

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 TIG-ЗВАРЮВАННЯ
ЛИСТОВОЇ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ РОБОТИЗОВАНИМ КОМПЛЕКСОМ»

Виконав: студент VI курсу групи Маш-

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

Андрій ЛЯШКО
(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

ЛЯШКО Андрій Борисович

1. Тема роботи: «Обґрунтування параметрів процесу TIG-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 работ: 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 _____ Андрій ЛЯШКО
(підпис)

Керівник роботи _____ Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(підпис)

УДК 621.791.75:669.15-194.56:621.865.8

Обґрунтування параметрів процесу TIG-зварювання листової нержавіючої сталі роботизованим комплексом. Ляшко Андрій Борисович. Кафедра машинобудування. Дубляни, Львівський НУВМБТ. 2025.

82 с. текст. част., 12 рис., 63 літературних джерел.

У кваліфікаційній роботі виконано системний огляд сучасних технологій дугового зварювання тонколистової нержавіючої сталі та нормативних вимог до якості, деформацій і довговічності зварних з'єднань. Проаналізовано обмеження традиційних режимів роботизованого MIG/MAG щодо тепловкладення, залишкових напружень, дефектності та корозійної стійкості у порівнянні з роботизованим TIG зварюванням. Сформульовано науково обґрунтовану мету та завдання щодо підвищення якості й відтворюваності TIG-процесу.

Розроблено та реалізовано комплексну експериментальну методику дослідження роботизованого TIG зварювання тонколистової нержавіючої сталі, що поєднує реєстрацію електричних параметрів дуги, інфрачервону термографію, високошвидкісну відеографію, аналіз геометрії шва, металографію та неруйнівний контроль. Виконано кількісне порівняння впливу режимів TIG і MIG/MAG на лінійну енергію, ширину та стан зони термічного впливу, рівень залишкових деформацій, дефектність і реальну продуктивність роботизованих дільниць.

Отримано нові залежності, що пов'язують параметри режиму роботизованого TIG зварювання з тепловими циклами, структурними змінами, залишковими деформаціями та експлуатаційною довговічністю тонколистової нержавіючої сталі. На цій основі розроблено практичні рекомендації щодо вибору режимів, організації оснастки, послідовності накладання швів.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1. Сучасні технології роботизованого зварювання	10
1.2 . Основи процесу TIG зварювання	19
1.3. Особливості зварювання тонколистової нержавіючої сталі TIG методом – зона термічного впливу, залишкові деформації	25
2 ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ	32
2.1 Сучасні методи дослідження якості зварних швів, отриманих роботизованим TIG зварюванням	32
2.2. Структурні зміни та деформації тонколистових нержавіючих сталей, отриманих роботизованим TIG зварюванням	42
2.3. Моделювання параметрів процесу TIG-зварювання листової нержавіючої сталі роботизованим комплексом	47
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
3.1. Охорона праці при використанні роботизованого зварювального обладнання для процесу TIG зварювання	58
3.2. Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому TIG зварюванні	66
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76

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, керованість тепловкладення та стабільність процесу визначають не лише локальну якість шва, а й можливість забезпечити геометричні допуски, корозійну стійкість і 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. У реальних виробничих умовах «виграш» у швидкості шва нерідко нівелюється додатковими витратами на очищення, правку і ремонт, що ставить під сумнів доцільність використання традиційних режимів MIG/MAG для відповідальних тонколистовових вузлів.

На цьому тлі технологія зварювання неплавким вольфрамовим електродом в середовищі інертного газу (TIG/GTAW) розглядається як базовий процес для тонколистової нержавіючої сталі, орієнтований на забезпечення високої якості шва, мінімальної зони термічного впливу і низького рівня залишкових деформацій. Фізична суть TIG полягає у формуванні стабільної дуги між вольфрамовим електродом і виробом, тоді як присадковий метал, за необхідності, подається окремо. Відсутність короткозамикального перенесення та характерне для TIG розділення функцій «носія струму» і «джерела металу» забезпечують гладкий валик, практично повну відсутність бризок, можливість роботи на малих струмах та тонке дозування теплової енергії. Для нержавіючої сталі це критично з огляду на чутливість до сенсibilізації, гарячих тріщин, зміни пасивного шару та вимог до чистоти поверхні. У роботизованому виконанні переваги TIG підсилюються стабільністю довжини дуги, траєкторії пальника та параметрів імпульсного режиму, а також можливістю інтеграції сенсорних систем супроводу шва.

Разом з тим мінімізація тепловкладення у TIG-процесі не є самоціллю. Надмірне «охладження» дуги і надто консервативні режими можуть призвести до непровару, локальної відсутності сплавлення, нестабільності кореня, формування прихованих дефектів, які істотно знижують втомну міцність і надійність вузлів. Для аустенітних нержавіючих сталей ситуацію ускладнюють металургійні чинники – небезпека сенсibilізації в діапазоні 450–850 °C, необхідність контролю вмісту δ -фериту у металі шва, вплив теплових циклів на структуру γ -аустеніту в зоні термічного впливу та на характеристики пасивного шару. Структурні зміни в ЗТВ і зварному металі безпосередньо пов'язані з залишковими напруженнями та деформаціями тонких панелей, які в свою чергу визначають точність складання, герметичність і втомну довговічність конструкцій. Тому технічні переваги TIG можуть бути повною мірою реалізовані лише за умови науково обґрунтованого підбору режимів, що забезпечують необхідну глибину проплавлення, контрольовану ширину ЗТВ, прийнятний рівень залишкових напружень і стабільний цикл без зростання дефектності.

Сучасний рівень розвитку вимірювальних і діагностичних засобів створює можливості для комплексного аналізу роботизованих TIG-процесів з позицій «від джерела до шва». Високочастотний запис струму та напруги дуги, інфрачервона термографія, високошвидкісна відеографія зони дуги і ванни, 3D-сканування геометрії шва, металографічні дослідження та неруйнівний контроль (візуальний, капілярний, радіографічний, ультразвуковий) дозволяють встановити причинно-наслідкові зв'язки між параметрами TIG, тепловими циклами, формуванням зони термічного впливу, структурним станом металу, залишковими деформаціями та дефектністю з'єднань. Комплексування таких методів із інженерними розрахунками лінійної енергії, часу циклу, енерговитрат і частки переробок створює основу для кількісного порівняння роботизованого TIG із традиційними режимами MIG/MAG саме в умовах тонколистової нержавіючої сталі.

У цьому контексті особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на наукове обґрунтування вибору та оптимізації режимів роботизованого TIG зварювання тонколистової нержавіючої сталі з урахуванням структурних змін, ширини та стану зони термічного впливу, залишкових напружень і деформацій, а також можливостей сучасних методів in-situ і післяопераційного контролю якості. Їхня мета — не лише показати потенціал керованого тепловкладення TIG щодо зменшення деформацій і покращення якості поверхні, а й встановити кількісні критерії впливу режимів TIG на структурно-фазовий стан, корозійну та втомну довговічність зварних з'єднань тонколистової нержавіючої сталі та реальну продуктивність роботизованих дільниць. Отримані результати мають практичне значення для проектування та 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 якості, довговічності й відтворюваності роботизованого TIG зварювання тонколистової нержавіючої сталі

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні технології роботизованого дугового зварювання тонколистової нержавіючої сталі.
2. Розробити й реалізувати комплексну методику експериментальних досліджень роботизованого TIG зварювання тонколистової нержавіючої сталі.
3. Виконати кількісну оцінку впливу режимів роботизованого TIG зварювання.
4. Розробити практичні рекомендації щодо вибору режимів роботизованого TIG.

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, зони термічного впливу, структурного стану.

РОЗДІЛ I. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Сучасні технології роботизованого зварювання

Сучасне роботизоване зварювання у машинобудуванні дедалі частіше орієнтується на виготовлення тонколистової нержавіючої сталі для корпусів обладнання, кожухів, елементів санітарних конструкцій, теплообмінної апаратури та трубопровідної арматури. Для товщин приблизно 0,6–2,0 мм визначальними стають обмеження на тепловкладення і геометричну стабільність, оскільки малий запас металу по перерізу зумовлює підвищений ризик прожогу, утворення кратерних дефектів, підрізів та неприпустимих деформацій. Особливості аустенітних нержавіючих сталей, зокрема нижча теплопровідність та вищий коефіцієнт лінійного розширення порівняно з низьковуглецевими сталями, підсилюють концентрацію тепла у зоні дуги, збільшують ширину зони термічного впливу та сприяють коробленню тонких панелей навіть за відносно невеликої погонної енергії [1–3]. У таких умовах роботизація набуває змісту не лише як засіб автоматизації, а як інструмент зменшення варіативності, стабілізації траєкторії, керування параметрами дуги і, відповідно, підвищення відтворюваності якості шва за вимогами стандартів контролю та рівнів якості [4–6].

Під сучасними технологіями роботизованого зварювання доцільно розуміти сукупність джерел живлення з цифровим керуванням, сенсорних засобів супроводу шва, адаптивних алгоритмів регулювання режиму, а також технологічних варіантів перенесення металу і газового захисту, які забезпечують розширене технологічне вікно для тонкого листа. Практична реалізація таких систем спирається на стандартизовані підходи до кваліфікації технології та персоналу, формування технологічних інструкцій зварювання і забезпечення системи якості у зварювальному виробництві [5–7]. Для тонколистової нержавіючої сталі найбільш

поширеними є роботизоване зварювання неплавким електродом у середовищі інертного газу, яке традиційно позначають як TIG (tungsten inert gas), а також роботизоване дугове зварювання плавким дротом у захисних газах, яке технологічно відповідає MIG або MAG залежно від складу газу, тобто процесам типу gas metal arc welding. У промисловій практиці ці процеси нерідко доповнюють імпульсними або низькотепловими модифікаціями, однак базові відмінності між TIG та традиційним MIG/MAG з позицій продуктивності й якості залишаються визначальними для вибору технології [2, 3, 9].

Роботизоване TIG зварювання тонколистової нержавіючої сталі відрізняється тим, що джерелом тепла є дуга між неплавким вольфрамовим електродом і виробом, а присадковий матеріал, за необхідності, подається окремо у вигляді дроту. Така схема забезпечує високу чистоту процесу, мінімальне розбризкування і можливість формувати валик з високою якістю поверхні, що критично для виробів з вимогами до санітарної обробки, пасивування та естетики. Основною технологічною перевагою TIG є стабільність дуги і тонке керування тепловкладенням через струм, довжину дуги та характер імпульсації, що дозволяє виконувати кореневі проходи і тонкі стикові шви з мінімальним ризиком включень і пористості за умови належної чистоти кромки та коректного газового захисту [1, 2]. Водночас для тонкого листа TIG потребує жорсткого контролю зазору і притиску, оскільки надлишкова дугова енергія за малої швидкості може спричинити прожог, а нестабільний зазор призводить до локальної зміни проплавлення та геометрії валика. Роботизація зменшує ці ризики за рахунок повторюваності положення пальника, стабільного вильоту і точного ведення по траєкторії, але не скасовує вимог до підготовки з'єднання та жорсткості технологічної оснастки [6, 9].

Сучасні методи, які формують технологічний інструментарій роботизованого TIG, спрямовані на підвищення швидкодії, розширення технологічного вікна та

зниження чутливості до геометричних відхилень. Найбільш розповсюдженим є імпульсне TIG зварювання, коли струм періодично змінюється між піковим і базовим рівнями. Піковий рівень забезпечує проплавлення і формування ванни, а базовий стабілізує дугу, зменшує середню теплову потужність і дає змогу ванні частково охолонути, що знижує деформації та ризик прожогу для тонкого листа [2, 3]. Технологічно важливо, що імпульсна модуляція підвищує керованість перенесення тепла у часі, а отже зменшує коливання ванни та сприяє стабільнішому формуванню валика при змінній теплопровідності, наприклад у місцях прихваток або в зоні стику різних елементів корпусу.

Другим напрямом підвищення продуктивності TIG є механізована подача присадкового дроту, яка у роботизованих системах реалізується як холодний дріт або гарячий дріт. Подача холодного дроту підвищує стабільність геометрії шва і повторюваність наплавлення, а гарячий дріт, попередньо підігрітий електричним струмом, зменшує частку дугової енергії, що витрачається на плавлення присадки, і підвищує швидкість наплавлення без пропорційного росту тепловкладення у виріб [9, 10]. Для тонколистової нержавіючої сталі це важливо, оскільки традиційний TIG часто лімітується саме низькою продуктивністю наплавлення, а підвищення струму дуги задля швидкості призводить до перегріву. Роботизоване TIG з гарячим дротом дозволяє частково розв'язати цю суперечність, однак потребує точного узгодження швидкості подачі дроту, кута введення і стабільності дуги, що краще реалізується саме в роботизованому виконанні [9].

Третім важливим елементом сучасного роботизованого TIG є сенсорні та алгоритмічні засоби супроводу шва, які компенсують відхилення траєкторії, зміну зазору і деформації деталей. У роботизованих осередках застосовують системи пошуку кромки, підтримання сталої висоти пальника, контролю довжини дуги, а також візуальні системи технічного зору, які оцінюють положення шва або геометрію валика у реальному часі. Для тонколистової нержавіючої сталі ці функції

особливо корисні, оскільки навіть невеликі відхилення в положенні пальника відносно стику можуть змінювати глибину проплавлення і викликати прожог або непровар. У межах сучасної практики такі рішення інтегрують у систему управління роботизованим зварюванням як частину забезпечення повторюваності і простежуваності параметрів процесу, що відповідає підходам до якості зварювального виробництва [6, 7].

Порівняльний аналіз з традиційним роботизованим MIG/MAG для тонколистової нержавіючої сталі слід починати з фізики процесу і наслідків для тепловкладення та стабільності. У MIG/MAG дуга горить між плавким дротом і виробом, присадковий метал подається безпосередньо через електрод, тому питома продуктивність наплавлення є вищою. Для тонких листів найчастіше застосовують короткодуговий перенос або імпульсний перенос, оскільки струм і перенесення краплі мають бути обмежені, щоб не перевищувати тепловкладення, яке викликає прожог і короблення [2, 3]. Проте традиційний короткодуговий MIG/MAG супроводжується циклічними короткими замиканнями і струмовими піками, що збільшують розбризкування та сприяють нестабільності ванни. Для нержавіючої сталі розбризкування має не лише естетичне значення, оскільки бризки і термічні барви на поверхні можуть погіршувати пасивний стан, підвищувати ризик точкової корозії та збільшувати трудомісткість післяопераційної обробки, зокрема шліфування і локального травлення [1, 8]. Тому у тонколистовому виконанні MIG/MAG часто вимагає або більш консервативних швидкостей і параметрів, або застосування спеціальних імпульсних режимів, що підвищує вартість і складність налаштування, тоді як TIG природно забезпечує чистоту поверхні, але поступається за швидкістю наплавлення.

Ключовий показник продуктивності роботизованого зварювання у складанні є час циклу, який включає не лише час горіння дуги, а й час підведення, запалювання, закінчення дуги, переходів між швами та післяопераційних дій. Для

тонколистової нержавіючої сталі післяопераційні дії часто визначаються необхідністю очищення від бризок, видалення оксидних плівок, доведення зовнішнього вигляду валика, а у відповідальних виробках також локальною хімічною обробкою і пасивацією. У цьому контексті TIG має суттєву перевагу, оскільки розбризкування практично відсутнє, а теплове забарвлення при коректному газовому захисті є обмеженим. Натомість традиційний MIG/MAG, навіть у роботизованому виконанні, часто потребує додаткового часу на очищення, що у серійному виробництві може компенсувати або навіть перекривати перевагу в швидкості зварювання [1, 6, 8].

Щоб обґрунтовано порівняти продуктивність роботизованого TIG і традиційного роботизованого MIG/MAG, доцільно використовувати інженерні співвідношення для часу виконання шва і питомого тепловкладення. Час зварювання одного прямолінійного шва довжиною L визначається як $t_{зв} = L/v$, де v є швидкість зварювання. Для оцінки впливу режиму на деформації і структуру зони термічного впливу застосовують погонну енергію $q = \eta \cdot U \cdot I / v$, де U є напруга дуги, I є середній струм, v є швидкість, η є коефіцієнт корисного використання потужності, який у порівняльних розрахунках приймають сталим для близьких умов тепловідведення [2, 3]. Саме поєднання часу і погонної енергії визначає реальний компроміс між швидкістю і ризиком дефектів для тонкого листа.

Розглянемо приклад, типовий для роботизованого складання корпусної деталі з нержавіючої сталі AISI 304L товщиною 1,0 мм, де виконується стиковий шов довжиною $L = 600$ мм у нижньому положенні з обов'язковим високим вимогами до зовнішнього вигляду. Прийmemo, що допоміжні рухи робота, позиціонування, запалювання та гасіння дуги, а також коротка стабілізація газового захисту сумарно становлять $t_{доп} = 10$ с на деталь. Для роботизованого TIG у імпульсному режимі обґрунтовано прийняти середній струм $I_{TIG} = 55$ А при напрузі $U_{TIG} = 11$ В і швидкості $v_{TIG} = 0,35$ м/хв, що відповідає 5,83 мм/с. Тоді час зварювання $t_{зв_TIG}$

$= 600/5,83 \approx 102,9$ с, а базовий час циклу без урахування післяопераційної обробки становить $t0_TIG = 112,9$ с. Погонна енергія при $\eta = 0,8$ дорівнює $q_TIG = 0,8 \cdot 11 \cdot 55/5,83 \approx 83,0$ Дж/мм. Для тонкого листа така погонна енергія є технологічно прийнятною за умови стабільного притиску і мінімального зазору, а імпульсність дозволяє зменшити ризик прожогу в локальних зонах [2, 3].

