

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут
Кафедра зварювання

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



з.т.н., доц. М.В. Матвієнко

«20» грудня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему:

Розроблення чисельної моделі теплових полів при дугових процесах
зварювання TIG, MIG і PAW

Виконав: студент VI курсу, групи 6121м
спеціальності 132 Матеріалознавство за
освітньо-професійною програмою Інжині-
ринг зварювання та споріднених процесів
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Єрмоченко Олексій Віталійович
(прізвище та ініціали)

Керівник Матвієнко Максим Валентинович
(прізвище та ініціали)

Рецензент Ярос Юрій Олександрович
(прізвище та ініціали)

Миколаїв - 2025 р.

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут

Факультет суднобудівний
Кафедра зварювання
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 132 Матеріалознавство
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма Інжиніринг зварювання та споріднених процесів
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ


Гарант освітньої програми
к.т.н., доц. М.В. Матвієнко
“ ” 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

студенту Єрмоченко Олексію Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення чисельної моделі теплових полів при дугових процесах зварювання TIG, MIG і PAW

керівник проекту Матвієнко Максим Валентинович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені розпорядженням ХННІ НУК від “17” жовтня 2025 року № 20

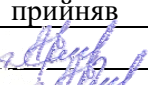
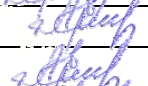
2. Строк подання студентом проекту 13 грудня 2025р. :

3. Вихідні дані до роботи Матеріал: сплав 1561 (AMg61), товщина 5 мм. Габаритні розміри: 200x200x5 мм. Макрошліфи зварних з'єднань виконаних TIG, MIG і PAW зварюванням.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд питань, пов'язаних з отриманням зварних з'єднань при дуговому зварюванні; 2. Вибір методу дослідження; 3. Розробка скінчено-елементної моделі; 4. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при дуговому зварюванні; 5. Охорона праці при TIG, MIG та PAW зварюванні.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Мета й задачі роботи; обробка експериментальних даних; Методика проведення моделювання; визначення геометричних параметрів зварних швів; математична модель; Результати моделювання; Загальні висновки

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Матвієнко М.В., к.т.н., доцент		
2	Матвієнко М.В., к.т.н., доцент		
3	Матвієнко М.В., к.т.н., доцент		
4	Матвієнко М.В., к.т.н., доцент		
5	Матвієнко М.В., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 17.10.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Вступ	24.10.2025	
2.	Огляд питань, пов'язаних з отриманням зварних з'єднань при дуговому зварюванні	07.11.2025	
3.	Вибір методу дослідження	17.11.2025	
4.	Розробка скінчено-елементної моделі	28.11.2025	
5.	Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при дуговому зварюванні	08.12.2025	
6.	Охорона праці при TIG, MIG та PAW зварюванні	10.12.2025	
7.	Оформлення пояснювальної записки	12.12.2025	

Студент

(підпис)

Єрмоченко О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Матвієнко М.В.

(прізвище та ініціали)

Анотація

У роботі розглянуто проблему вибору оптимальних режимів стикового зварювання тонколистових матеріалів, геометричні параметри яких регламентуються стандартами ДСТУ EN ISO 15614-2:2016 та ДСТУ EN ISO 9692-3:2019. Для конструкцій типу С4 основними характеристиками зварного шва є ширина шва (e), висота підсилення (g), ширина зворотного валика (e_1) та його висота (g_1). Незважаючи на значний обсяг наукових та практичних досліджень у сфері дугового зварювання, наявні дані не забезпечують можливості раціонального та обґрунтованого вибору режимів, які одночасно гарантують високу продуктивність, мінімальні габарити шва та оптимальне співвідношення його ширини до ширини зворотного валика.

Враховуючи, що фінальне коригування режимів часто проводиться безпосередньо на дороговартісних зварних вузлах, особливо актуальним є створення математичної моделі, яка дозволить визначати оптимальні параметри зварювання без додаткових експериментальних налаштувань. Це здатне суттєво зменшити витрати на технологічну підготовку виробництва.

