень керованості ризиків у надзвичайних умовах порівняно з класичними MIG/MAG-системами з більш «простою» електронікою.

ВИСНОВКИ

1. Сучасні технології зварювання з мінімальним тепловкладенням, зокрема роботизоване СМТ, забезпечують суттєве зменшення теплового впливу на конструкцію, зниження деформацій і залишкових напружень, а також скорочення обсягів післяопераційної обробки. При цьому за рахунок належного підбору режимів та інтеграції з роботизованими системами керування досягається порівняна або вища продуктивність у порівнянні з традиційними MIG/MAG режимами, а довговічність і ресурс деталей зростають завдяки покращенню структурного стану металу шва і зони термічного впливу. Інженерні розрахунки тепловкладення та часу циклу показують, що СМТ може забезпечити як скорочення номінального часу зварювання, так і зниження ефективного часу циклу за рахунок зменшення частки браку та переробок, що у комплексі обґрунтовує доцільність його впровадження в роботизовані складально-зварювальні комплекси для машинобудівних конструкцій.

2. Таким чином, суть технології СМТ для нержавіючих тонколистових деталей полягає у керованому короткодуговому перенесенні з активним використанням реверсивного руху дроту, що знижує пікові струми у фазі короткого замикання і забезпечує стабільний відрив краплі при мінімальних бризках та зниженому тепловкладенні. Різновидності СМТ доцільно розглядати як адаптації хвильової форми і циклу перенесення під різні вимоги до змочування, проплавлення та теплового менеджменту, що особливо актуально для тонкого нержавіючого листа з високими ризиками деформацій і металургійної чутливості. Порівняння за інженерним розрахунком часу циклу демонструє, що продуктивність СМТ у роботизованому виробництві зростає насамперед через скорочення післяопераційних робіт і зменшення переробок, а не лише через зміну швидкості зварювання. У підсумку це підвищує довговічність і експлуатаційну надійність деталей за рахунок меншого теплового впливу, стабільнішого профілю шва та

нижчої імовірності дефектів, які є концентраторами напружень або каталізаторами корозійного руйнування.

3. Узагальнюючи, методи дослідження процесів роботизованого СМТ зварювання тонколистової нержавіючої сталі повинні забезпечувати одночасний контроль електричних і механічних аспектів перенесення металу, теплових циклів, геометрії і дефектності шва, а також показників продуктивності повного циклу. Електричний моніторинг високої частоти та високошвидкісна візуалізація дозволяють розкривати механізми стабільності СМТ і причини зниження розбризкування, термографія і термопари пов'язують режим із тепловкладенням і деформаціями, а стандартизовані методи контролю якості та механічних випробувань забезпечують порівнянність результатів і їх інженерну інтерпретацію. Порівняння продуктивності СМТ і традиційного роботизованого MIG/MAG методично коректно виконувати на основі повного часу циклу з урахуванням переробок, післяопераційних робіт, статистики дефектів і енерговитрат, оскільки саме в цих складових для тонкого листа проявляються практичні переваги СМТ у вигляді стабільнішого такту, нижчої частки браку і меншої потреби в механічній доводці шва. Такий комплексний підхід створює підґрунтя для обґрунтованого вибору технології і параметрів роботизованого зварювання з урахуванням якості, довговічності та економічної ефективності виробництва.

4. Побудована модель машинного навчання, яка дозволила прогнозувати шлибину проплавлення з точністю 99%.

5. Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому зварюванні СМТ-процесом базується на поєднанні переваг самого процесу (низьке тепловкладення, контрольоване перенесення металу, зменшене розбризкування) з комплексною реалізацією вимог міжнародних стандартів машинобезпеки та зварювальних стандартів, а також з урахуванням особливостей інтеграції джерела та робота. У порівнянні з традиційним MIG/MAG СМТ створює кращі передумови для

зменшення пожежних ризиків і стабілізації процесу, проте не скасовує необхідності повного огороження зони, реалізації функцій аварійної зупинки, контролю аерозолів та електробезпеки. Використання колаборативних роботів у поєднанні з СМТ можливе лише в строго регламентованих сценаріях, де колаборативний режим не перетинається з фазою горіння дуги, а зона зварювання розглядається як класична «гаряча» зона промислового робота. Саме інтегрований підхід, що пов'язує продуктивність, якість шва, експлуатаційну стійкість і керовані сценарії дій у надзвичайних умовах, є визначальною умовою надійної та безпечної роботи роботизованих СМТ-комплексів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.2017.08.001.
2. Zhou Y., Hu S., Yang L., Wang H. Numerical study on cold metal transfer welding of thin aluminium sheets. *Metals*. 2018. Vol. 8, No. 7. Art. 514. 19 p. DOI:10.3390/met8070514.
3. Bae H. J., Kim Y. M., Rhee S. Cold metal transfer welding of advanced high strength steel sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2016. Vol. 21, No. 2. P. 125–132. DOI:10.1080/13621718.2015.1078811.
4. Pickin C. G., Young K., Price D. A. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2011. Vol. 16, No. 6. P. 504–508. DOI:10.1179/1362171811Y.0000000040.
5. Fronius International GmbH. CMT: Cold Metal Transfer – The Revolution in Welding Technology : technical brochure. Wels : Fronius, 2016. 36 p.
6. Scotti F. M., Teixeira F. R., Silva L. J. et al. Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 57. P. 23–35. DOI:10.1016/j.jmapro.2020.06.007.
7. Arregi B., Tabernero I., Lamikiz A. et al. Assessment of arc welding technologies for wire arc additive manufacturing. *Metals*. 2018. Vol. 8, No. 12. Art. 1061. 20 p. DOI:10.3390/met8121061.
8. Kou S. *Welding Metallurgy*. 2nd ed. Hoboken : Wiley-Interscience, 2003. 461 p.
9. Lancaster J. F. *Metallurgy of Welding*. 6th ed. Cambridge : Woodhead Publishing, 1999. 448 p.