Для традиційного роботизованого MIG/MAG у короткодуговому режимі на тонкому листі приймемо середній струм $I_MIG = 75$ А при напрузі $U_MIG = 16$ В і швидкості $v_MIG = 0,85$ м/хв, що відповідає $14,17$ мм/с. Час зварювання становить $t_{зв_MIG} = 600/14,17 \approx 42,4$ с, а базовий час циклу $t0_MIG = 52,4$ с. Погонна енергія дорівнює $q_MIG = 0,8 \cdot 16 \cdot 75/14,17 \approx 67,8$ Дж/мм. Зіставлення q_TIG і q_MIG показує, що за підібраних режимів традиційний MIG/MAG може мати навіть нижчу погонну енергію через значно вищу швидкість, однак ризики для нержавіючої сталі з боку розбризкування та поверхневої чистоти залишаються вищими, а технологічне вікно за зазором і якістю підготовки крайок часто вужче через чутливість короткодугового переносу до нестабільних замикань [1, 2].

Для коректної оцінки продуктивності необхідно врахувати час післяопераційної обробки і очікувані втрати від переробок, оскільки саме ці складові часто визначають економіку тонколистового виробництва. Для TIG приймемо час очищення і доведення зони шва $t_{оч_TIG} = 8$ с, що відображає мінімальну потребу у видаленні оксидної плівки та відсутність бризок при коректному газовому захисті. Для традиційного MIG/MAG приймемо $t_{оч_MIG} = 25$ с, що враховує видалення бризок, локальне шліфування і підготовку поверхні до пасивації, оскільки навіть дрібні бризки на тонкому листі можуть порушити подальше складання і створювати корозійні осередки [1, 8]. Додатково введемо імовірність переробки через локальний прожог, нестабільність кореня або підріз, які для тонкого листа мають різну природу в TIG і MIG/MAG. Для TIG обґрунтовано прийняти $p_TIG = 0,02$ при середньому часі переробки $t_{пер_TIG} = 90$

с, оскільки виправлення тонкого стику потребує локального підсилення або підварювання та повторної обробки. Для традиційного MIG/MAG приймемо $p_{\text{MIG}} = 0,06$ і $t_{\text{пер_MIG}} = 120$ с, зважаючи на більший ризик дефектів при коливаннях зазору і на більший обсяг повторного очищення після переробки [4, 6]. Тоді очікуваний повний час циклу для TIG становить $t_{\text{TIG}} = t0_{\text{TIG}} + t_{\text{оч_TIG}} + p_{\text{TIG}} \cdot t_{\text{пер_TIG}} = 112,9 + 8 + 1,8 = 122,7$ с, а для MIG/MAG $t_{\text{MIG}} = 52,4 + 25 + 7,2 = 84,6$ с.

Отримані значення демонструють принципову відмінність сучасних технологій роботизованого зварювання, коли «чистий час шва» не є єдиним фактором. У цьому прикладі традиційний MIG/MAG має істотну перевагу у швидкості і загальному очікуваному циклі, проте така перевага є стійкою лише за умови стабільної підготовки крайок, надійного контролю дуги, мінімізації бризок і забезпечення якості поверхні. Якщо вимоги до зовнішнього вигляду і корозійної чистоти є жорсткішими, або якщо післяопераційна хімічна обробка суттєво дорожча за час, то навіть невелике зростання $t_{\text{оч_MIG}}$ або p_{MIG} може швидко зменшити різницю у продуктивності. Для TIG, навпаки, продуктивність лімітується часом горіння дуги, але стабільність якості поверхні і нижча залежність від розбризкування дозволяють прогнозованіше планувати такт і зменшувати непродуктивні витрати часу, пов'язані з доведенням шва [1, 6, 8]. У реальному виробництві це означає, що сучасні роботизовані технології вибирають не за максимальним значенням швидкості, а за мінімумом сумарних витрат циклу при забезпеченні рівня якості зварних з'єднань за встановленими критеріями [4–6].

Порівняння методів за продуктивністю доцільно доповнити аналізом причинно-наслідкового зв'язку між якістю шва і довговічністю деталей, оскільки для нержавіючої сталі експлуатаційна надійність часто визначається корозійними механізмами та втомною міцністю. Дефекти типу підрізів, кратерних тріщин або непроварів є концентраторами напружень і підвищують імовірність втомного

руйнування, а грубі оксидні плівки на корені або поверхневі бризки можуть ініціювати локальну корозію і, як наслідок, корозійно-втомне пошкодження у вологих або хлоридних середовищах [1, 8]. TIG завдяки чистоті процесу, стабільності валика та можливості забезпечити якісний газовий захист кореня зазвичай формує кращі передумови для довговічності, особливо у виробках санітарного призначення, де поверхнева чистота критична. Однак підвищене тепловкладення при низьких швидкостях TIG може збільшувати ширину зони термічного впливу і рівень деформацій, що для тонких панелей призводить до залишкових напружень і геометричних відхилень, які впливають на подальше складання і стабільність експлуатації. У традиційному MIG/MAG швидкість вища, тому погонна енергія може бути меншою, але розбризкування і нерівномірність поверхні валика підвищують вимоги до доведення, а отже збільшують ризик механічного пошкодження поверхні при шліфуванні і зменшення корозійної стійкості у зоні шва [1, 2, 8]. Вибір технології, таким чином, має враховувати, що продуктивність і довговічність пов'язані через якість поверхні та дефектність, а також через рівень післяопераційної обробки, яка впливає на пасивацію та напружений стан.

У межах сучасних роботизованих підходів практично значущим є комбінування переваг TIG і MIG/MAG через оптимізацію маршруту складання і диференціацію швів за критичністю. Для видимих швів корпусів і виробів з гігієнічними вимогами TIG є обґрунтованим з позицій мінімізації бризок і стабільності зовнішнього вигляду, а для внутрішніх швів або конструктивних з'єднань, де допустимі більш прості операції очищення, MIG/MAG може забезпечити вищу тактову продуктивність. Однак така диференціація має бути формалізована у технологічних інструкціях, підкріплена кваліфікацією технології та контрольними процедурами, що відповідає сучасним вимогам до зварювального виробництва і забезпечення якості [5–7]. У роботизованих системах додатковим

фактором є енерговитрати, оскільки TIG зазвичай має вищу тривалість горіння дуги, а традиційний MIG/MAG має вищу витрату дроту і, у разі розбризкування, непрямі енерговитрати на очищення. Тому порівняння продуктивності коректно виконувати у зв'язці з витратами на матеріали, гази, стиснене повітря, інструментальне оснащення та простої, а не лише за швидкістю зварювання [6, 9].

Підсумовуючи, сучасні технології роботизованого зварювання тонколистової нержавіючої сталі формуються навколо підвищення керованості тепловкладення, стабілізації геометрії шва і зменшення непродуктивних витрат часу на переробки та післяопераційну обробку [1–3, 6]. Роботизоване TIG зварювання завдяки імпульсним режимам, механізованій подачі присадки, зокрема з попереднім підігрівом дроту, та сенсорним системам супроводу шва забезпечує високу якість поверхні та мінімальне розбризкування, що є критичним для тонколистової нержавіючої сталі з вимогами до корозійної стійкості і чистоти [8–10]. Традиційне роботизоване MIG/MAG має потенціал вищої швидкості та меншого часу горіння дуги, але у тонколистовому виконанні потребує більш жорсткого контролю процесу і часто спричиняє підвищені витрати часу на очищення, що зменшує реальний виграш у такті, якщо вимоги до зовнішнього вигляду і пасивації є високими [1, 6, 8]. Розрахунковий приклад показав, що перевага MIG/MAG у швидкості не завжди пропорційно перетворюється у перевагу повного циклу через внесок післяопераційних робіт і переробок, тоді як TIG, попри нижчу швидкість, забезпечує стабільнішу якість поверхні і нижчу варіативність кінцевого результату. Виробничо обґрунтований вибір між роботизованими TIG та MIG/MAG для тонколистової нержавіючої сталі має виконуватися на основі сумарного часу циклу, стабільності дефектності за заданими рівнями якості, обсягу післяопераційної обробки та вимог до довговічності, що повинно бути закріплено у системі якості зварювального виробництва і підтверджено кваліфікаційними процедурами [4–7].

1.2. Основи процесу TIG зварювання

Процес TIG (Tungsten Inert Gas), що в міжнародній класифікації позначається як GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), належить до методів дугового зварювання неплавким вольфрамовим електродом у середовищі інертних газів. Він історично сформувався як технологія високої чистоти, орієнтована на відповідальні конструкції з кольорових металів та нержавіючих сталей, де до шва висувуються підвищені вимоги щодо геометрії, відсутності дефектів, корозійної стійкості та повторюваності якості [31–33]. Для тонколистової нержавіючої сталі, що широко використовується у харчовому, фармацевтичному, хімічному та пакувальному обладнанні, саме TIG є базовим процесом, оскільки дозволяє стабільно реалізовувати низьке тепловкладення, акуратний профіль валика та мінімізувати післяопераційну механічну обробку поверхні [31; 34].

Фізична сутність TIG полягає у формуванні стабільної дуги між неплавким вольфрамовим електродом та виробом у середовищі аргону, гелію або їх сумішей. Зварювальний струм, як правило, підводиться у режимі постійного струму прямої полярності (DCEN), що забезпечує концентрацію тепла переважно в основному металі, тоді як електрод нагрівається менше і зберігає геометричну стабільність [32; 35]. Присадний метал подається окремо, у вигляді стрижня або дроту, і розплавляється в тепловому полі дуги. Відсутність електричного контакту присадки з джерелом струму зменшує динамічні коливання процесу, а інертний газ формує захисну оболонку, що запобігає окисненню металу ванни і вольфрамового електрода [33; 36]. Таке розділення функцій "носія струму" (електрод) і "джерела металу" (присадка) принципово відрізняє TIG від MIG/MAG, де присадний дріт одночасно є електродом.

Особливості нержавіючої сталі як матеріалу істотно впливають на вимоги до параметрів TIG процесу. Аустенітні сталі типу AISI 304/304L, 316/316L мають відносно низьку теплопровідність і високий коефіцієнт лінійного розширення, що

підвищує чутливість до локальних перегрівів і деформацій [31; 37]. Нагрів у діапазоні 450–850 °C може спричиняти сенсibiliзацію – виділення карбідів хрому по межах зерен та локальне зниження корозійної стійкості. Крім того, поверхня нержавіючої сталі є візуально "чутливою": кольори побіжності, бризки, шліфувальні риси безпосередньо впливають як на гігієнічні, так і на естетичні властивості виробу. У цих умовах стабільна, сконцентрована дуга TIG, тонке дозування теплової енергії та фактична відсутність розбризкування створюють суттєві переваги порівняно з традиційним MIG/MAG [33; 38].

Для нержавіючих сталей характерні кілька специфічних вимог до організації TIG процесу. По-перше, необхідний надійний захист не лише лицевого боку шва, а й кореня за рахунок піддуву інертного газу з тильної сторони (back purging) або застосування захисних підкладок [34; 39]. Це запобігає утворенню окисних нашарувань та "цукристої" структури на корені, що різко знижують корозійну стійкість. По-друге, необхідне обмеження максимального тепловкладення та часу перебування металу в критичних температурних інтервалах, що досягається вибором раціональних струмів, швидкостей та, за потреби, застосуванням імпульсного TIG. По-третє, особливу увагу приділяють чистоті підготовлених кромок, відсутності мастил, окалини й органічних забруднень, оскільки TIG менш толерантний до забруднень, ніж MIG/MAG, але саме це забезпечує якість і повторюваність процесу [35; 40].

Ключова перевага TIG у порівнянні з MIG/MAG для нержавіючої сталі полягає у високій стабільності дуги та геометрії ванни. За рахунок нерухомого вольфрамового електрода та відсутності періодичних коротких замикань перенесення металу відбувається без різких піків струму, а форма дуги залишається практично незмінною у часі [32; 36]. Це дозволяє сформувати вузький, симетричний валик із плавними переходами до основного металу, мінімізувати підрізи і локальні концентратори напружень. Відсутність бризок усуває потребу в

агресивному механічному очищенні, що, своєю чергою, зберігає пасивний шар нержавіючої сталі та зменшує ризик індукції локальних осередків корозії [37]. Для тонколистової групи виробів важливо й те, що TIG дозволяє працювати на дуже малих струмах, забезпечуючи надійний проплав без прожогів, тоді як короткодуговий MIG/MAG за тих самих умов часто є нестабільним.

З металургійної точки зору TIG процес формує вузьку зону термічного впливу з відносно дрібнозернистою структурою і контрольованим профілем твердості [39; 41]. Відсутність сильних струмових піків і менше розбризкування означають, що менша частка енергії витрачається на нагрів бризок і надлишкове перегрівання ванни, а більша – на формування власне шва. У поєднанні з можливістю точного позиціонування дуги в корені стикового шва це робить TIG незамінним при виконанні кореневих проходів, кутових швів малих розмірів та тонкостінних трубних з'єднань з високими вимогами до герметичності [34; 40]. При цьому імпульсний TIG дозволяє додатково "структурувати" тепловий цикл: фаза високого струму відповідає за проплавлення, а фаза низького – за контроль розміру ванни та зниження середнього тепловкладення [41–43].

Разом з тим класичний ручний TIG має й очевидні недоліки: відносно низьку продуктивність (меншу швидкість зварювання й наплавлення), високу чутливість до стабільності рук зварювальника, вищі вимоги до підготовки кромek та точності складання [31; 33]. Саме ці чинники стимулювали активний розвиток роботизованого TIG зварювання, яке дозволяє поєднати технологічні переваги процесу з можливостями промислових роботів щодо повторюваності рухів, стабільності траєкторії та інтеграції із системами контролю.

Переваги TIG для процесу роботизованого зварювання нержавіючої сталі проявляються на кількох рівнях. По-перше, промисловий робот забезпечує точне й відтворюване підтримання довжини дуги, кута нахилу пальника та вильоту електрода, що мінімізує варіативність тепловкладення по довжині шва [42]. Це

особливо важливо для тонких панелей і труб, де незначна зміна зазору або теплового стану деталі без автоматичного коригування швидко призводить до прожогів або непровару. По-друге, роботизовані системи дозволяють синхронізувати переміщення пальника із подачею присадного дроту, зокрема впроваджувати коливальний рух дроту, імпульсну подачу або відведення у фазі заповнення кратера, що суттєво покращує формування валика [41; 43]. По-третє, стабільна геометрія траєкторії робота спрощує організацію захисного газового потоку, зменшує зони турбулентності та підсмоктування повітря, що критично для збереження пасивного шару нержавіючої сталі.

Сучасні джерела струму для роботизованого TIG підтримують широкий спектр функцій, орієнтованих саме на автоматизоване керування процесом. До них належать безконтактне високочастотне запалювання дуги, плавний підйом і спуск струму (upslope/downslope), програмоване заповнення кратера, широкі діапазони частот та співвідношень струму в імпульсному режимі [35; 42]. Для роботизованих систем особливо важливо, що всі ці параметри можуть змінюватися "на льоту" через цифровий інтерфейс, прив'язуючись до положення TCP, швидкості переміщення та конфігурації шва. Це робить можливими складні програми, де, наприклад, на ділянках із більшим тепловідведенням (масивні елементи, стики з ребрами жорсткості) застосовується підвищений імпульсний струм, а на тонких кромках – "м'який" режим з низьким середнім тепловкладенням.

Додаткові переваги роботизованого TIG проявляються при інтеграції систем технічного зору та датчиків відстеження шва. Лазерні або камерні трекари дозволяють роботу коригувати траєкторію у реальному часі з урахуванням допусків на виготовлення деталей і теплових деформацій, тоді як системи автоматичного контролю довжини дуги (AVC – Arc Voltage Control) підтримують стабільний міжелектродний проміжок [41; 44]. У поєднанні з TIG це означає, що висока "чутливість" процесу до геометрії зварюваного вузла перетворюється з недоліка на

керований параметр, а ймовірність дефектів типу непровару, підрізів або локальних перегрівів суттєво знижується. В результаті саме роботизований TIG дозволяє реалізовувати потенціал процесу повною мірою – як за якістю шва, так і за стабільністю показників у серійному виробництві.

Оцінка продуктивності TIG порівняно з традиційним роботизованим MIG/MAG потребує врахування повного часу циклу, а не лише швидкості переміщення пальника. У класичному підході продуктивність часто ототожнюють із швидкістю зварювання та питомою продуктивністю наплавлення, де MIG/MAG має очевидну перевагу завдяки більшому допустимому струму, інтенсивнішому перенесенню металу та можливості роботи з великим діаметром дроту [31; 33]. Однак для нержавіючої сталі суттєву частку часу займають післяопераційні дії – видалення бризок, шліфування, травлення або пасивація, правка деформованих панелей, а також переробки через прожоги, підрізи або нестабільне формування кореня. Саме на цьому рівні переваги TIG часто перетворюються на реальну економію часу, незважаючи на нижчу номінальну швидкість зварювання [37; 40].

Інженерний приклад дозволяє наочно проілюструвати різницю між TIG і MIG/MAG при зварюванні тонколистової нержавіючої сталі. Розглянемо стиковий шов довжиною $L = 400$ мм на листі AISI 304L товщиною 1,5 мм у роботизованому виконанні. Для TIG приймемо струм $I_{TIG} = 90$ А, напругу $U_{TIG} = 12$ В, коефіцієнт використання тепла $\eta_{TIG} = 0,6$ та швидкість переміщення $v_{TIG} = 180$ мм/хв (3 мм/с). Лінійне тепловкладення H_{TIG} у кДж/мм оцінимо за відомою формулою $H = (U \cdot I \cdot 60 \cdot \eta) / (1000 \cdot v)$, де U – напруга, I – струм, η – коефіцієнт корисного використання тепла, v – швидкість зварювання в мм/хв [38]. Для TIG маємо: $U \cdot I = 12 \cdot 90 = 1080$ Вт; $1080 \cdot 60 = 64800$ Дж/хв; $64800 \cdot 0,6 = 38880$ Дж/хв. У знаменнику $1000 \cdot 180 = 180000$. Отже, $H_{TIG} = 38880 / 180000 \approx 0,216$ кДж/мм. Час зварювання шва становить $t_{TIG} = L / v = 400 / 3 \approx 133,3$ с.