Метою роботи було розробити чисельну модель, засновану на методі скінченних елементів, для моделювання теплових процесів зварювання неплавким електродом (TIG), імпульсно-дугового зварювання плавким електродом на зворотній полярності (MIG) і плазмового автоматичного зварювання з присадним дротом (PAW).

У представленій роботі виконано удосконалення технології стикового зварювання елементів з алюмінієвого сплаву 1561 (AMg6) товщиною 5 мм шляхом використання чисельного моделювання в скінчено-елементному програмному комплексі ANSYS/Multiphysics ver. 2024.

Ключові слова: стикове зварювання; тонколистові матеріали; теплові процеси; чисельне моделювання; метод скінченних елементів; алюмінієвий сплав; геометрія зварного шва.

Abstract

This work addresses the challenge of selecting optimal parameters for butt welding of thin-sheet materials, whose weld geometry is regulated by standards DSTU EN ISO 15614-2:2016 and DSTU EN ISO 9692-3:2019. For C4-type structures, the main weld characteristics include weld width (e), reinforcement height (g), root bead width (e_1), and root bead height (g_1). Despite the considerable amount of scientific and industrial research in arc welding, existing data do not allow for a well-founded and efficient selection of welding parameters that would simultaneously ensure high productivity, minimal weld dimensions, and an optimal ratio between weld width and root bead width.

Since the final adjustment of welding settings is often performed directly on costly structural components, the development of a mathematical model capable of determining optimal welding parameters without additional experimental calibration is of particular relevance. Such an approach can significantly reduce labor and financial costs associated with manufacturing process preparation.

The aim of this work was to develop a numerical model based on the finite element method to simulate thermal processes in tungsten inert gas welding (TIG), pulsed gas metal arc welding with reverse polarity (MIG), and plasma arc welding with filler wire (PAW). The proposed study focuses on improving the butt-welding technology for elements made of aluminum alloy 1561 (AMg6), 5 mm in thickness, by employing numerical modeling within the ANSYS/Multiphysics ver. 2024 finite element environment.

Keywords: butt welding; thin-sheet materials; thermal processes; numerical modeling; finite element method; aluminum alloy; weld geometry.

Зміст

Вступ	8
1. Огляд питань, пов'язаних з отриманням зварних з'єднань при дуговому зварюванні	10
1.1. Експериментальні дані та рекомендації щодо вибору основних параметрів режиму зварювання	10
1.2. Математичні моделі, побудовані на основі експериментальних даних про розміри зварного шва	11
1.3. Моделі аналітичного розрахунку температурних полів, засновані на теорії теплових полів М.М. Рикаліна	13
1.4. Моделювання геометрії зварного шва за допомогою чисельних методів.....	15
Переваги:.....	22
Обмеження:.....	22
1.5. Комп'ютерні технології прогнозування формування шва при дуговому зварюванні	28
Висновки та постановка задач дослідження	30
2. Вибір методу дослідження	34
2.1. Сучасні програмні комплекси для моделювання зварювання	34
2.2. Програмний комплекс ANSYS	38
2.3. Вибір типу скінченних елементів	41
Висновки	44
3. Розробка скінчено-елементної моделі	47
3.1. Скінчено -елементна модель	47
3.2. Використані при моделюванні рівняння і граничні умови	49
Висновки	51
4. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при дуговому зварюванні..	53
4.1. Вихідні дані для моделювання	53
4.2. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при зварюванні неплавким електродом (TIG)	54

4.3. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності (MIG)	56
4.3. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом (PAW)	59
Висновки	61
5. Охорона праці при TIG, MIG та PAW зварюванні	64
Висновки	68
Загальні висновки	69
Література	71

Вступ

Розміри зварного шва при стиковому зварюванні тонколистових матеріалів регламентуються стандартами ДСТУ EN ISO 15614-2:2016 як основний норматив для атестації технології зварювання, і ДСТУ EN ISO 9692-3:2019 — для рекомендацій щодо підготовки з'єднань. Для стикових з'єднань тонколистових конструкцій типу С4 встановлено такі основні геометричні параметри: e — ширина шва, g — висота підсилення зварного шва, e_1 — ширина зворотного валика, g_1 — висота зворотного валика.