- 10.Маляренко А. М., Квасницький В. В. Технологія зварювання плавленням : підручник. Київ : Ліра-К, 2017. 432 с.
- 11.Lippold J. C., Kotecki D. J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Hoboken : Wiley-Interscience, 2005. 376 p.
- 12.Kou S. Welding Metallurgy. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2003. 461 p.
- 13.Lancaster J. F. Metallurgy of Welding. 6th ed. Cambridge : Woodhead Publishing, 1999. 466 p.
- 14.ISO 5817:2014. Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections. Geneva : ISO, 2014. 38 p.
- 15.ISO 17637:2016. Non-destructive testing of welds. Visual testing of fusion-welded joints. Geneva : ISO, 2016. 20 p.
- 16.ISO 3834-2:2005. Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Part 2: Comprehensive quality requirements. Geneva : ISO, 2005. 16 p.
- 17.EN 1011-3:2000. Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Part 3: Arc welding of stainless steels. Brussels : CEN, 2000. 72 p.
- 18.Fronius International GmbH. Cold Metal Transfer (CMT). The controlled short-circuit process: Technical description. Wels : Fronius, 2018. 24 p.
- 19.Sedriks A. J. Corrosion of Stainless Steels. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1996. 437 p.
- 20.AWS D1.6/D1.6M:2020. Structural Welding Code. Stainless Steel. Miami : American Welding Society, 2020. 224 p.
- 21.Kou S. Welding metallurgy. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2003. 480 p.
- 22.Lippold J. C., Kotecki D. J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels. Hoboken : John Wiley & Sons, 2005. 357 p.

23. Bellamkonda S., Sehra S., Harish N., Shukla D. Cold Metal Transfer Technology: Research Developments. *Materials Today: Proceedings*. 2024. Vol. 113. P. 1141–1148. DOI:10.1016/j.matpr.2024.01.377.
24. Pickin C. G., Williams S. W., Lunt M. J. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211, No. 3. P. 496–502. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2010.11.005.
25. Talalaev R., Veinthal R., Laansoo A., Sarkans M. Cold metal transfer 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.
26. Azar A. S., Niu Y., Li M., Carlson B. E. Heat Source Model for Cold Metal Transfer Welding. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015. Vol. 122. P. 741–746. DOI:10.1007/s10973-015-4710-3.
27. Fronius International GmbH. Cold Metal Transfer technology : brochure. Wels : Fronius International GmbH, 2011. 45 p.
28. ISO 17637:2016. Non-destructive testing of welds. Visual testing of fusion-welded joints. Geneva : International Organization for Standardization, 2016. 10 p.
29. SIST EN 1011-3:2019. Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Part 3: Arc welding of stainless steels. Ljubljana : Slovenian Institute for Standardization, 2019. 11 p.
30. NEN-EN-ISO 5817:2014. Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys. Quality levels for imperfections. Delft : NEN, 2014. 27 p.
31. Norrish J. *Advanced Welding Processes*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1992. 474 p.
32. Kou S. *Welding Metallurgy*. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2003. 461 p.
33. ISO 17635:2016. Non-destructive testing of welds. General rules for metallic materials. Geneva : International Organization for Standardization, 2016.