Для традиційного роботизованого MIG/MAG (короткодуговий режим) приймемо $I_{\text{MIG}} = 130 \text{ A}$, $U_{\text{MIG}} = 18 \text{ В}$, $\eta_{\text{MIG}} = 0,8$, $v_{\text{MIG}} = 360 \text{ мм/хв}$ (6 мм/с). Тоді $U \cdot I = 18 \cdot 130 = 2340 \text{ Вт}$; $2340 \cdot 60 = 140400 \text{ Дж/хв}$; $140400 \cdot 0,8 = 112320 \text{ Дж/хв}$. Знаменник $1000 \cdot 360 = 360000$, отже $H_{\text{MIG}} = 112320 / 360000 \approx 0,312 \text{ кДж/мм}$. Таким чином, лінійне тепловкладення MIG/MAG приблизно у 1,4 раза вище, ніж у TIG, при тому що час зварювання шва становить $t_{\text{MIG}} = 400 / 6 \approx 66,7 \text{ с}$, тобто номінально удвічі менше.

Якщо обмежитися лише часом горіння дуги, MIG/MAG виглядає переважно. Однак включення післяопераційних робіт та переробок змінює картину. Припустимо, що для MIG/MAG через розбризкування, кольори побіжності й більші деформації очищення та шліфування займають $t_{\text{оч}}_{\text{MIG}} = 90 \text{ с}$ на деталь, а ймовірність переробки (прожоги, подрізи, нестабільний корінь) становить $p_{\text{MIG}} = 0,15$ при середньому часі переробки $t_{\text{пер}}_{\text{MIG}} = 150 \text{ с}$. Очікуваний внесок переробок у цикл тоді дорівнює $p_{\text{MIG}} \cdot t_{\text{пер}}_{\text{MIG}} = 0,15 \cdot 150 = 22,5 \text{ с}$, а повний очікуваний час циклу – $t_{\text{ц}}_{\text{MIG}} = t_{\text{MIG}} + t_{\text{оч}}_{\text{MIG}} + p_{\text{MIG}} \cdot t_{\text{пер}}_{\text{MIG}} = 66,7 + 90 + 22,5 \approx 179,2 \text{ с}$.

Для роботизованого TIG, завдяки відсутності бризок та акуратному валику, припустимо $t_{\text{оч}}_{\text{TIG}} = 25 \text{ с}$, імовірність переробки $p_{\text{TIG}} = 0,05$, середній час переробки $t_{\text{пер}}_{\text{TIG}} = 90 \text{ с}$. Тоді очікуваний внесок переробок становить $0,05 \cdot 90 = 4,5 \text{ с}$, а повний час циклу – $t_{\text{ц}}_{\text{TIG}} = t_{\text{TIG}} + t_{\text{оч}}_{\text{TIG}} + p_{\text{TIG}} \cdot t_{\text{пер}}_{\text{TIG}} = 133,3 + 25 + 4,5 \approx 162,8 \text{ с}$. Попри меншу швидкість зварювання, ефективний час виготовлення придатної деталі у TIG виявляється меншим, ніж у MIG/MAG. Перерахунок на продуктивність дає приблизно $N_{\text{MIG}} \approx 20,1 \text{ дет./год}$ та $N_{\text{TIG}} \approx 22,1 \text{ дет./год}$, тобто перевага TIG становить близько 10 % за придатним виходом за умови заданих критеріїв якості.

З наведеного прикладу видно, що для нержавіючої сталі продуктивність не може оцінюватися лише швидкістю переміщення пальника. Вирішальними стають

частка переробок, обсяг шліфування та очищення, стабільність геометрії і корозійної стійкості, що безпосередньо залежать від тепловкладення та характеру процесу. Роботизований TIG, забезпечуючи менше теплове навантаження, відсутність бризок і кращий контроль форми шва, дозволяє скоротити "приховані" витрати часу на доопрацювання та зменшити ризик відмов у експлуатації [37; 40; 43]. Для відповідальних вузлів харчового, фармацевтичного та хімічного обладнання саме ці фактори визначають доцільність вибору TIG як базового процесу, тоді як MIG/MAG може використовуватися як доповнення для менш критичних ділянок із більшим перерізом.

У промисловій практиці поширено комбіновані схеми, де TIG використовують для кореневих проходів і швів з підвищеними вимогами до чистоти, а MIG/MAG або CMT – для заповнювальних і облицювальних проходів на товстіших ділянках [34; 41]. У роботизованих комплексах така стратегія дозволяє поєднати високу якість та корозійну стійкість кореня, забезпечену TIG, з більшою продуктивністю наплавлення заповнювальних шарів за рахунок MIG/MAG. Проте для тонколистової нержавіючої сталі у діапазоні 0,6–2,0 мм TIG часто виступає самодостатньою технологією, оскільки будь-які спроби "прискорити" процес за допомогою традиційного MIG/MAG без адаптивного контролю тепловкладення неминуче збільшують деформації, частку браку та обсяг дорогої післяопераційної обробки.

1.3. Особливості зварювання тонколистової нержавіючої сталі TIG методом – зона термічного впливу, залишкові деформації

Тонколистова нержавіюча сталь (0,6–2,0 мм) у харчовому, фармацевтичному, хімічному та пакувальному машинобудуванні виступає матеріалом, до якого одночасно висуваються жорсткі вимоги щодо геометричної точності, корозійної стійкості, чистоти поверхні та втомної довговічності [21–23]. Зварювання в таких

умовах стає ключовою операцією, яка визначає ресурс обладнання й обсяг післяопераційної обробки. Використання TIG-методу (GTAW) для тонколистової нержавіючої сталі базується на його здатності забезпечувати кероване тепловкладення, мінімальну зону термічного впливу (ЗТВ) та низький рівень залишкових деформацій за умови коректного налаштування режимів і технології [21, 24].

Зона термічного впливу є ділянкою основного металу, що не розплавляється, але зазнає повного або часткового рекристалізаційного та фазового перетворення під дією теплового циклу зварювання. Для аустенітних нержавіючих сталей у ЗТВ можливі ріст зерна, виділення карбідів хрому на межах зерен, зміна залишкової напруженості та, у разі надмірного тепловкладення, формування структур, схильних до міжкристалітної корозії [22, 25]. Оскільки лист тонкий, відношення нагрітої площі до маси металу є великим, тому навіть помірне зростання лінійної енергії q призводить до помітного розширення ЗТВ, збільшення деформацій і короблення. Саме контроль тепловкладення в TIG-процесі є головним інструментом обмеження ширини ЗТВ та зниження залишкових напружень.

Для TIG-методу характерними є відносно невеликі значення U та I , а також можливість роботи на малих струмах без втрати стабільності дуги. У порівнянні з короткодуговим MIG/MAG це дозволяє знизити q у 1,3–1,8 раза при однаковій глибині проплавлення, за рахунок точнішої концентрації дуги і відсутності струмових піків при короткому замиканні [24, 27]. Для тонколистової нержавіючої сталі це означає звуження ЗТВ, зменшення градієнтів температур і, відповідно, зниження рівня пластичних деформацій, що "заморожуються" у вигляді залишкових напружень після охолодження.

Кращі практики TIG зварювання тонколистової нержавіючої сталі у площині керування ЗТВ можна звести до кількох взаємопов'язаних принципів. По-перше, необхідно працювати на мінімально можливому тепловкладенні, яке все ще

забезпечує надійний проплав і формування заданого профілю шва. Це досягається підбором оптимального поєднання струму, напруги, форми вольфрамового електрода (загострення, кут вершини), діаметра присадного дроту та швидкості переміщення пальника [21, 23, 28]. По-друге, доцільним є застосування імпульсного TIG, коли струм циклічно змінюється між високим (для проплавлення) та низьким (для обмеження середнього тепловкладення) рівнями. Такий режим дозволяє підтримувати стабільну ванну мінімального розміру, що особливо важливо для стикових швів 0,8–1,5 мм без підкладки [25, 29]. По-третє, контроль початку і завершення шва (плавний підйом і спуск струму, заповнення кратера) зменшує локальні перегріви на вході/виході, де часто концентруються деформації та дефекти.

Для нержавіючої сталі якість ЗТВ визначається не лише шириною, а й структурним станом. Надмірне тепловкладення в традиційних процесах, таких як непульсований MIG/MAG, сприяє широким зонам перегріву, де відбувається ріст зерна, інтенсивне виділення карбідів та формування мікроструктур з підвищеною схильністю до міжкристалітної та точкової корозії [26, 30]. У TIG-процесі завдяки більш стриманим тепловим циклам та кращому контролю швидкості охолодження вдається обмежити час перебування металу в критичному діапазоні температур, що позитивно впливає на корозійну стійкість. Кращі практики передбачають обмеження міжпрохідної температури, використання достатнього, але не надлишкового газового захисту та мінімізацію контактів нагрітих ділянок із забруднювальними середовищами (мастила, волога, пил) [27, 31].

Залишкові деформації тонколистової нержавіючої сталі при зварюванні формуються внаслідок нерівномірного нагріву й охолодження по товщині та довжині шва. Нагріта зона прагне розширитися, але оскільки її стримують холодніші ділянки, у ній виникають пластичні деформації, які після охолодження перетворюються на власні напруження та геометричні викривлення – прогини,

хвилястість, скручування [22, 32]. Для тонких листів навіть невелика усадка шва (десяті частки міліметра) може призвести до неприпустимого викривлення панелі. Зменшення q у TIG безпосередньо знижує амплітуду тимчасового теплового розширення, а отже і кінцеву величину залишкових деформацій. Крім того, TIG, на відміну від MIG/MAG, практично не генерує бризок, тому відпадає потреба у жорсткому шліфуванні поверхні, яке саме по собі може вносити додаткові локальні деформації та концентрації напружень [29, 33].

Керування залишковими деформаціями в кращих практиках TIG зварювання тонколистової нержавіючої сталі завжди розглядається як багатофакторне завдання, що поєднує режим, конструкцію й оснастку. Серед технологічних прийомів, які довели ефективність, можна відзначити: – застосування жорстких або напівжорстких кондукторів із продуманими схемами затиску, які забезпечують фіксацію без надмірних локальних затисків і дають можливість часткового компенсування усадки; – використання попереднього "антидеформаційного" вигину або монтажних допусків, коли деталь навмисно збирають з протилежним прогином, що після зварювання вирівнюється до заданої геометрії [30; 34]; – послідовність накладання швів, яка мінімізує акумуляцію деформацій в одному напрямку: симетричне зварювання з протилежних боків, розбиття довгих швів на сегменти з чергуванням напрямку проходів; – оптимізовані прихватки малої довжини з мінімальним тепловкладенням, що утримують геометрію до моменту виконання основного шва без надмірних локальних деформацій.

Важливою складовою кращих практик є забезпечення якісного кореневого захисту (back purging) при стикових швах труб і листів. Наявність на корені шва "цукристої" окисної структури не лише знижує корозійну стійкість, а й збільшує ефективну товщину ЗТВ з боку внутрішньої поверхні, формуючи додаткові концентрації напружень [24; 31]. При коректному підборі витрати аргону,

конструкції заглушок та режимів продувки, TIG-процес забезпечує гладкий корінь без окалини, що зменшує потребу в механічній обробці, а отже й ризик введення нових деформацій. Це є важливою перевагою TIG у порівнянні з процесами, де кореневий захист реалізується складніше або потребує додаткових технологічних заходів.

Порівняння якості зварного з'єднання, виконаного TIG-методом, з іншими дуговими процесами (MIG/MAG, CMT, плазмове зварювання) показує, що для тонколистової нержавіючої сталі TIG забезпечує найбільш сприятливе поєднання геометрії шва, ширини ЗТВ і рівня залишкових деформацій [25, 27, 32]. MIG/MAG, навіть у варіантах з низьким тепловкладенням, має вищу лінійну енергію і більшу чутливість до варіацій зазору, що призводить до більшої коробленості й потреби у правці. CMT значною мірою знімає проблему розбризкування та зменшує тепловкладення, але все одно поступається TIG за можливістю роботи на екстремально низьких струмах з високою стабільністю дуги при дуже тонких листах [26, 28]. Лазерне та гібридне лазер-дугове зварювання мають ще меншу ЗТВ, проте вимагають значно дорожчого обладнання, більш жорсткої точності складання й часто формують надто вузьку зону проплавлення, чутливу до дефектів типу непровару. На цьому фоні TIG виступає збалансованою технологією, де якість і керованість теплового циклу досягаються за прийнятної складності процесу.

Особливе місце в кращих практиках посідає роботизоване TIG зварювання тонколистової нержавіючої сталі. Робот компенсує "людський" фактор TIG – необхідність одночасно точно позиціонувати пальник, тримати сталу довжину дуги, координувати подачу присадки й швидкість переміщення. Завдяки високій повторюваності траєкторій, стабільності швидкості й можливості цифрового керування струмом та імпульсними параметрами роботизований TIG суттєво зменшує розкид тепловкладення між деталями партії [33, 35]. Це безпосередньо

впливає на рівномірність ширини ЗТВ і поля залишкових деформацій, що, у свою чергу, підвищує повторюваність геометрії панелей і корпусних виробів.

Інтеграція роботизованих систем із функціями Arc Voltage Control, слідування за швом (camera/laser tracking) та адаптивного керування імпульсним струмом відкриває можливість автоматичного компенсування допусків на зазор, вигин деталей та теплове "просідання" в процесі серійного зварювання [34, 36]. У результаті TIG-процес стає більше "толерантним" до варіацій складання, не втрачаючи переваг низького тепловкладення. Для тонколистової нержавіючої сталі це означає, що ризик місцевих перегрівів, пропалів або надмірної ЗТВ у зонах збільшеного зазору знижується, а профіль шва залишається стабільним по всій довжині.

Роботизований TIG також полегшує реалізацію оптимальних схем послідовності швів і теплового менеджменту на складних виробках. Програмне забезпечення дозволяє задавати маршрути, які мінімізують накопичення деформацій: чергування коротких ділянок на протилежних сторонах панелі, паузи для часткового охолодження, "дзеркальні" проходи за схемою "від середини до країв", що складно реалізувати в ручному режимі без зниження продуктивності [32, 37]. У підсумку роботизовані комплекси здатні забезпечити одночасно високий такт і низьку деформаційність, що критично для великогабаритних кожухів, панелей кабінетів, резервуарів з тонкою стінкою.

З точки зору підвищення якості зварного з'єднання TIG-метод у роботизованому виконанні дає змогу реалізувати низку додаткових практик, недоступних або економічно не виправданих у ручному процесі. До них належать автоматичний запис і моніторинг параметрів зварювання (струм, напруга, швидкість), побудова "паспортів" швів, кореляція електричних сигналів із результатами контролю якості [35, 38]. Такі дані дозволяють виявляти дрейф процесу на ранніх стадіях, коригувати режими й підтримувати ЗТВ та деформації в

заданих межах. Для відповідальних вузлів харчового чи фармацевтичного обладнання це перетворюється на реальну перевагу над більш продуктивними, але менш контрольованими процесами.

Суттєвим аргументом на користь TIG є також зниження потреби в післяопераційній механічній обробці. Гладкий валик, відсутність бризок і вузька ЗТВ означають, що для досягнення вимог до шорсткості та чистоти поверхні часто достатньо легкого шліфування або навіть лише хімічної пасивації [24, 29]. Для MIG/MAG чи навіть СМТ зазвичай необхідне інтенсивніше шліфування, що збільшує трудомісткість, уводить додаткові напруження й може пошкоджувати пасивний шар. Отже, якість шва TIG у поєднанні з низькими деформаціями дає змогу зменшити загальну технологічну "вартість" одиниці продукції, незважаючи на нижчу швидкість зварювання.

РОЗДІЛ II ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Сучасні методи дослідження якості зварних швів, отриманих роботизованим TIG зварюванням

Якість зварних швів тонколистової нержавіючої сталі, отриманих роботизованим TIG-зварюванням (Tungsten Inert Gas, газо-вольфрамове дугове зварювання), визначає не лише відповідність геометрії та суцільності з'єднання, а й подальшу корозійну стійкість, втомну довговічність і стабільність експлуатаційних параметрів вузлів обладнання. Для тонких листів характерні мала теплова інерція та висока чутливість до локального перегріву, тому навіть незначні відхилення енерговкладення та умов захисту зони зварювання інертним газом можуть спричиняти пропал, деформації, втрату пасивного шару, а також утворення тріщин кристалізаційного та термічного походження. Роботизація TIG-процесу підвищує повторюваність траєкторії, швидкості та положення пальника, однак не усуває фізичних причин дефектоутворення, пов'язаних із коливаннями дуги, зміною реального зазору, варіацією тепловідведення, станом кромок і нестабільністю екранування газом. Саме тому сучасні методи дослідження якості таких швів мають поєднувати стандартизовані післяопераційні випробування з інструментальним моніторингом процесу в реальному часі, що забезпечує раннє виявлення відхилень і запобігання браку ще до завершення проходу [41, 46, 49].