Попри значний обсяг опублікованих наукових та виробничих даних, присвячених дуговому зварюванню, наявні результати досліджень здебільшого не дають можливості здійснити обґрунтований вибір параметрів режиму зварювання стикових з'єднань, який би одночасно задовольняв одну з ключових технологічних вимог: забезпечення максимальної продуктивності, мінімальної ширини зварного шва та підсилення, а також мінімального співвідношення ширини шва до ширини зворотного валика.

Зважаючи на те, що остаточне налаштування режимів зварювання нерідко здійснюється безпосередньо на готових дороговартісних вузлах, особливої актуальності набуває розроблення математичної моделі, здатної забезпечити розрахунок оптимальних параметрів режиму зварювання без необхідності подальшого експериментального коригування. Це дозволить суттєво зменшити трудові та фінансові витрати на технологічну підготовку виробництва.

Представлена робота присвячена удосконаленню технології стикового зварювання елементів з алюмінієвого сплаву 1561 (АМг6) товщиною 5 мм із використанням чисельного моделювання на основі скінчено-елементного комплексу ANSYS/Multiphysics ver. 2024.

					MP 8.132.6121м.04.05.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ Документа	Підпис			8

					МР 8.132.6121м.04.05.01 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Огляд питань, пов'язаних з отриманням зварних з'єднань при дуговому зварюванні Лім.Арк.Аркуші ХННІ НУК		
Розробив		Вдовиченко С.В.					
Перевірює		Матвієнко М.В.					
Рецензент							
Н. Контр.		Матвієнко М.В.					
Зав. каф.		Матвієнко М.В.					

1. Огляд питань, пов'язаних з отриманням зварних з'єднань при дуговому зварюванні

1.1. Експериментальні дані та рекомендації щодо вибору основних параметрів режиму зварювання

У нормативних документах, довідкових виданнях та навчальних посібниках широко представлені рекомендовані режими дугового зварювання (ДЗ) різних матеріалів [1–3]. Проте використання цих даних на практиці часто ускладнюється тим, що для конкретного матеріалу певної товщини рекомендованому значенню швидкості зварювання відповідає відносно вузький діапазон зварювального струму. Його відхилення може спричиняти формування неприпустимої геометрії зварного шва, виникнення прожогу або появу надмірного підрізу [2].

Аналіз літературних даних свідчить, що під час зварювання листових конструкцій відмінності в рекомендованих значеннях зварювального струму можуть досягати 150% [3]. Така варіативність очевидно обумовлена впливом неконтрольованих технологічних факторів, які призводять до значних коливань розмірів зварних швів. Це, у свою чергу, збільшує витрати часу та матеріальних ресурсів, необхідних для відпрацювання режимів зварювання нових виробів, адже потребує проведення додаткових попередніх експериментів [4].

У процесі освоєння виробництва нових конструкцій виникає потреба підбору режимів зварювання із мінімально можливою кількістю експериментів. Нерідко такі експериментальні роботи проводять безпосередньо на готових деталях, що підвищує ризик браку, збільшує собівартість продукції та знижує загальну ефективність виробництва. З огляду на це особливо актуальним є формування бази експериментально обґрунтованих режимів зварювання для різних технологічних конфігурацій, які забезпечують отримання зварних швів із геометричними параметрами, регламентованими для стикового з'єднання типу С4 [1,5].

Враховуючи значну трудомісткість експериментального визначення залежності між параметрами режиму ДЗ та геометричними характеристиками шва,

доцільно використовувати математичні моделі процесу зварювання, представлені у сучасній науковій літературі [6–8]. Такі моделі дозволяють встановити зв'язок між параметрами режиму дугового зварювання та формою і розмірами шва, що істотно знижує потребу у проведенні експериментальних досліджень та підвищує ефективність технологічної підготовки виробництва.