- 34.ISO 17640:2018. Non-destructive testing of welds. Ultrasonic testing of welded joints. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.
- 35.ISO 17638:2016. Non-destructive testing of welds. Magnetic particle testing. Geneva : International Organization for Standardization, 2016. ISO 17639:2013. Destructive tests on welds in metallic materials. Macroscopic and microscopic examination of welds. Geneva : ISO, 2013. 40 p.
- 36.ISO 9015-1:2011. Destructive tests on welds in metallic materials. Hardness testing. Part 1: Hardness test on arc welded joints. Geneva : ISO, 2011. 24 p.
- 37.ISO 4136:2012. Destructive tests on welds in metallic materials. Transverse tensile test. Geneva : ISO, 2012. 16 p.
- 38.ISO 9606-1:2017. Qualification testing of welders. Fusion welding of steels. Geneva : International Organization for Standardization, 2017
- 39.AWS D1.1/D1.1M:2020. Structural Welding Code. Steel. Miami : American Welding Society, 2020.
- 40.ISO. ISO 10218-1:2025 Robotics. Safety requirements. Part 1: Industrial robots. Geneva : International Organization for Standardization, 2025. 95 p.
- 41.ISO. ISO 10218-2:2025 Robotics. Safety requirements. Part 2: Industrial robot applications and industrial robot cells. Geneva : International Organization for Standardization, 2025. 223 p.
- 42.ISO. ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices. Collaborative robots. Geneva : International Organization for Standardization, 2016. 33 p.
- 43.ISO. ISO 12100:2010 Safety of machinery. General principles for design. Risk assessment and risk reduction. Geneva : International Organization for Standardization, 2010. 77 p.
- 44.ISO. ISO 13849-1:2015 Safety of machinery. Safety-related parts of control systems. Part 1: General principles for design. Geneva : International Organization for Standardization, 2015. 86 p.

- 45.IEC. IEC 60204-1:2016 Safety of machinery. Electrical equipment of machines. Part 1: General requirements. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2016. 277 p.
- 46.ISO. ISO 14118:2017 Safety of machinery. Prevention of unexpected start-up. Geneva : International Organization for Standardization, 2017. 11 p.
- 47.ISO. ISO 25980:2023 Health and safety in welding and allied processes. Transparent welding curtains, strips and screens for arc welding processes. Geneva : International Organization for Standardization, 2023. 15 p.
- 48.ISO. ISO 15011-1:2009 Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling fume and gases. Part 1: Determination of fume emission rate during arc welding and collection of fume for analysis. Geneva : International Organization for Standardization, 2009. 36 p.
- 49.Fronius International GmbH. Cold Metal Transfer (CMT). System description. Wels : Fronius International GmbH, 2011. 45 p.
- 50.Fronius International GmbH. Cold Metal Transfer (CMT) : brochure. Wels : Fronius International GmbH, 2011. 26 p. (Infosolda)
- 51.Fronius International GmbH. Cold Metal Transfer (CMT). The controlled short-circuit process : technical description. Wels : Fronius International GmbH, 2011. 26 p. (Infosolda)
- 52.Fronius International GmbH. CMT Advanced & CMT Pulse : application brochure for robotic welding. Wels : Fronius International GmbH, 2012. 32 p.
- 53.Fronius International GmbH. TPS/i Robotics. The intelligent MIG/MAG welding system for robotic applications. Wels : Fronius International GmbH, 2019. 36 p.
- 54.Talalaeva R. Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet. Estonian Journal of Engineering. 2012. Vol. 18, No. 3. P. 243–250.

55. 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. 494–501.
56. Galloway A. M., McPherson N. A., Cater S. R., Matusiak J. GMAW and CMT welding of dissimilar aluminium–steel joints. *Welding in the World*. 2012. Vol. 56, No. 5–6. P. 64–72.
57. Cary H. B., Helzer S. C. *Modern Welding Technology*. 6th ed. Upper Saddle River : Pearson/Prentice Hall, 2005.
58. Pires J. N., Loureiro A., Bolmsjö G. *Welding Robots: Technology, System Issues and Applications*. London : Springer-Verlag, 2006. 192 p.
59. AWS D16.1M/D16.1:2014. *Specification for Robotic Arc Welding*. Miami : American Welding Society, 2014.
60. ISO 14731:2019. *Welding coordination. Tasks and responsibilities*. Geneva : International Organization for Standardization, 2019.
61. ISO 10218-1:2011. *Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 1: Robots*. Geneva : International Organization for Standardization, 2011.
62. ISO 10218-2:2011. *Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robot systems and integration. Part 2*. Geneva : International Organization for Standardization, 2011.
63. ISO 14120:2015. *Safety of machinery. Guards. General requirements for the design and construction of fixed and movable guards*. Geneva : International Organization for Standardization, 2015.
64. IEC 61508-1:2010. *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Part 1: General requirements*. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2010.

- 65.ISO 14119:2013. Safety of machinery. Interlocking devices associated with guards. Principles for design and selection. Geneva : International Organization for Standardization, 2013.
- 66.ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems. Requirements with guidance for use. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.
- 67.ISO 11161:2007. Safety of machinery. Integrated manufacturing systems. Basic requirements. Geneva : International Organization for Standardization, 2007.
- 68.ISO 17637:2016. Non-destructive testing of welds. Visual testing of fusion-welded joints. Geneva : International Organization for Standardization, 2016.
- 69.International Federation of Robotics. World Robotics 2023. Industrial Robots. Frankfurt am Main : IFR Statistical Department, 2023.