Нормативна база оцінювання зварних з'єднань у виробничій практиці спирається на класифікацію та рівні якості недосконалостей, визначені міжнародними стандартами. Для тонколистової нержавіючої сталі особливо критичними є непровар, несплавлення, пористість, подрізи, кратерні дефекти, а також поверхневі та підповерхневі тріщини, які в аустенітних сталях можуть формуватися внаслідок високих температурних градієнтів і обмеженої пластичності в зоні кристалізації. Рівні якості за недосконаластями для зварних

швів установлюють граничні значення або заборону окремих типів дефектів, що дає можливість формалізувати рішення щодо приймання виробу [41]. Для роботизованого TIG-зварювання це важливо тим, що саме через високу повторюваність процесу систематична причина дефекту здатна відтворюватися серійно, а отже контроль має бути одночасно чутливим і достатньо продуктивним, щоб не знижувати ефективність роботизованої дільниці.

Найпоширенішим і технологічно обов'язковим початковим методом є візуальний та вимірювальний контроль зварних швів. Він забезпечує первинну оцінку зовнішньої геометрії валика, ширини, підсилення, наявності підрізів, прожогів, бризок, а також стану термічного впливу і поверхневих окисних плівок. Для нержавіючих сталей колірні відтінки зон поблизу шва є індикатором порушення режиму газового захисту або надмірного тепловкладення, що призводить до більш інтенсивного окиснення, підвищення шорсткості окалини та потенційного зниження корозійної стійкості. Процедури та вимоги до такого контролю регламентує стандарт візуального контролю зварних з'єднань [42]. В умовах роботизованого TIG додатковою перевагою є можливість автоматизованого візуального огляду, коли система технічного зору інтегрується з роботом і здійснює вимірювання геометрії шва по всій довжині, зменшуючи вплив людського фактора та підвищуючи повторюваність результатів [45, 46]. Причинно-наслідковий зв'язок тут прямий: стабільність геометрії шва відображає стабільність дуги та швидкості, а систематичні відхилення ширини чи підсилення вказують на зміну зазору, коливання довжини дуги або помилки траєкторії, що надалі корелюють із ризиком непровару чи пропалу.

Для виявлення поверхневих тріщин і капілярно відкритих дефектів у з'єднаннях з нержавіючих сталей широко застосовують капілярний контроль з використанням пенетрантів. Його фізична основа полягає у проникненні індикаторної рідини в дефект під дією капілярних сил і подальшому проявленні

індикатора на поверхні після видалення надлишків та нанесення проявника. Метод особливо ефективний для тонколистового TIG-зварювання, де кристалізаційні тріщини можуть мати малу ширину розкриття і бути практично невидимими при звичайному огляді. Загальні принципи пенетрантного контролю, вимоги до підготовки поверхні, температури процесу та послідовності операцій визначено відповідним стандартом [43]. Водночас якість підготовки поверхні має критичне значення: надмірна шорсткість, наявність окалини або забруднень змінює змочуваність, створює паразитні капілярні пори й підвищує ризик хибнопозитивних показань, що знижує пропускну здатність контролю і збільшує витрати на переробку. Для роботизованих ліній це проявляється як зростання простоїв, оскільки кожен сумнівний сигнал потребує додаткової верифікації іншими методами, а отже доцільним є поєднання пенетрантного контролю з інструментальними *in-situ* методами, які локалізують ділянки потенційної проблеми ще під час зварювання [46, 49].

Радіографічний контроль для тонколистових з'єднань є одним із найбільш інформативних щодо внутрішньої суцільності, насамперед для виявлення пористості, шлакових включень (якщо вони можливі в конкретному технологічному ланцюгу), непровару та несплавлення. Для тонких листів перевагою є висока контрастність дефектів порівняно з товстостінними деталями, однак підвищуються вимоги до стабільності геометрії, фіксації та просторової роздільної здатності системи. Сучасна практика дедалі частіше переходить до цифрової радіографії з цифровими детекторами, що підвищує швидкість отримання результатів і полегшує трасування причин дефектів через архівування зображень та цифрову обробку [44]. Стандарт на методику цифрового радіографічного контролю зварних швів визначає загальні вимоги до джерел випромінювання, детекторів, показників чутливості та умов експозиції [44]. Для роботизованих TIG-осередків важливо враховувати, що радіографія залишається післяопераційним методом,

тому вона ефективна для статистичного підтвердження стабільності процесу та кваліфікації технології, але слабо впливає на оперативне запобігання браку. Це обґрунтовує потребу доповнення радіографії методами реального часу, здатними сигналізувати про дефектотворні режими ще до формування протяжної ділянки браку [46, 49].

Ультразвукові методи контролю традиційно широко застосовують для зварних з'єднань, однак для тонколистової нержавіючої сталі їх чутливість і достовірність можуть обмежуватися геометрією та малою товщиною, що зменшує базу проходження хвилі та ускладнює розділення корисних сигналів від відбиттів на межах. Попри це ультразвуковий контроль зварних швів залишається актуальним для локальних потовщень, багатошарових зон, перехідних елементів або коли тонкий лист з'єднується з більш масивною деталлю. Практичні підходи до організації неруйнівного контролю, вибору методу та інтерпретації показань у виробничих умовах добре узагальнені в навчальній та довідковій літературі з контролю якості зварювання [45]. Важливо, що саме для роботизованих процесів перспективним є механізований або автоматизований ультразвуковий контроль на скануючих пристроях, коли стабільність траєкторії датчика підвищує повторюваність, але економічна доцільність для тонколистових виробів визначається серійністю та критичністю виробу.

Окрему групу становлять руйнівні та металографічні методи дослідження, що застосовуються для валідації технології та уточнення причин дефектів. Для тонколистової нержавіючої сталі важливими є макрошліфи для оцінки проплавлення та симетрії теплового впливу, мікроструктурний аналіз для виявлення небажаних фазових перетворень і зон підвищеної схильності до корозії, а також мікротвердість у зоні шва та термічного впливу. Хоча ці методи не є потоковими, їхній фізичний сенс у контексті роботизованого TIG полягає у встановленні причинно-наслідкового зв'язку між керованими параметрами процесу

та довговічністю. Зростання лінійного енерговкладення, яке для дугового зварювання у спрощеній інженерній постановці можна оцінити як $(q_l = \eta UI/v)$, де (η) є коефіцієнтом теплової ефективності, (U) напруга дуги, (I) струм, (v) швидкість зварювання, призводить до ширшої зони термічного впливу, більшого викривлення листа та зміни режиму охолодження. У нержавіючих сталях це може впливати на стан пасивного шару та чутливість до міжкристалітної корозії при несприятливих поєднаннях температурного циклу та хімічного складу, що робить контроль температурних полів ключовим елементом сучасних підходів [45, 49].

Суттєвий розвиток контролю якості роботизованого TIG пов'язаний із переходом від виключно післяопераційних методів до моніторингу процесу в реальному часі, тобто *in-situ*. Принципова перевага такого підходу полягає в тому, що система контролю фіксує фізичні прояви дефектоутворення в момент їх зародження або в момент зміни режиму, який статистично призводить до дефекту. Для роботизованого процесу, де рух є програмно визначеним, часові ряди датчиків можна однозначно синхронізувати з координатами робота, а отже створити карту ризиків уздовж траєкторії та перейти до адаптивного управління параметрами. Концепція моніторингу зварювального процесу в реальному часі, включно з інтеграцією датчиків, збором сигналів і логікою прийняття рішень, системно розглянута в спеціалізованих роботах з моніторингу зварювання [46]. Для TIG це особливо актуально через високу чутливість якості до довжини дуги, точності позиціонування електрода відносно стику, стану кромки та стабільності газового захисту.

Тепловізійні методи є одними з найбільш фізично обґрунтованих для *in-situ* контролю дугового зварювання, оскільки температура та тепловий потік безпосередньо відображають енерговкладення, розміри зварювальної ванни, умови кристалізації та початковий етап охолодження. Пасивна інфрачервона термографія під час зварювання реєструє випромінювальний потік від зони ванни, зони

тверднення та прилеглого металу, формуючи термограми, на яких аномалії проявляються як порушення просторового розподілу або градієнтів випромінювання [49]. Для TIG-зварювання тонких листів характерні великі градієнти температури на малих відстанях, а також швидка зміна стану поверхні, оскільки утворення оксидів, силікатних плівок чи забруднень змінює ефективну емісивність. Це ускладнює пряме вимірювання абсолютної температури, і в багатьох практичних схемах використовують відносні ознаки, наприклад профілі випромінювального потоку поперек шва або вздовж кромки, а також показники симетрії термополя [49]. Причинно-наслідкова інтерпретація полягає в тому, що дефекти типу непровару чи нестабільного проплавлення змінюють геометрію ванни та інтенсивність тепловідведення, що проявляється у зміні форми ізотерм та локальних піках чи провалах випромінювання в контрольованих зонах.

Практична реалізація термографічного контролю в роботизованому TIG потребує вирішення інструментальних проблем, пов'язаних із засліпленням датчика дугою, відблесками, динамічним діапазоном та необхідністю забезпечити сталу геометрію спостереження. У типових підходах тепловізійну камеру розміщують співвісно або поблизу пальника, щоб спостерігати ванну та зону охолодження з мінімальною паралаксною похибкою [49]. Водночас для отримання відтворюваних даних застосовують оптичні фільтри та налаштування експозиції, що дозволяють зменшити вплив випромінювання плазми та зосередитися на тепловому випромінюванні металу. Фізичні основи вибору сенсорів, оптики, фільтрів, а також обмеження, пов'язані з законом Планка і спектральними особливостями випромінювання дуги та гарячого металу, детально розглядаються у працях з високошвидкісної та спектрально селективної відеографії зварювання [50]. Для тонких листів додатковим фактором є швидкість процесу, оскільки характерні часи зміни ванни та зони охолодження малі, і недостатня частота кадрів

або інерційність тепловізійного сенсора зменшує здатність виявляти короточасні відхилення, які можуть ініціювати дефект.

Розвитком термографії для TIG є використання локальних інфрачервоних сенсорів або пірометрів, які реєструють інтенсивність випромінювання в контрольованій зоні і формують швидкі сигнали для системи управління. Прикладом є інфрачервоний сенсор для онлайн виявлення дефектів у GTAW (gas tungsten arc welding), де обробка сигналу дозволяє виявляти відхилення процесу без необхідності повного термографічного зображення [47]. Фізичний сенс такого підходу полягає у тому, що зміна теплового стану ванни та прилеглого металу при дефектоутворенні або зміні режиму відображається у зміні спектральної або інтегральної інтенсивності випромінювання в обраній зоні. Для роботизованого TIG це створює можливість побудови простих порогових критеріїв, наприклад за рівнем сигналу, похідною сигналу або відхиленням від еталонної траєкторії теплового профілю, що є особливо корисним для серійних тонколистової продукції, де необхідна висока швидкодія контролю [47, 49].

Високошвидкісні камери, на відміну від тепловізорів, орієнтовані на реєстрацію швидких оптичних явищ у зоні дуги та ванни, які визначають стабільність процесу. Для TIG-зварювання такими явищами є коливання довжини дуги, дрейф плям анода і катода, зміна форми та площі ванни, коливання поверхні ванни, формування кратера, а також нестабільність подачі присадного дроту, якщо він застосовується. У роботизованому виконанні ці явища особливо цінні як діагностичні ознаки, тому що кінематичні параметри робота є відомими та повторюваними, і будь-яка нерегламентована динаміка зображення переважно відображає фізичну нестабільність зварювання, а не зміну траєкторії. Методично високошвидкісна відеографія в зварюванні вимагає правильно підібраної частоти кадрів, експозиції, оптики та фільтрів, щоб відокремити корисні деталі ванни від інтенсивного випромінювання дуги; ці питання системно обґрунтовані з позицій

спектральної селекції та часових масштабів зварювальних явищ [50]. Для TIG, де випромінювання дуги може значно перевищувати яскравість ванни, оптична фільтрація та правильний вибір довжини хвилі є ключовими, інакше система отримує насичені кадри без інформативних деталей.

З огляду на завдання оцінювання якості шва, високошвидкісні камери виконують дві взаємопов'язані функції. Перша функція є дослідницькою та діагностичною, коли на етапі відпрацювання технології виявляють механізми нестабільності, що призводять до дефектів, наприклад пропалу через надмірне збільшення ванни при локальному зменшенні зазору, або непровар при збільшенні швидкості та одночасному зростанні довжини дуги через похибку позиціонування. Друга функція є виробничою, коли на основі відпрацьованих ознак формують прості критерії онлайн контролю, наприклад допустимий діапазон площі світної зони ванни або допустимі межі переміщення характерних контурів. У цьому контексті актуальними є методи оптичного вимірювання форми ванни та її поверхневої топології, зокрема із застосуванням каліброваної камери та структурованого світла, що дозволяє кількісно оцінювати геометрію зони плавлення та потенційно пов'язувати її зі стійкістю проплавлення [48]. Для тонколистової нержавіючої сталі така кількісна оцінка важлива, оскільки запас по проплавленню малий, і навіть невелика зміна форми ванни може означати перехід від нормального проплавлення до ризику пропалу.

Синергія тепловізійних і високошвидкісних оптичних методів проявляється у тому, що вони описують один і той самий процес з різних фізичних сторін. Термографія краще відображає тепловий стан і наслідок енерговкладення, тоді як високошвидкісна відеографія фіксує причини нестабільності, пов'язані з дугою і кінематикою взаємодії пальника з виробом. Практично це дає можливість відрізняти дефект, викликаний локальним забрудненням кромки або порушенням газового захисту, від дефекту, спричиненого зміною геометрії стику. У першому

випадку змінюється емісивність та тепловий профіль, можливе зростання окиснення і характерна зміна термограми, тоді як форма ванни на видимому зображенні може залишатися відносно стабільною. У другому випадку високошвидкісна камера фіксує зміну розмірів ванни та нестабільність дуги, а термографія відображає зміну градієнтів і ширини зони теплового впливу. У дослідженнях in-situ термографії під час TIG і споріднених процесів показано, що індикатори різних типів, включно з пористістю, гарячими тріщинами та несплавленням, можуть мати відмінні теплові підписи, які виявляються за правильно підібраної конфігурації камери та аналізу термопрофілів [49]. Це створює основу для формування комбінованих критеріїв контролю якості, коли рішення приймається за сукупністю оптичних і теплових ознак.

Для роботизованого TIG-зварювання тонких листів принципово важливим є також коректне відокремлення ознак дефектів від природних змін процесу, пов'язаних із розгоном і гальмуванням робота, входом і виходом зі шва, зміною напрямку руху, а також локальною зміною тепловідведення в зоні прихваток, ребер або стикових накладок. Тому методи дослідження якості мають передбачати часово-просторову прив'язку даних до траєкторії робота, а також використання еталонних ділянок для нормування теплових і оптичних сигналів. Підхід, коли параметри контролю визначаються не абсолютними значеннями температури, а відносними профілями випромінювального потоку, є обґрунтованим саме через змінність емісивності в межах одного термополя та через зміни поверхневого стану в процесі зварювання [49]. З технологічної точки зору це означає, що якість контролю стає функцією якості налаштування системи спостереження, а отже на етапі впровадження необхідні експериментальні серії з навмисними відхиленнями режимів, щоб сформувати бібліотеку ознак і порогів для конкретної комбінації матеріалу, товщини та типу з'єднання.

Порівняно з традиційними методами післяопераційного контролю, інструментальні методи на базі тепловізійних і високошвидкісних камер дають якісно інший ефект для надійності виробничого процесу. Якщо візуальний, капілярний і радіографічний контроль, виконані після зварювання, забезпечують виявлення дефекту, то in-situ моніторинг забезпечує керованість ризику дефекту. Для тонколистових виробів це має прямий економічний і експлуатаційний наслідок: зменшується частка прихованих дефектів, які можуть проявитися вже під навантаженням, знижується необхідність переробки та локального ремонту, а також стабілізується форма виробу через зменшення випадків надмірного тепловкладення. У роботах з високошвидкісної відеографії в зварюванні показано, що правильний підбір сенсорів, фільтрів та цифрових форматів є визначальним для отримання інформативних даних, оскільки саме оптичні обмеження часто є причиною низької відтворюваності візуальних методів спостереження [50]. Це означає, що рекомендації щодо контролю якості повинні включати не лише вибір методу, а й параметри вимірювальної системи як частину технологічного процесу.

Узагальнюючи, сучасна система дослідження якості зварних швів тонколистової нержавіючої сталі, отриманих роботизованим TIG-зварюванням, має будуватися як багаторівнева. Її базою є стандартизовані методи післяопераційного контролю, які забезпечують формальну відповідність рівням якості та документування результатів, зокрема візуальний контроль і вимірювання геометрії за нормами візуального контролю та критерії якості за недосконаlostями [41, 42]. Для виявлення поверхневих тріщин та відкритих дефектів доцільним є пенетрантний контроль із суворим дотриманням вимог до підготовки поверхні [43]. Для оцінки внутрішньої суцільності, особливо щодо пористості та непровару, ефективною є цифрова радіографія, що підвищує продуктивність контролю та придатна до цифрової аналітики [44]. Надбудовою над цією базою є in-situ методи, зокрема пасивна інфрачервона термографія та високошвидкісна відеографія, які

забезпечують раннє виявлення дрейфу режимів та фізичних ознак дефектоутворення, створюючи передумови для підвищення стабільності якості в роботизованому виконанні.

2.2. Структурні зміни та деформації тонколистових нержавіючих сталей, отриманих роботизованим TIG зварюванням

Тонколистові нержавіючі сталі аустенітного класу (типу AISI 304/304L, 316/316L) є базовими матеріалами для харчового, фармацевтичного, хімічного та пакувального обладнання, де поєднуються вимоги до корозійної стійкості, стабільності геометрії та втомної довговічності [41–43]. У цих конструкціях товщина стінок зазвичай становить 0,6–2,0 мм, що робить процес зварювання критичним щодо формування структурного стану металу, ширини зони термічного впливу (ЗТВ) і рівня залишкових деформацій. Роботизоване TIG зварювання завдяки низькому й керованому тепловкладенню, стабільній дузі та високій повторюваності траєкторії дозволяє сформувати сприятливий структурно-фазовий стан шва і ЗТВ, забезпечуючи механічні властивості, максимально наближені до характеристик основного металу [41; 44].

У вихідному стані аустенітні нержавіючі сталі мають переважно однофазну γ -аустенітну структуру із незначною кількістю δ -фериту або карбідів у разі високовуглецевих марок [45]. Мікроструктура тонколистового прокату характеризується рівномірним розподілом аустенітних зерен із текстурою, сформованою холодною прокаткою та подальшою термообробкою. Такий стан забезпечує високу пластичність, ударну в'язкість і добру корозійну стійкість, але водночас робить метал чутливим до термічних циклів: перегрів та тривале перебування у критичному температурному діапазоні 500–850 °C сприяють виділенню карбідів Cr₂₃C₆ по межах зерен і розвитку сенсibiliзації [46; 47]. При

зварюванні тонких листів особливо важливо обмежити час і максимальний рівень температур у ЗТВ, що безпосередньо залежить від лінійної енергії процесу.

Під час роботизованого TIG зварювання формується типовий зварний переріз, який містить метал шва (ЗМ), зону термічного впливу та ненарушений основний метал. У ЗМ аустенітних нержавіючих сталей залежно від еквівалентів Cr і Ni реалізуються різні режими кристалізації (А, АF, FА, F-тип), однак у більшості випадків для прокатів 304/316 зварний метал має аустенітну матрицю з 3–10 % δ -фериту [48]. Вміст δ -фериту є важливим параметром, оскільки він знижує схильність до гарячих тріщин, але його надлишок може погіршувати корозійну стійкість та ударну в'язкість. Енергетичний спектр TIG-процесу (без піків короткого замикання, характерних для MIG/MAG) сприяє більш рівномірному кристалізаційному процесу з формуванням дрібнодендритної структури, що позитивно впливає на механічні властивості та втомну довговічність [49, 50].

Зона термічного впливу при роботизованому TIG зварюванні тонколистової нержавіючої сталі є порівняно вузькою, але саме в ній концентруються найважливіші структурно-фазові зміни. Близьче до лінії сплавлення формується грубозерниста підзона, в якій аустенітні зерна зазнають рекристалізації та росту; далі розташовується дрібозерниста підзона, де переважає полігонізація та часткова рекристалізація, а ще далі – зона перегріву нижчого рівня, у якій здебільшого відбувається релаксація деформацій, отриманих під час прокатки [46, 51]. Надмірне тепловкладення в цій області призводить до розростання зерна, посиленої дифузії вуглецю й хрому та утворення карбідів на межах зерен, що знижує корозійну стійкість і втомну міцність. Завдяки здатності TIG-процесу працювати на знижених струмах і швидкостях, підібраних через імпульсний режим, ширина ЗТВ може бути зменшена на 30–40 % порівняно з короткодуговим MIG/MAG, а розмір зерна – утриманий у межах, близьких до вихідних [47, 52].

Структурно-фазові зміни в ЗМ і ЗТВ безпосередньо відображаються на механічних властивостях зварного з'єднання. У зварному металі TIG-зварювання аустенітних сталей границя міцності σ_v , як правило, близька або дещо перевищує показники основного металу, тоді як відносне подовження δ може дещо знижуватися за рахунок присутності δ -фериту та дендритної структури [49; 53]. Для тонколистової нержавіючої сталі це не є критичним, оскільки загальна деформівність вузла визначається також гнучкістю стінки й формою елемента. Важливішим є те, що роботизований TIG забезпечує стабільність структури й властивостей по довжині шва, оскільки відсутні випадкові пікові режими та нерівномірність тепловкладення, характерні для ручного процесу.

Розподіл твердості по перерізу TIG-з'єднань тонколистової нержавіючої сталі зазвичай має плавний характер: у зварному металі твердості HV можуть бути дещо вищими, ніж у основному металі, внаслідок дендритної будови й присутності δ -фериту, тоді як у ЗТВ іноді спостерігається незначне "плато" або слабкий максимум, пов'язаний із локальними змінами дислокаційної щільності та карбідоутворенням [50; 54]. На відміну від вуглецевих сталей, де ЗТВ часто демонструє виразну зону загартованого або відпущеного металу з високою твердістю, у аустенітних нержавіючих сталей перепади твердості набагато менш контрастні. Це означає, що TIG-з'єднання характеризуються відносно рівномірними механічними властивостями по ширині шва, а зона концентрації напружень визначається здебільшого геометрією валика, а не різкими змінами твердості [52; 55].

Особливу увагу в контексті тонколистової нержавіючої сталі приділяють залишковим напруженням та деформаціям. Унаслідок високого коефіцієнта лінійного розширення аустенітних сталей та низької жорсткості тонкого листа навіть помірний тепловий цикл формує значні розтягувальні залишкові напруження в осьовому напрямку шва, які поєднуються з геометричним вигином панелі [41; 56]. Величина цих напружень визначається, зокрема, лінійною енергією q . Для

порівняння впливу TIG і MIG/MAG розглянемо спрощений інженерний приклад для стикового шва довжиною $L = 600$ мм на листі товщиною $t = 1,5$ мм.

Таким чином, лінійна енергія TIG приблизно утричі нижча, ніж у MIG/MAG ($312 / 99 \approx 3,15$). Якщо в першому наближенні вважати, що середній перепад температур ΔT у ЗТВ пропорційний q/t , то для TIG отримаємо відносно менший ΔT і, відповідно, меншу пластичну деформацію ϵ_p , яка визначає усадку та залишкові напруження [43, 57]. З огляду на коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \approx 16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, зменшення ΔT у 2–3 рази трансформується у приблизно пропорційне зниження усадки шва й об'ємних деформацій. Експериментальні дослідження підтверджують, що максимальні залишкові напруження та амплітуда прогину тонких панелей при TIG можуть бути на 30–50 % нижчими, ніж при MIG/MAG за співставної глибини проплавлення [54, 58].

З точки зору експлуатаційної надійності важливо оцінювати не тільки статичні характеристики (границя міцності, твердість), а й втомну довговічність, яка для тонколистових нержавіючих сталей часто є визначальною через вібраційні та циклічні навантаження обладнання. Втомна міцність зварювальних з'єднань залежить від комбінації факторів: геометрії валика (радіус переходу в основний метал), рівня та розподілу залишкових напружень, наявності структурних неоднорідностей і дефектів (пори, включення, мікротріщини) [55; 59]. Роботизований TIG завдяки стабільному формуванню валика з плавним переходом, низькому рівню бризок та відсутності грубих структурних градієнтів у ЗТВ забезпечує більш сприятливий профіль напружень і меншу ймовірність ініціації втомних тріщин у порівнянні з нерегульованим короткодуговим MIG [52; 57].

Механічні випробування на розтяг і згин, проведені для TIG-з'єднань тонколистової нержавіючої сталі, показують, що руйнування найчастіше відбувається не по шву, а по основному металу або в зоні, віддаленій від ЗТВ, що свідчить про достатній запас міцності з'єднання [49; 53]. Це означає, що структурні

зміни, які виникають у ЗМ та ЗТВ при правильно підібраному режимі TIG, не створюють "слабкої ланки" з погляду статичної несучої здатності. У той же час, якщо параметри процесу не оптимізовано (завищений струм, низька швидкість, відсутність контролю міжпрохідної температури), потенційно можливе надмірне розростання зерна та сенсibiliзація, що призводить до локального зниження пластичності й корозійної стійкості. Це підкреслює необхідність зв'язування структурного аналізу з раціональним вибором режимів [44; 50].

Структурно-фазовий аналіз TIG-з'єднань тонколистової нержавіючої сталі, виконаний методами оптичної та електронної мікроскопії, а також рентгенівської дифракції, підтверджує, що при роботизованому виконанні можливо досягти близького до базового матеріалу співвідношення фаз і дрібнозернистої структури у ЗТВ [51; 56]. У зварному металі зберігається стабільний аустеніт із контрольованою кількістю δ -фериту, а у ЗТВ – рекристалізований аустеніт з менш вираженою сегрегацією, ніж при високому тепловкладенні. Важливою перевагою роботизованого TIG є низька дисперсія результатів: від зразка до зразка відмінності в розмірі зерна, частці δ -фериту та твердості мінімальні, тоді як при ручному або нестабільному механізованому зварюванні розкид структурних параметрів є значно більшим [57; 60].

У практичному вимірі структурні зміни та деформації тонколистової нержавіючої сталі після роботизованого TIG зварювання безпосередньо впливають на точність складання, ресурс герметичних з'єднань, стійкість до корозійно-втомного руйнування та потребу в післяопераційній обробці. Вузька ЗТВ із дрібнозернистою структурою, помірний рівень залишкових напружень і мінімальна коробленість дозволяють зменшити обсяг правки, шліфування й доведення поверхні, що знижує ризик введення додаткових дефектів від механічного впливу. У поєднанні з високою повторюваністю, яку забезпечує роботизований осередок,

це створює основу для стабільної якості виробів у серійному виробництві обладнання з тонколистової нержавіючої сталі.

2.3 Моделювання параметрів процесу TIG-зварювання листової нержавіючої сталі роботизованим комплексом

Роботизоване TIG-зварювання тонколистової нержавіючої сталі розглядали як інтегрований технологічний комплекс, у якому кінематика маніпулятора, параметри дуги та алгоритми керування формують єдину систему забезпечення стабільності проплавлення, геометрії валика і повторюваності якості з'єднання. Для моделювання та відпрацювання таких операцій запропоновано використання робота FANUC ARC Mate/10-16D, що є шестиосьовим маніпулятором з робочою зоною 1831 мм, вантажопідйомністю до 35 кг та паспортною точністю позиціонування 0,03 мм. Поєднання достатньої жорсткості механічної структури і високої повторюваності руху є критичним саме для TIG-процесу, оскільки якість шва чутлива до мікровідхилень довжини дуги, кута нахилу пальника та стабільності швидкості ведення. За тонкого листа навіть невеликі коливання тепловкладення викликають зміни ширини ванни, ризик прожогу або, навпаки, непровару, тому інженерна постановка задачі орієнтується на мінімізацію збурень і на відтворюваність траєкторії в умовах серійного складання.



Рисунок 2.2 Джерело живлення Fronius MagicWave 3000

Під час програмування роботизованого TIG важливим етапом є визначення робочих систем координат і точного положення інструменту, тобто Tool Center Point, відносно деталі та стику. Для FANUC ARC Mate/10-16D це включає калібрування TCP пальника, задання робочої площини, вибір типу інтерполяції рухів і обмеження прискорень, щоб уникати короточасних просідань швидкості на кутах або при зміні напрямку. Оскільки тепловкладення пропорційне відношенню електричної потужності дуги до швидкості зварювання, локальне зменшення швидкості на траєкторії без відповідної корекції струму збільшує погонну енергію і створює ризик прожогу тонкого листа. Тому в роботизованих програмах доцільно застосовувати плавні переходи, оптимізувати траєкторію входу і виходу, а також уніфікувати швидкісні профілі на ділянках з рівномірним тепловідведенням.

Параметри TIG-зварювання для тонколистової нержавіючої сталі в роботизованому виконанні визначаються вимогами до проплавлення, мінімізації деформацій і забезпечення чистоти поверхні. Для аустенітної сталі типу AISI 304 nF 304L товщиною 1,0 мм у стиковому з'єднанні без присадки або з мінімальною присадкою раціонально застосовувати постійний струм прямої полярності на

електроді (DCEN) з діапазоном струму 45–65 А, напругою дуги близько 10–12 В та швидкістю зварювання 0,25–0,45 м/хв, що відповідає 4,2–7,5 мм/с. Для товщини 1,5 мм типовим є струм 70–95 А при швидкості 0,20–0,35 м/хв, залежно від зазору та схеми притиску. Кут нахилу пальника від нормалі до поверхні зазвичай підтримують у межах 10–15°, а довжину дуги стабілізують на рівні 1,5–2,0 мм, оскільки зростання довжини дуги збільшує ширину теплового впливу та знижує концентрацію тепла в корені, що підвищує ризик непровару при стабільному зовнішньому валику.

Для зниження середнього тепловкладення доцільним є імпульсний режим TIG, який особливо ефективний у роботизованих системах завдяки повторюваності синхронізації струму і переміщення. Для тонкого листа 1,0–1,2 мм практично обґрунтованими є такі орієнтири: піковий струм 80–95 А, базовий струм 25–35 А, частота 2–4 Гц, відносна тривалість імпульсу 35–50%. Така імпульсація забезпечує періодичне формування ванни з частковим охолодженням між імпульсами, що зменшує короблення і стабілізує ширину шва при коливаннях тепловідведення. У роботизованому виконанні це безпосередньо пов'язано з продуктивністю, оскільки зменшення деформацій скорочує час на правку та підгонку в подальших складальних операціях і знижує ймовірність переробок через геометричні невідповідності.

Газовий захист у TIG-процесі визначає не лише відсутність пористості, а й стан поверхні шва, що критично для нержавіючих сталей через вимоги до пасивного шару. Для робота з пальником, інтегрованим у програму FANUC, витрату аргону доцільно задавати в інтервалі 8–12 л/хв для стандартного сопла, а попередню продувку встановлювати 0,5–1,0 с, тоді як постпродувку 6–10 с залежно від струму та діаметра електрода. Для запобігання окисненню кореня при наскрізних швах використовують піддув кореня аргонном або формувальні підкладки, оскільки кореневе окиснення знижує корозійну стійкість та ускладнює санітарну обробку.

Вибір вольфрамового електрода для таких режимів зазвичай виконують у діаметрі 1,6–2,4 мм з відповідною заточкою, що забезпечує стабільне запалювання та концентровану дугу при малих струмах, характерних для тонкого листа.

Інженерне обґрунтування режимів у роботизованому ТІГ доцільно виконувати через оцінку погонної енергії, яка в спрощеному вигляді визначається як $q_l = \eta UI/v$, де η - є коефіцієнт теплової ефективності, U - напруга, I - струм, v - швидкість. Для прикладу, за $U=11$ В, $I=60$ А, $v=6$ мм/с і $\eta=0,8$ отримуємо $q_l = 88$ Дж/мм. Якщо внаслідок некоректного налаштування руху або надмірної згладженості траєкторії швидкість локально зменшиться до 4 мм/с, то q_l зросте до приблизно 132 Дж/мм, тобто на 50%, що для тонкого листа може стати детермінуючим фактором прожогу або надмірної деформації. Цей причинно-наслідковий зв'язок пояснює, чому точність позиціювання 0,03 мм і контроль швидкості руху робота набувають не формального, а фізично значущого впливу на якість і відтворюваність процесу.

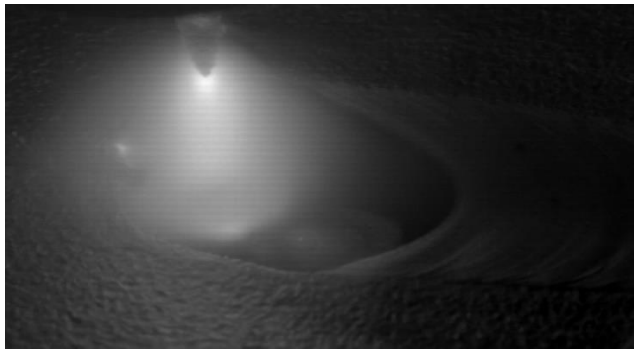
Використання зварювальних камер XIRIS у роботизованому ТІГ-зварюванні тонколистової нержавіючої сталі є обґрунтованим як інструмент безпосереднього відстежування тепловкладення та стабільності зварювальної ванни в режимі реального часу.



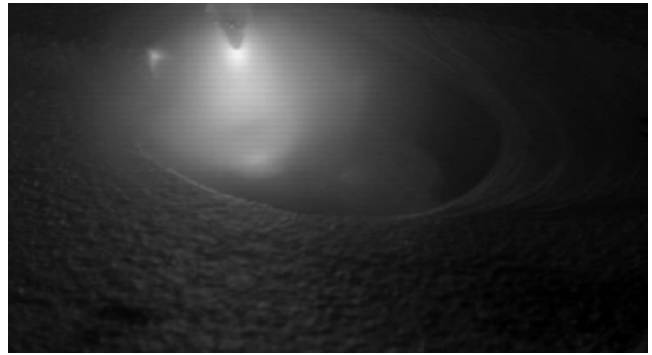
Рисунок 2.3 Зварювальні камери XIRIS

Оскільки погонна енергія визначається не лише електричними параметрами дуги, а й фактичною локальною швидкістю, навіть короткочасне зменшення швидкості через кінематичні обмеження або згладжування траєкторії може істотно її підвищити. У наведеному прикладі падіння швидкості з 6 до 4 мм/с збільшує тепловкладення приблизно на 50%, що для тонкого листа є критичним з точки зору ризику прожогу, розширення зони термічного впливу та зростання деформацій.

Камери XIRIS, інтегровані до зварювального робота, дозволяють спостерігати розмір і форму ванни, динаміку яскравості та теплових індикаторів дуги, а також прив'язувати ці ознаки до координат робота. Це створює основу для замкненого контуру керування, коли при виявленні ознак надмірного тепловкладення система коригує швидкість руху, імпульсні параметри або стратегію входу і виходу зі шва, зменшуючи варіативність і підвищуючи відтворюваність якості.



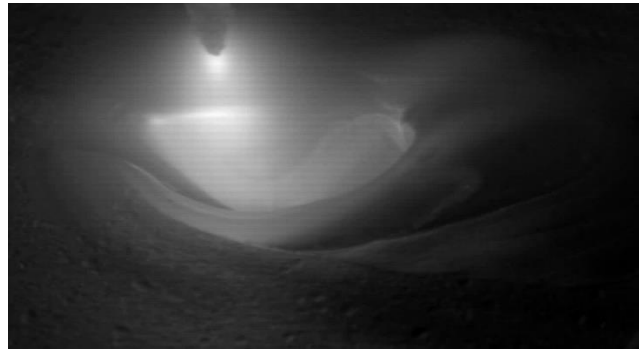
а)



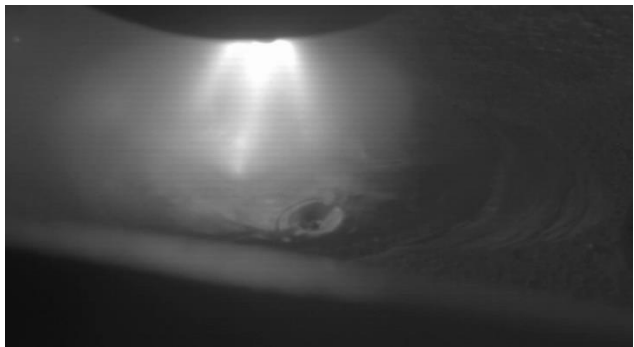
б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.4 Результати контролю зварної ванни в процесі зварювання камерою XIRIS: процес якісного зварювання (а), прогорання наскрізь (б), результат забруднення зварювальної ванни (в), відсутність плавлення (г), нестача захисного газу (д), висока швидкість переміщення (е)

Для забезпечення стабільності в умовах серійного складання важливим є підхід до керування варіативністю зазору та геометричних відхилень. У роботизованому TIG це реалізують через технологічну оснастку з притиском,

прихватки з регламентованим кроком, а також через функції пошуку кромки та підтримання сталої висоти пальника, якщо вони доступні в конфігурації осередку. Висока повторюваність FANUC ARC Mate/10-16D дозволяє застосовувати вузькі допуски на положення пальника відносно стику, однак реальні відхилення деталі після різання або формування часто перевищують допуски траєкторії. Тому сучасний підхід полягає в тому, щоб переносити частину стабілізації з програмної траєкторії на технологічну підготовку та контроль позиціонування деталі, а частину на сенсорні методи, які коригують траєкторію в межах заданих обмежень. Це зменшує чутливість процесу до деградації оснащення і підвищує надійність досягнення заданого рівня якості за критеріями недосконалостей.

Використання камер XIRIS є достатньо дорогим, тому для моделювання тепловкладення використовували моделювання в програмі Abacus.

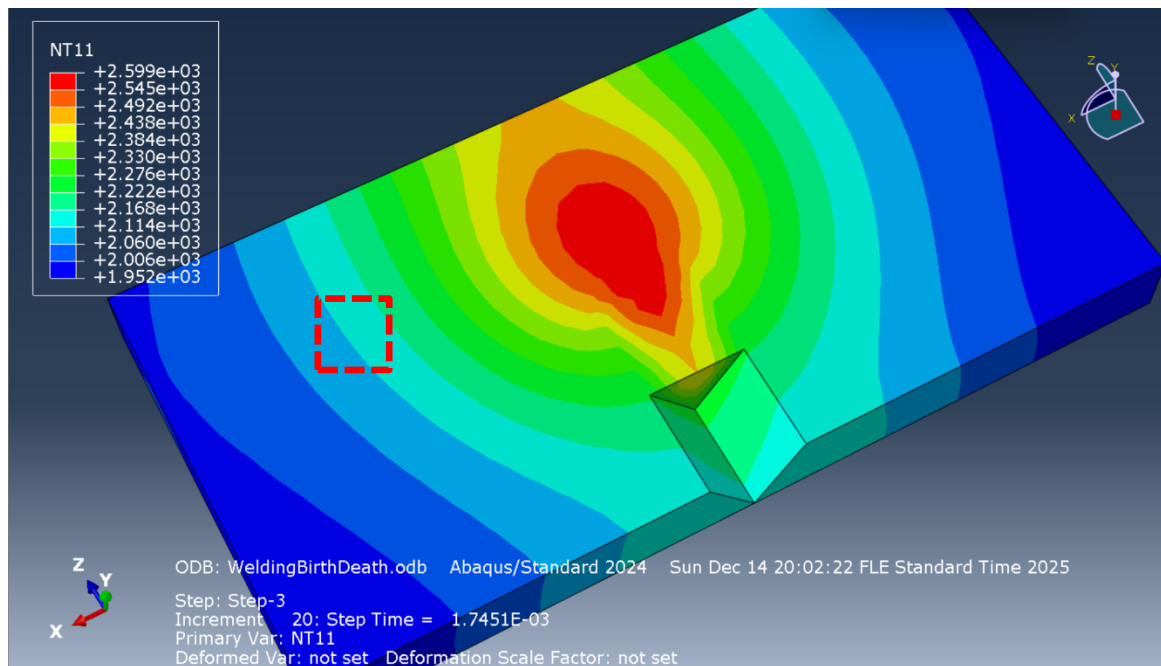


Рисунок 2.5 Моделювання тепловкладення в програмі Abacus (червоним виділено область вимірювання температури на зразку пірометром)

Для фіксації температури та передачі даних використовували пирометр.



Рисунок 2.6 Пирометр для вимірювання температури при зварюванні та передачі даних

Отримані пирометром дані наведені на рис.2.7

```

1 time_s,temperature_C
2 0.0,250.5301120896806
3 0.01001001001001,250.3876869249637
4 0.02002002002002,253.25284526277275
5 0.03003003003003,254.29658602049946
6 0.04004004004004,249.529005760534
7 0.05005005005005,251.86978989980122
8 0.06006006006006,252.91668554284428
9 0.07007007007007,252.7855677508866
10 0.08008008008008,257.3701640856153
11 0.09009009009009,254.6934587763231
12 0.10010010010010,253.09189159989302
13 0.11011011011011,256.34801890723224
14 0.12012012012012,256.14455298069964
15 0.13013013013014,256.6529938515266
16 0.14014014014015,260.0964680123104
17 0.15015015015015,257.6120722704418
18 0.16016016016016,256.7262248573563
19 0.17017017017017,253.8388868571952
20 0.18018018018017,257.8269797400688
21 0.19019019019018,261.17009888465725
22 0.20020020020018,258.76785741728713
23 0.21021021021022,254.8534063472516
24 0.22022022022023,258.71099290686016
25 0.23023023023023,262.05784355014623
26 0.24024024024024,261.51903236895663
27 0.25025025025025,259.0924057808465
28 0.26026026026026,259.97587087040324
29 0.27027027027027,260.6084749180686
30 0.28028028028028,260.41678183818004
31 0.29029029029029,257.9837415039555
32 0.30030030030030,263.85942269919553
33 0.31031031031031,265.1235033577659
34 0.32032032032032,259.8373523521348
35 0.33033033033033,265.6142910507591
36 0.34034034034033,263.16009857087505
37 0.35035035035034,266.04296362607226
38 0.36036036036034,263.88193011260074
39 0.37037037037035,264.2770203512619

```

Рисунок 2.7 Набір даних отриманих при вимірюваннях температури

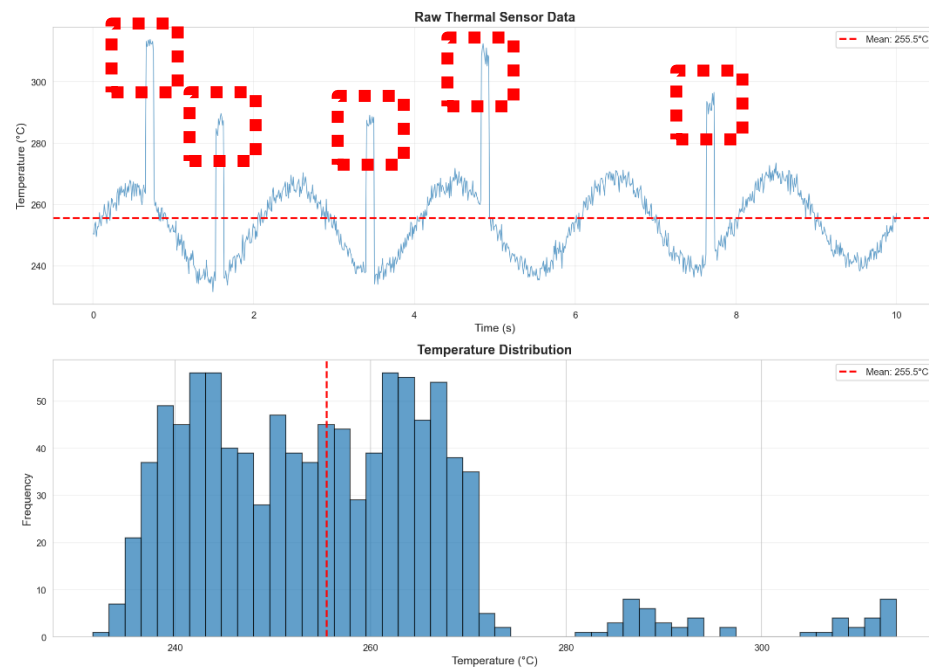


Рисунок 2.8 Оброблений набір даних отриманих при вимірюваннях температури

Отриманий набір даних залежності температури від часу виміру дозволив встановити наступне. Прилад має інструментальну погрішність якій відповідають піки інтенсивності температури – викиди значень. Такі викиди можуть бути прибрані програмно автоматизовано.

Використання робота FANUC ARC Mate/10-16D у поєднанні з джерелом Fronius MagicWave 3000 для роботизованого TIG-зварювання тонколистової нержавіючої сталі забезпечує технологічні передумови для високої повторюваності якості, якщо параметри дуги, газового захисту і руху узгоджені з величиною тепловкладення та з урахуванням тонкого перерізу деталі. Визначальними параметрами залишаються стабільність довжини дуги, швидкість ведення та імпульсні режими струму, які зменшують деформації і підвищують стійкість до коливань тепловідведення. Для моделювання та подальшої оптимізації процесу доцільно використовувати погонну енергію як інтегральний показник впливу режимів на форму ванни і деформації, а також закладати в модель механізми локального зниження швидкості та їхній вплив на ризик прожогу. Саме таке поєднання кінематичної точності робота, керованості джерела живлення та технологічно обґрунтованих режимів формує практичну основу для відтворюваного роботизованого TIG-зварювання.

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

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

Роботизоване зварювання неплавким вольфрамовим електродом у середовищі інертного газу належить до технологічних процесів підвищеної небезпеки, оскільки поєднує джерела ризику різної фізичної природи. До них належать механічні небезпеки рухомих ланок маніпулятора та зовнішніх осей, електричні ризики зварювального кола й допоміжних ланцюгів, інтенсивне оптичне випромінювання дуги, а також аерозолі та газові продукти процесу. У реальних умовах виробництва ці фактори діють одночасно й часто взаємопідсилюються. Наприклад, прагнення зменшити час циклу шляхом підвищення швидкостей переміщень робота збільшує кінетичну енергію рухомих мас і підвищує тяжкість наслідків при помилці програмування або збоях датчиків, а спроби підвищити стабільність дуги через збільшення струму посилюють тепловкладення та оптичну яскравість зони зварювання, що вимагає жорсткіших заходів захисту персоналу. Тому охорона праці для роботизованого TIG має базуватися на системному аналізі ризиків і на поєднанні інженерних, організаційних та індивідуальних заходів, реалізованих у логіці ієрархії керування ризиками [57].

Базова відмінність роботизованого зварювання від ручного полягає в тому, що джерелом небезпеки стає не лише дуга, а й робототехнічна система як машина зі складною кінематикою та програмно-керованими режимами. Міжнародні вимоги до безпечної конструкції та інтеграції промислових роботів встановлюють стандарти, що регламентують як сам робот (вимоги до конструкції, режимів, захистів), так і роботизовану систему в складі осередку, включно з периферією, огороженнями, міжблокуваннями, пультами навчання та функціями безпеки [54–

55]. Практичний сенс такого поділу полягає у розмежуванні відповідальності між виробником робота та інтегратором осередку, але з позицій охорони праці ключовим є те, що безпека формується на рівні системи. Навіть високоточний маніпулятор із вбудованими функціями обмеження швидкості не гарантує прийняттого рівня ризику, якщо в осередку неправильно організовано доступ, відсутні безпечні зони, не забезпечено контроль несподіваного запуску та не виконано аналіз відмов датчиків і виконавчих елементів [57].

Ризик-орієнтований підхід передбачає, що початково ідентифікуються небезпеки, далі оцінюються сценарії їх реалізації, а потім проєктуються захисні заходи, спроможні знизити ризик до прийняттого рівня. У роботизованому ТІГ критичними є сценарії входу людини в робочу зону під час автоматичного циклу, раптового відновлення руху після зупинки, некоректного переходу між режимами навчання і автомату, а також контакт із струмоведучими частинами чи нагрітими елементами оснащення. Стандарт з загальних принципів безпеки машин задає методологію, яка вимагає аналізу як нормальних режимів, так і передбачуваного неправильного використання, включно з помилками оператора та впливом факторів середовища [57]. Для зварювального осередку це означає, що до оцінки мають входити не тільки параметри програми руху, а й характер партійності виробництва, частота переналагоджень, регламент технічного обслуговування, типи деталей та змінність персоналу.

Інженерна реалізація охорони праці в роботизованому ТІГ значною мірою визначається архітектурою функцій безпеки системи керування. Для промислових осередків типовими є функції аварійної зупинки, безпечного зупинення категорії 0 або 1, безпечного обмеження швидкості в режимі навчання, безпечного контролю положення або зони, а також міжблокування дверей огороження. Їх результативність залежить від того, чи забезпечено необхідний рівень надійності, який у стандартах безпеки систем керування формалізується через досягнення

заданого рівня продуктивності (Performance Level) для функцій безпеки [58]. Причинно-наслідковий зв'язок тут прямий: якщо функція контролю дверей виконана на елементній базі без діагностики й дублювання, то ймовірність небезпечної відмови зростає, а при роботі робота на високих швидкостях час реакції може бути недостатнім для уникнення контакту. Тому технічні рішення на рівні датчиків, безпечних контролерів і виконавчих елементів визначають не формальну відповідність стандартам, а реальний рівень захисту.

Окрему увагу слід приділяти огороженням і доступу до небезпечних зон, оскільки саме доступ персоналу до осередку є найтиповішою передумовою інцидентів. Використання стаціонарних огорожень, екранування від випромінювання, а також дверей з міжблокуванням має забезпечувати, з одного боку, неможливість потрапляння в зону руху робота під час автоматичного циклу, а з іншого боку, технологічну зручність доступу для заміни пристроїв, очищення оснащення та обслуговування пальника. Стандарт на міжблокувальні пристрої пов'язує вибір типу міжблокування з аналізом способів обходу захисту та вимагає конструктивних рішень, що унеможливають або мінімізують стимул до блокування захистів у виробничій практиці [60]. У роботизованому TIG це має особливе значення через часті зупинки для контролю якості, заміни присадного матеріалу або коригування траєкторії, коли виникає спокуса відкрити огороження без зупинення системи.

Електробезпека в TIG-осередку включає ризики від силових ланцюгів зварювального джерела, допоміжних електричних мереж, систем подачі газу з електромагнітними клапанами, а також від високочастотного запалювання дуги, яке може створювати наведені напруги та електромагнітні завади. Вимоги до електрообладнання машин регламентують структуру захисного заземлення, вибір апаратів захисту, маркування, вимоги до ізоляції та принципи організації шаф керування так, щоб мінімізувати ризики ураження струмом і помилок під час

технічного обслуговування [59]. З інженерної точки зору важливо, що електричні захисти мають працювати узгоджено з функціями безпеки робота. Якщо при аварійному стопі зварювальне джерело продовжує подавати напругу холостого ходу, то залишається ризик контакту персоналу з активними частинами під час входу до осередку, а це підвищує вимоги до відключення енергії та блокування повторного запуску.

Зварювальна дуга TIG є інтенсивним джерелом ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного випромінювання, яке становить небезпеку для органів зору та шкіри не лише для зварника, а й для працівників, що перебувають поблизу. У роботизованих осередках додатковий фактор ризику полягає у тривалості експозиції, оскільки автоматичні цикли можуть працювати з високою частотою повторення, формуючи стабільне опромінення навколишнього середовища. Застосування прозорих штор, смуг та екранів для дугових процесів повинно забезпечувати зниження оптичного випромінювання та захист від бризок, а також обмеження дискомфортного засліплення, що погіршує сприйняття небезпек та може сприяти помилкам персоналу [62]. Важливо, що екранування не може розглядатися як заміна засобів індивідуального захисту для оператора, який спостерігає зону зварювання, однак воно істотно знижує колективний ризик, формуючи захищений периметр робочого простору.

Хімічні фактори у TIG мають іншу структуру, ніж у роботизованому зварюванні плавким електродом у середовищі інертного або активного газу (MIG/MAG, metal inert gas або metal active gas). TIG зазвичай утворює менше твердих аерозолів, але в зоні дуги при роботі на нержавіючих сталях можливе утворення озону та оксидів азоту, а також локальна поява аерозолів при забрудненнях поверхні, використанні присадного матеріалу або при роботі з травленими чи мастильними залишками. MIG/MAG, навпаки, характеризується більшою інтенсивністю утворення диму та аерозолів за рахунок перенесення металу

краплями, сплесків і випаровування легувальних елементів, що підсилюється при зварюванні нержавіючих сталей через наявність хрому та нікелю в складі [63]. Причинно-наслідковий зв'язок для охорони праці проявляється в тому, що при переході від TIG до MIG/MAG зростає потреба у продуктивнішій місцевій витяжній вентиляції, частіше потрібні фільтраційні системи та контроль накопичення шкідливих речовин у повітрі. Водночас для TIG зазвичай актуалізується контроль озону та вимоги до провітрювання навіть тоді, коли візуально димність незначна, оскільки ризик може мати прихований характер.

Для роботизованих осередків ключовим є те, що інтенсивність утворення шкідливих речовин корелює з режимами процесу та стабільністю дуги. Підвищення струму та напруги, збільшення тепловкладення, а також зниження швидкості переміщення пальника збільшують енергетичне навантаження на зону процесу, що може підсилювати газоутворення та змінювати дисперсний склад аерозолі. Методи вимірювання та оцінювання емісії зварювальних аерозолів у стандартах визначають лабораторні підходи до встановлення інтенсивності викидів та збору проб, що є методичною базою для порівняння режимів і вибору вентиляційних рішень [63]. Для практики охорони праці це означає, що зміни технології, наприклад, підбір іншого присадного дроту чи зміна газової суміші, повинні супроводжуватися переоцінкою ризиків та корекцією вентиляції й засобів захисту, навіть якщо якість шва покращується.

Окрему небезпеку становить використання інертних газів, зокрема аргону чи гелію, які при витісненні можуть витіснити кисень у приповерхневих зонах, а в умовах обмежених об'ємів створювати ризик асфіксії. У роботизованих осередках цей ризик посилюється тим, що газопостачання часто централізоване, а витіски можуть бути тривалими та непомітними. Тому інженерні рішення мають включати контроль герметичності магістралей, правильне розміщення балонів або кріогенних ємностей, організацію вентиляції, а також логіку автоматичного перекриття газу

при аварійному стопі або при відкритті огороження, що зменшує масовий баланс витоку під час доступу персоналу [55, 59]. Тут знову проявляється взаємозалежність: функції безпеки, які відключають рух робота, мають бути узгоджені з відключенням енергоресурсів процесу, інакше після зупинки залишаються небезпечні фактори.

Механічні небезпеки в роботизованому TIG формуються не лише рухом маніпулятора, а й периферією, зокрема позиціонерами, поворотними столами, конвеєрами, затискними пристроями та інструментальними кабель-пакетами. На відміну від ручного зварювання, де зона ризику локалізована біля дуги, у роботизованому осередку небезпечний простір є тривимірним і змінним у часі, оскільки траєкторії переміщення робота включають підхід, відхід, перебудову пози, а інколи і маневри уникнення сингулярних положень. Стандарти безпеки роботів вимагають, щоб швидкості в режимі навчання були обмежені, а керування виконувалося із застосуванням спеціальних засобів дозволу руху, що зменшує ймовірність неконтрольованого переміщення при присутності оператора в зоні дії [54–55]. Практична рекомендація полягає в тому, що налаштування та корекція програм мають виконуватися у відокремленому режимі знижених швидкостей з активованими функціями безпечного контролю швидкості та положення, а перевірка траєкторії в автоматі повинна виконуватися лише після валідації зон і блокувань.

Суттєвим компонентом охорони праці є запобігання несподіваному запуску або відновленню руху. У роботизованому TIG це проявляється у сценаріях, коли після аварійної зупинки, зникнення живлення або відкриття дверей, система може перейти у стан готовності й відновити рух при помилковій команді або при відновленні живлення. Стандарт з попередження несподіваного запуску формалізує вимоги до ізоляції джерел енергії, блокування та розрядження накопиченої енергії, а також до процедур відновлення роботи після технічного обслуговування [61]. У

технологічному контексті це означає необхідність застосування процедур блокування та маркування під час сервісу, контролю залишкового тиску в пневмолініях, безпечного стану позиціонера та підтвердження готовності до запуску перед відновленням циклу. Наслідком виконання цих вимог є зниження ризику інцидентів саме в період простою й обслуговування, який статистично є більш аварійним через нестандартність дій персоналу.

Порівняння вимог до роботизованого TIG та MIG/MAG з точки зору охорони праці доцільно будувати на відмінностях у тепловому та матеріальному балансі процесів. MIG/MAG зазвичай характеризується вищими тепловими потоками й інтенсивнішим перенесенням металу, що підсилює бризкоутворення, ризики опіків і пожежну небезпеку при наявності забруднень або легкозаймистих матеріалів. TIG, хоч і має нижчу схильність до бризок, формує більш концентроване оптичне випромінювання дуги та може використовувати високочастотне запалювання, що підвищує вимоги до електромагнітної сумісності та екранування [59, 62]. При роботі з тонколистовою нержавіючою сталлю відмінності проявляються також у складі аерозолів. У MIG/MAG інтенсивність аерозолеутворення вища, а отже, більш критичними стають локальна витяжка та фільтрація, тоді як у TIG домінують вимоги до контролю газових компонентів і забезпечення адекватного повітрообміну навіть при низькій видимій димності [63]. У підсумку, при переході між процесами має змінюватися конфігурація вентиляції, типи екранів, режим прибирання робочої зони та вимоги до засобів індивідуального захисту.

Відмінності між колаборативними роботами та промисловими зварювальними роботами є принциповими для охорони праці, однак у контексті TIG вони мають обмежене практичне втілення. Колаборативний робот зазвичай проектується для взаємодії з людиною за рахунок режимів обмеження сили і тиску, моніторингу швидкості та відстані або ручного ведення, що регламентовано в технічній специфікації щодо колаборативних роботів [56]. Проте зварювальний

процес створює небезпеки, які не знімаються самим фактом обмеження сили робота, оскільки оптичне випромінювання, гарячі поверхні, гази та електричні ризики залишаються. Це означає, що навіть якщо маніпулятор має колаборативні функції, TIG-осередок у більшості випадків потребує фізичного відокремлення або принаймні екранування та контрольованого доступу, а також процедур, які виключають перебування сторонніх осіб у зоні дії дуги [56, 62]. Промисловий зварювальний робот, навпаки, орієнтований на високу швидкість і жорсткість, а отже потребує більш консервативної концепції безпеки із застосуванням огорожень, міжблокувань і багатоканальних систем безпеки [54–55]. Практична рекомендація полягає в тому, що колаборативність у зварюванні доцільно розглядати переважно як інструмент спрощення навчання та переналагодження, але не як підставу для відмови від огороженого осередку.

Організаційні заходи охорони праці в роботизованому TIG мають узгоджуватися з технічними рішеннями, інакше навіть правильно спроектований осередок втрачає ефективність через людський фактор. До таких заходів належать навчання персоналу з акцентом на відмінності між режимами навчання та автомату, регулярна перевірка працездатності аварійних зупинок і міжблокувань, допуск до робіт із програмування лише кваліфікованих операторів, а також регламентація сервісних робіт із застосуванням процедур ізоляції енергії. Системний підхід до управління охороною праці доцільно узгоджувати з вимогами стандартів менеджменту, оскільки вони задають рамку для планування, моніторингу, аудитів і коригувальних дій, які забезпечують стійкість безпечної експлуатації на горизонті життєвого циклу обладнання [57]. Важливо, що деградація компонентів, наприклад, зношення кабель-пакета, люфти в редукторах або забруднення вентиляційних фільтрів, має прямий причинно-наслідковий зв'язок із зростанням ризику, тому профілактичне обслуговування є не допоміжною діяльністю, а частиною системи безпеки.

Підсумовуючи, охорона праці при використанні роботизованого обладнання для TIG-зварювання повинна розглядатися як інтегрована інженерно-організаційна система, де механічні, електричні, оптичні та хімічні небезпеки аналізуються в сукупності, а захисні заходи реалізуються на рівні робота, осередку та процедур експлуатації. Визначальними є ризик-орієнтована оцінка, коректна побудова функцій безпеки, контроль доступу до небезпечних зон і узгоджене відключення енергоресурсів, що забезпечує зниження ризиків як у режимах виробництва, так і під час переналагоджень та сервісу.

3.2. Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому TIG зварюванні

Забезпечення безпеки у надзвичайних умовах при роботизованому зварюванні методом TIG є одним із ключових аспектів проєктування та експлуатації сучасних зварювальних осередків. На відміну від ручного процесу, де оператор безпосередньо перебуває в зоні дії дуги, у роботизованих системах ризики для людини зміщуються від робочої зони зварювання до етапів програмування, налагодження, технічного обслуговування та реагування на аварійні ситуації. Для процесу TIG (процес 141 за ISO 4063) характерні висока концентрація тепловкладення, яскраве випромінювання дуги, застосування височастотного підпалу та стабільна подача захисного газу, що формує специфічний набір небезпек у разі відмов систем і зовнішніх впливів, які мають аналізуватися з урахуванням міжнародних стандартів машинобезпеки й робототехніки [54–57].

Нормативна база безпеки роботизованих зварювальних осередків спирається на вимоги ISO 12100 щодо систематичного ризик-орієнтованого проєктування машин, ISO 10218-1 та ISO 10218-2, які регламентують безпеку промислових роботів і їх інтеграцію в роботизовані системи, ISO 13849-1 та IEC 62061 щодо безпечних частин систем керування, а також ISO/TS 15066 для колаборативних роботів [54–58]. Для зварювальних процесів додатково застосовуються стандарти,

що стосуються зварювальних аерозолів, вентиляції, класифікації процесів та вимог до персоналу, зокрема ISO 4063, ISO 15011, ISO 9606 та ISO 14731 [59–61]. У контексті надзвичайних умов (раптове зникнення захисного газу, відмова системи охолодження, пожежа, відкриття огорожень, зіткнення робота з перешкодою, відключення електроживлення) ці стандарти визначають цільові вимоги до функціональної безпеки: наявність аварійної зупинки, блокувань доступу, категорій зупинки за ІЕС 60204-1, захисту від несподіваного пуску, а також достатній рівень надійності функцій безпеки (Performance Level) для усіх критичних сценаріїв.

Процес промислового роботизованого TIG зварювання застосовують переважно для тонколистової нержавіючої сталі, кольорових металів та високоякісних стикових і кутових швів, де визначальними є стабільність дуги, точність траєкторії та відсутність бризок. Система, як правило, включає джерело струму постійного або змінного струму з режимом постійного струму, високочастотний або контактний підпал дуги, пальник з водяним або газовим охолодженням, систему подачі присадкового дроту (за потреби) та газову систему для подачі аргону або його сумішей [59]. Робот виконує високоточне позиціонування пальника відносно шва, а взаємодія між системою керування робота й джерелом зварювального струму здійснюється через спеціалізовані інтерфейси. При цьому в надзвичайних умовах важливо забезпечити одночасний перехід у безпечний стан як механічної, так і електротехнічної частини комплексу: зупинку рухів робота відповідно до вимог ISO 10218, миттєве вимкнення зварювального струму, відсікання високочастотного генератора та контрольоване закриття газових клапанів [54–56].

У порівнянні з традиційним роботизованим MIG/MAG зварюванням (процеси 135/136/138 за ISO 4063) профіль небезпек TIG процесу має суттєві відмінності. У MIG/MAG використовується плавкий електрод, висока швидкість наплавлення, значна кількість бризок та інтенсивне утворення зварювальних аерозолів, що

підвищує ризики займання, опіків та впливу аерозолів на здоров'я персоналу [59; 60]. Тому в осередках MIG/MAG пріоритетними стають вимоги до систем видалення диму, протипожежного захисту, екранів від бризок, захисту від контакту зі стрічкою дроту та рухомими частинами механізму подачі. Натомість TIG характеризується мінімальною кількістю бризок, нижчою швидкістю наплавлення, але більш концентрованою дугою, більшою яскравістю випромінювання та використанням високочастотного підпалу, який створює додаткові електромагнітні та ізоляційні ризики [61]. Це означає, що для TIG у надзвичайних умовах критичними стають питання електробезпеки, контроль ізоляції, екранування від високочастотних складових струму, попередження пробоя при пошкодженні кабелів та пальників, а також запобігання неконтрольованому підпалу дуги при відмові системи керування.

Особливості промислового роботизованого TIG процесу при роботі з тонколистовою нержавіючою сталлю посилюють чутливість до будь-яких відхилень траєкторії та режимів. Невелике зміщення пальника, зупинка або “провал” швидкості робота, втрата захисного газу або локальне забруднення можуть призводити до прожогів, локальних перегрівів, утворення окалини, пор та тріщин. У нормальних режимах такі дефекти сприймаються як технологічний брак, проте в надзвичайних умовах (наприклад, при відмові системи охолодження пальника, обриві шланга газу, некоректній роботі вентиляції) вони можуть супроводжуватися різким локальним перегрівом, розбризкуванням розплаву, пробоем ізоляції, утворенням озону та оксидів азоту в локальних концентраціях, небезпечних для персоналу [59]. Тому системи контролю TIG осередку мають включати не лише загальні аварійні вимикачі, а й моніторинг витрати та тиску захисного газу, температури охолодження пальника, стану вентиляції, а також логіку “м'якого” завершення дуги, яка при зникненні критичних ресурсів переходить у безпечний режим без додаткових термічних ударів по матеріалу.

У випадку надзвичайних ситуацій у роботизованих зварювальних осередках особливе значення має інтеграція вимог ISO 12100 щодо процедурної та організаційної частини безпеки. Ризик-орієнтований підхід передбачає ідентифікацію типових сценаріїв: раптове відключення електроживлення, відмова системи гальмування робота, зіткнення з неконтрольованою перешкодою, відчинення огороження в автоматичному режимі, розрив шланга охолодження, пожежа поблизу оснастки, витік газу з балона, відмова газових клапанів у відкритому стані тощо. Для кожного сценарію оцінюються ймовірність, тяжкість наслідків і можливість виявлення, після чого формуються вимоги до функцій безпеки: категорія зупинки (0 чи 1), необхідний рівень надійності PLr, періодичність тестування, вимоги до діагностики [54; 55]. У разі TIG процесу частина цих функцій безпосередньо стосується джерела зварювального струму та високочастотного підпалу: при аварійній зупинці не повинно бути можливим неконтрольоване “підпалювання” дуги навіть за наявності залишкових напруг на клеммах або повторного подавання енергії.

Порівнюючи вимоги до безпеки при роботизованому TIG та MIG/MAG зварюванні, доцільно підкреслити, що для MIG/MAG основними є ризики пожежі, опіків і механічних травм від бризок та металевих частинок, тоді як для TIG істотно зростає роль електробезпеки, стабільності систем охолодження, контролю за концентрацією захисних газів і захисту від яскравого оптичного випромінювання. У надзвичайних умовах це проявляється по-різному: при відмові вентиляції MIG/MAG осередок швидко накопичує аерозолі та дим, при цьому TIG осередок у відносно короткий проміжок часу може створювати критичні локальні концентрації аргону або гелію внизу робочого простору, що призводить до ризику асфіксії для персоналу при потраплянні в небезпечну зону [60]. Відповідно, вимоги до газової безпеки, розташування витяжних систем, датчиків контролю атмосфери та логіки

блокування запуску осередку є більш жорсткими для TIG, особливо при використанні важких інертних газів у замкнених або заглиблених робочих об'ємах.

Важливою складовою загальної безпеки у надзвичайних умовах є тип використовуваного робота — промисловий шестиосьовий чи колаборативний. Промислові зварювальні роботи розраховані на роботу з високими швидкостями, значними прискореннями та масами інструменту, тому концепція безпеки базується на фізичному відокремленні людини від робочої зони за допомогою огорожень, блокувальних замків, світлових завіс, сканерів і систем моніторингу зони [54; 56]. У надзвичайних ситуаціях основним механізмом є швидкий перехід у безпечний зупинений стан з відключенням енергії приводів і дуги. Безпосередній контакт людини з рухомим роботом у автоматичному режимі вважається неприпустимим, а обслуговування здійснюється у спеціальному режимі зниженої швидкості із застосуванням “deadman”-пристрою та обмеженням доступу.

Колаборативні роботи, навпаки, призначені для безпосереднього співіснування з людиною в одній робочій зоні. Відповідно до ISO/TS 15066, для них задаються граничні значення сил і енергії при зіткненнях, вимоги до обмеження швидкості та моментів, а також режими безпечного моніторингу відстані між роботом і людиною [57]. У випадку колаборативного зварювання, особливо TIG, поєднання джерела інтенсивної дуги з колаборативним роботом створює особливий профіль ризиків. Навіть якщо механічна взаємодія відповідає вимогам power-and-force-limiting, сама зварювальна дуга, гарячий метал, ультрафіолетове випромінювання та аерозолі створюють небезпеки, які не можуть бути усунені лише за рахунок “колаборативності” приводу. Тому на практиці колаборативні зварювальні осередки часто реалізують гібридну концепцію: у режимі навчання та налаштування робот працює як колаборативний, а в автоматичному зварюванні зона дуги додатково екранується, використовуються місцеві витяжні пристрої, блокування й сигнальні системи, що наближає їх до безпекового профілю

промислових роботів [58]. У надзвичайних умовах це означає необхідність синхронізованої реакції як систем машинобезпеки робота, так і зварювального обладнання: при виявленні контакту чи небезпечного зближення робот знижує швидкість або зупиняється, а джерело струму переходить у безпечний стан з відключенням дуги.

Окрему групу заходів безпеки становлять організаційні й процедурні рішення. До них належать навчання персоналу щодо дій у надзвичайних ситуаціях, регламенти входу в осередок, перевірки працездатності аварійних вимикачів і блокувальних пристроїв, періодичні випробування функцій безпеки, а також розроблення інструкцій з урахуванням конкретних сценаріїв, характерних для TIG зварювання. Для роботизованих TIG осередків важливим є періодичний контроль стану зварювальних кабелів, шлангів охолодження та газу, герметичності з'єднань, працездатності датчиків потоку, тиску й температури. Належна організація зберігання балонів та їх кріплення, чітка індикація видів газів, наявність систем виявлення витоків і пожежної сигналізації суттєво знижують ризики в надзвичайних ситуаціях.

Технічні рішення щодо підвищення безпеки у надзвичайних умовах в роботизованому TIG зварюванні включають застосування безпечних модулів керування зварювальним джерелом, які здійснюють апаратне відключення струму й високочастотного підпалу при активації будь-якої з функцій аварійної зупинки або відкритті огорожень; використання систем моніторингу стану вентиляції та блокування запуску осередку при недостатній інтенсивності витяжки; інтеграцію датчиків диму, температури та газу із загальноцеховими або локальними системами пожежогасіння. Для компенсації можливих відмов механічних гальм роботів у разі відключення живлення застосовують комбіновані рішення: проектування оснастки таким чином, щоб деталі не могли впасти на операторську зону, резервування опор, розміщення осередку з урахуванням потенційної траєкторії падіння елементів.

ВИСНОВКИ

1. Узагальнюючи, можна зазначити, що TIG зварювання нержавіючої сталі характеризується стабільною дугою, відсутністю бризок, можливістю тонкого дозування теплової енергії та високою якістю формування шва, що забезпечує підвищену корозійну та втомну довговічність з'єднань. У роботизованому виконанні ці технологічні переваги підсилюються стабільністю траєкторії, цифровим керуванням параметрами та інтеграцією з системами технічного зору і контролю довжини дуги. Порівняння з традиційним роботизованим MIG/MAG демонструє, що при зварюванні тонколистової нержавіючої сталі вирішальними стають не номінальні швидкості зварювання, а повний час циклу, частка переробок і обсяг післяопераційних робіт. Саме в цих показниках роботизований TIG часто забезпечує перевагу, що обґрунтовує його використання як базової технології для відповідальних, корозійно- та гігієнічно критичних конструкцій із нержавіючих сталей.

2. Кращі практики використання TIG зварювання тонколистової нержавіючої сталі ґрунтуються на системному керуванні тепловим циклом, зоною термічного впливу та залишковими деформаціями. Низьке й кероване тепловкладення, імпульсний режим, якісний кореневий захист, оптимізована оснастка й послідовність зварювання дають змогу отримувати вузьку ЗТВ з сприятливим структурним станом і мінімальними залишковими напруженнями. У роботизованому виконанні ці переваги підсилюються високою повторюваністю процесу та можливостями цифрового моніторингу, що забезпечує стабільну якість швів і геометрії виробів у серійному виробництві. Порівняно з іншими дуговими процесами, TIG демонструє найкращий баланс між якістю з'єднання, корозійною стійкістю, деформаційною стабільністю та технологічною керованістю для тонколистової нержавіючої сталі, що й обґрунтовує його застосування як базової технології в критичних галузях.

3. Параметри TIG-зварювання для тонколистової нержавіючої сталі в роботизованому виконанні визначаються вимогами до проплавлення, мінімізації

деформацій і забезпечення чистоти поверхні. Для аустенітної сталі типу AISI 304 та 304L товщиною 1,0 мм у стиковому з'єднанні без присадки або з мінімальною присадкою раціонально застосовувати постійний струм прямої полярності на електроді (DCEN) з діапазоном струму 45–65 А, напругою дуги близько 10–12 В та швидкістю зварювання 0,25–0,45 м/хв, що відповідає 4,2–7,5 мм/с. Для товщини 1,5 мм типовим є струм 70–95 А при швидкості 0,20–0,35 м/хв, залежно від зазору та схеми притиску. Кут нахилу пальника від нормалі до поверхні зазвичай підтримують у межах 10–15°, а довжину дуги стабілізують на рівні 1,5–2,0 мм, оскільки зростання довжини дуги збільшує ширину теплового впливу та знижує концентрацію тепла в корені, що підвищує ризик непровару при стабільному зовнішньому валику.

4. Для зниження середнього тепловкладення доцільним є імпульсний режим TIG, який особливо ефективний у роботизованих системах завдяки повторюваності синхронізації струму і переміщення. Для тонкого листа 1,0–1,2 мм практично обґрунтованими є такі орієнтири: піковий струм 80–95 А, базовий струм 25–35 А, частота 2–4 Гц, відносна тривалість імпульсу 35–50%. Така імпульсація забезпечує періодичне формування ванни з частковим охолодженням між імпульсами, що зменшує короблення і стабілізує ширину шва при коливаннях тепловідведення. У роботизованому виконанні це безпосередньо пов'язано з продуктивністю, оскільки зменшення деформацій скорочує час на правку та підгонку в подальших складальних операціях і знижує ймовірність переробок через геометричні невідповідності.

5. Ключова перевага сучасних методів дослідження якості швів роботизованого TIG для тонколистової нержавіючої сталі полягає у переході від контролю результату до контролю причин. Тепловізійні методи відображають енерговкладення та умови тверднення через просторово-часові профілі випромінювання, а високошвидкісні камери фіксують динаміку дуги та ванни, яка породжує відхилення якості. Поєднання цих методів із нормативними післяопераційними випробуваннями дозволяє одночасно забезпечити відповідність стандартам і підвищити надійність серійного виробництва за

рахунок зменшення браку, переробок та прихованих дефектів, що є визначальним для довговічності та експлуатаційної стійкості обладнання

6. Структурні зміни й деформації тонколистових нержавіючих сталей, отриманих роботизованим TIG зварюванням, характеризуються поєднанням дрібнозернистого аустенітно-феритного зварного металу, обмеженої за шириною та інтенсивністю зони термічного впливу, помірних залишкових напружень і низької коробленості. У таких умовах механічні властивості шва й ЗТВ залишаються порівнянними з властивостями основного металу, а відмінності, які виникають, не знижують, за умови раціонального підбору режимів, несучу здатність та втомну довговічність конструкцій. Це обґрунтовує застосування роботизованого TIG як базової технології для відповідальних тонколистових нержавіючих виробів, де якість поверхні, корозійна стійкість і стабільність геометрії є критичними експлуатаційними вимогами.

7. Використання робота FANUC ARC Mate/10-16D у поєднанні з джерелом Fronius MagicWave 3000 для роботизованого TIG-зварювання тонколистової нержавіючої сталі забезпечує технологічні передумови для високої повторюваності якості, якщо параметри дуги, газового захисту і руху узгоджені з величиною тепловкладення та з урахуванням тонкого перерізу деталі. Визначальними параметрами залишаються стабільність довжини дуги, швидкість ведення та імпульсні режими струму, які зменшують деформації і підвищують стійкість до коливань тепловідведення. Для моделювання та подальшої оптимізації процесу доцільно використовувати погонну енергію як інтегральний показник впливу режимів на формування і деформації, а також закладати в модель механізми локального зниження швидкості та їхній вплив на ризик прожогу. Саме таке поєднання кінематичної точності робота, керованості джерела живлення та технологічно обґрунтованих режимів формує практичну основу для відтворюваного роботизованого TIG-зварювання.

8. Порівняння TIG з роботизованим MIG/MAG показує, що зміна процесу зварювання змінює структуру пріоритетів безпеки: для MIG/MAG критичнішими

стають аерозолі, бризки й пожежні ризики, тоді як для TIG зростає значущість екранування оптичного випромінювання, контролю газових компонентів та електричних аспектів запалювання дуги. Колаборативні роботи можуть бути корисними для гнучкості налаштування, але не усувають специфічних небезпек зварювання, тому вимоги до огороження та колективного захисту залишаються ключовими для забезпечення стабільної й надійної експлуатації роботизованих TIG-осередків.

9 Безпека у надзвичайних умовах при роботизованому TIG зварюванні формується на перетині трьох груп чинників: фізичних особливостей процесу TIG, архітектури роботизованої системи (промислової чи колаборативної) та вимог міжнародних стандартів до систем машинобезпеки. На відміну від роботизованого MIG/MAG зварювання, де домінують ризики пожежі, бризок та інтенсивних аерозолів, у TIG осередках ключовими стають електробезпека, стабільність газо- та водопостачання, управління оптичним випромінюванням і контроль над можливим накопиченням інертних газів. Колаборативні зварювальні рішення не знімають цих ризиків, а лише модифікують вимоги до механічної взаємодії робота з людиною, залишаючи актуальною потребу у повноцінних системах захисту дуги й робочої зони. Використання ризик-орієнтованого підходу згідно з ISO 12100, реалізація функцій безпеки відповідно до ISO 10218, ISO 13849 та ISO/TS 15066, а також врахування специфіки TIG процесу дозволяють сформувати роботизовані зварювальні осередки, здатні зберігати прийнятний рівень ризику навіть у надзвичайних умовах експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ліппольд Дж. С., Котецькі Д. Дж. Металургія зварювання та зварюваність нержавіючих сталей : монографія. Hoboken : Wiley-Interscience, 2005. 376 с.
2. Коу С. Металургія зварювання : навч. посіб. 2-ге вид. Hoboken : John Wiley & Sons, 2003. 461 с.
3. Ланкастер Дж. Ф. Металургія зварювання : монографія. 6-те вид. Cambridge : Woodhead Publishing, 1999. 466 с.
4. 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.
5. ISO 17637:2016. Non-destructive testing of welds. Visual testing of fusion-welded joints. Geneva : ISO, 2016. 20 p.
6. ISO 3834-2:2005. Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Part 2: Comprehensive quality requirements. Geneva : ISO, 2005. 16 p.
7. EN 1011-3:2000. Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Part 3: Arc welding of stainless steels. Brussels : CEN, 2000. 72 p.
8. Седрікс А. Дж. Корозія нержавіючих сталей : монографія. 2-ге вид. New York : John Wiley & Sons, 1996. 437 с.
9. Cary H. B., Helzer S. C. Modern Welding Technology. 6th ed. Upper Saddle River : Pearson, 2005. 1152 p.
10. AWS D1.6/D1.6M:2020. Structural Welding Code. Stainless Steel. Miami : American Welding Society, 2020. 224 p.
11. ISO 5817:2014 Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections. Geneva : International Organization for Standardization, 2014. 27 p.
12. ISO 17637:2016 Non-destructive testing of welds. Visual testing of fusion-welded joints. Geneva : International Organization for Standardization, 2016. 10 p.

13. ISO 3452-1:2013 Non-destructive testing. Penetrant testing. Part 1: General principles. Geneva : International Organization for Standardization, 2013. 22 p.
14. ISO 17636-2:2013 Non-destructive testing of welds. Radiographic testing. Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors. Geneva : International Organization for Standardization, 2013. 52 p.
15. Камель Г. І., Гасило Ю. А., Івченко П. С., Романюк Р. Я. Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю : навчальний посібник. Кам'янське : ДДТУ, 2018. 241 с.
16. Aberbach A., Benaissa A., Belkessa F. et al. Numerical and experimental modeling of thin stainless steel distortion during welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 121. P. 511–525. DOI:10.1007/s00170-022-08763-8.
17. Kou S. *Welding Metallurgy*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2003. 461 p.
18. Selvi S., Vishvakshnan A., Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology: an overview. *Defence Technology*. 2018. Vol. 14, No. 1. P. 28–44. DOI:10.1016/j.dt.2017.08.002.
19. Roy J. G., Yuvaraj N., Singh V. Effect of welding parameters on mechanical properties of cold metal transfer welded thin AISI 304 stainless steel sheets. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021. Vol. 74, No. 9. P. 2397–2408. DOI:10.1007/s12666-021-02308-4.
20. Lippold J. C., Kotecki D. J. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Hoboken: Wiley, 2005. 376 p.
21. Sahoo S. K., Pal T. K., Jha B. B. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32, No. 2. P. 613–621. DOI:10.1016/j.matdes.2010.08.034.
22. Sedriks A. J. *Corrosion of Stainless Steels*. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 1996. 464 p.

23. Fronius International. CMT – Cold Metal Transfer. Technical documentation and application notes. Fronius, 2019. 32 p.
24. Quiles R. M., Aldanondo E., Tabernero I. et al. Heat input reduction and distortion control in robotic GMAW processes using CMT. *Welding in the World*. 2019. Vol. 63, No. 3. P. 683–694. DOI:10.1007/s40194-018-00710-3.
25. Lindgren L. E. Finite element modelling and simulation of welding. Part 1: increased complexity. *Journal of Thermal Stresses*. 2001. Vol. 24, No. 2. P. 141–192.
26. Mochizuki M. Control of welding residual stress for ensuring integrity against fatigue and stress corrosion cracking. *Nuclear Engineering and Design*. 2012. Vol. 241, No. 2. P. 566–576.
27. Bala Srinivasan P., Ningshen S., Gnanamoorthy J. et al. Influence of welding processes on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of AISI 304 stainless steel weldments. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 209, No. 8. P. 3628–3639.
28. Gennari C., Forti M., Biffi C. A. et al. Fatigue behaviour of austenitic stainless steel welded joints produced by GMAW and CMT processes. *Procedia Structural Integrity*. 2017. Vol. 3. P. 215–222.
29. ISO 5817:2014 Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections. Geneva : International Organization for Standardization, 2014. 27 p.
30. ISO 17637:2016 Non-destructive testing of welds. Visual testing of fusion-welded joints. Geneva : International Organization for Standardization, 2016. 10 p.
31. ISO 3452-1:2013 Non-destructive testing. Penetrant testing. Part 1: General principles. Geneva : International Organization for Standardization, 2013. 22 p.
32. ISO 17636-2:2013 Non-destructive testing of welds. Radiographic testing. Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors. Geneva : International Organization for Standardization, 2013. 52 p.

33. Камель Г. І., Гасило Ю. А., Івченко П. С., Романюк Р. Я. Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю : навчальний посібник. Кам'янське : ДДТУ, 2018. 241 с.
34. Zhang Y. M., ed. Real-Time Weld Process Monitoring. Cambridge : Woodhead Publishing, 2008. 299 p. DOI: 10.1533/9781845694401.
35. Alfaro S. C. A., Diaz V. M. An infrared sensor for on-line welding defects detection in GTAW. *Sensors*. 2010. Vol. 10. P. 5962–5974. DOI: 10.3390/s100605962.
36. Saeed G., Zhang Y. M. Weld pool surface depth measurement using a calibrated camera and structured light. *Measurement Science and Technology*. 2007. Vol. 18, no. 8. P. 2570–2578. DOI: 10.1088/0957-0233/18/8/033.
37. Saint Yves S., Fedrigo O., Recolin J. Infrared Thermography inspection during welding process. *ECNDT 2023*. 2023. 6 p. DOI: 10.58286/280712.
38. Guest S. D., Gött G., Dapp G., Chapuis J., Mendez P. F. High-Speed Videography of Welding. Part 1: Fundamentals. *Welding Journal*. 2025. Vol. 104. P. 467-s–483-s. DOI: 10.29391/2025.104.036.
39. Zhang Y. M., ed. Real-Time Weld Process Monitoring. Cambridge : Woodhead Publishing, 2008. 299 p. DOI: 10.1533/9781845694401.
40. Alfaro S. C. A., Diaz V. M. An infrared sensor for on-line welding defects detection in GTAW. *Sensors*. 2010. Vol. 10. P. 5962–5974. DOI: 10.3390/s100605962.
41. Saeed G., Zhang Y. M. Weld pool surface depth measurement using a calibrated camera and structured light. *Measurement Science and Technology*. 2007. Vol. 18, no. 8. P. 2570–2578. DOI: 10.1088/0957-0233/18/8/033.
42. Saint Yves S., Fedrigo O., Recolin J. Infrared Thermography inspection during welding process. *ECNDT 2023*. 2023. 6 p. DOI: 10.58286/280712.
43. Guest S. D., Gött G., Dapp G., Chapuis J., Mendez P. F. High-Speed Videography of Welding. Part 1: Fundamentals. *Welding Journal*. 2025. Vol. 104. P. 467-s–483-s. DOI: 10.29391/2025.104.036.

44. Cary H. B., Helzer S. C. Modern Welding Technology. 6th ed. Upper Saddle River : Pearson, 2005. 1152 p.
45. Kou S. Welding Metallurgy. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2003. 461 p.
46. Lancaster J. F. The Physics of Welding. 2nd ed. Oxford : Pergamon Press, 1986. 340 p.
47. 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.
48. ISO 3834-2:2005 Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Part 2: Comprehensive quality requirements. Geneva : ISO, 2005. 16 p.
49. EN 1011-3:2000 Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Part 3: Arc welding of stainless steels. Brussels : CEN, 2000. 72 p.
50. AWS D1.6/D1.6M:2020 Structural Welding Code. Stainless Steel. Miami : American Welding Society, 2020. 224 p.
51. Zhang Y. M., ed. Real-Time Weld Process Monitoring. Cambridge : Woodhead Publishing, 2008. 299 p. DOI: 10.1533/9781845694401.
52. FANUC Corporation. ARC Mate Series: Operator's Manual. Oshino-mura : FANUC Corporation, 2019. 410 p.
53. Fronius International GmbH. MagicWave 3000: Operating Instructions. Wels : Fronius, 2018. 176 p.
54. ISO 10218-1:2011 Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 1: Robots. Geneva : International Organization for Standardization, 2011. 43 p.
55. ISO 10218-2:2011 Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 2: Robot systems and integration. Geneva : International Organization for Standardization, 2011. 72 p.
56. ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices. Collaborative robots. Geneva : International Organization for Standardization, 2016. 33 p.

- 57.ISO 12100:2010 Safety of machinery. General principles for design. Risk assessment and risk reduction. Geneva : International Organization for Standardization, 2010. 77 p.
- 58.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.
- 59.IEC 60204-1:2016 Safety of machinery. Electrical equipment of machines. Part 1: General requirements. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2016. 277 p.
- 60.ISO 14119:2013 Safety of machinery. Interlocking devices associated with guards. Principles for design and selection. Geneva : International Organization for Standardization, 2013. 68 p.
- 61.ISO 14118:2017 Safety of machinery. Prevention of unexpected start-up. Geneva : International Organization for Standardization, 2017. 11 p.
- 62.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.
- 63.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. 20 p.