1.2. Математичні моделі, побудовані на основі експериментальних даних про розміри зварного шва

Для практичного застосування особливий інтерес становлять математичні моделі, що узагальнюють експериментальні дані й подають результати у вигляді рівнянь регресії або степеневих залежностей. Подібні статистичні моделі формування шва під час дугового зварювання наведені у роботах [8–11]. Вони є зручними для розрахунку параметрів режиму зварювання та забезпечують прийнятну точність (близько 8–10%). Проте їх застосовність обмежується діапазоном параметрів, який був передбачений під час побудови моделі.

Ступінь впливу вхідних параметрів на формування зворотного валика при стиковому аргонодуговому зварюванні досліджено в роботі [8]. Аналіз літературних та патентних джерел дав змогу виділити сім ключових факторів, що визначають геометрію стикового шва під час зварювання алюмінієвих сплавів: зварювальний струм X_1 , швидкість зварювання X_2 , довжина дуги X_3 , швидкість подавання присадного дроту X_4 , зміщення електрода від стику X_5 , зміщення кромки під час складання X_6 . Експерименти проведено за планом дробового факторного експерименту; для зразків зі сплаву АМг6 (2 мм) вимірювали ширину зварного шва зі зворотного боку e_1 . За результатами статистичного опрацювання отримано регресійне рівняння:

$$e_1 = 4.2 + 3.1X_1 - 1.25X_2 + 0.13X_3 - 0.0125X_4 - 0.05X_5 - 0.3X_6.$$

Однак автори не подали діапазонів варіювання факторів і точності їх стабілізації під час зварювання.

У роботі [9] здійснено спробу узагальнення наявних у літературі експериментальних даних щодо основних параметрів режимів дугового

зварювання різних металів неплавким електродом у захисних газах. У результаті статистичної обробки встановлено залежності між зварювальним струмом $I_{зв}$, швидкістю зварювання $V_{зв}$ та товщиною матеріалу δ . Для алюмінію з присадним дротом отримано:

$$I_{зв}=36,97 \cdot \delta^{0.78} \cdot V_{зв}^{0.29},$$

а для титану без присадного дроту:

$$I_{зв}=19,2 \cdot \delta \cdot V_{зв}^{0.408}.$$

Проте у роботі не уточнено, чи виконувалось зварювання на мідній підкладці, чи «на вазі», що обмежує практичну інтерпретацію результатів.

У статті [10] на основі статистичних методів побудовано регресійні моделі дугового зварювання з урахуванням численних факторів та проведено оптимізацію параметрів. Як критерії оптимізації використовували сталість геометричних параметрів шва (ширина e , висота зворотного валика g , посилення шва g). Значущими факторами визначено зварювальний струм та функціональну залежність $1/\sqrt{V_{зв}}$. Однак у роботі не наведено кількісних зв'язків між параметрами режиму та геометрією шва, що зменшує прикладну цінність моделей.

Проблема зменшення кількості необхідних експериментів при одночасному великому числі вхідних параметрів частково розв'язується за допомогою методу ортогональних матриць, запропонованого Тагучі [11]. У цьому підході результати випробувань перетворюються у відношення сигнал/шум (S/N), а оптимальні значення параметрів відповідають максимальному співвідношенню S/N. Експерименти проводили на алюмінієвих пластинах 1100 товщиною 1,6 мм за таких параметрів: $l_d=2.4 \dots 3.2$ мм, $V_{зв}=24 \dots 46$ см/хв, $V_{п.п.}=15 \dots 25$ см/хв, $I_{зв}=80 \dots 110$ А. Після статистичного аналізу (ANOVA) автори не подали оцінки збігу експериментальних і розрахункових результатів та не навели критеріїв оптимізації, що зменшує відтворюваність моделі.

Узагальнюючи наведене, можна зробити висновок, що побудова математичних моделей, які описують взаємозв'язок між параметрами геометрії зварного шва та режимами дугового зварювання, за допомогою суто регресійних залежностей, що не враховують фізичної природи процесів, пов'язана з рядом труднощів:

1. необхідністю проведення великої кількості експериментів;
2. обмеженням моделей певним матеріалом та конкретним типом шва;
3. низькою точністю моделей у широких діапазонах технологічних параметрів.

1.3. Моделі аналітичного розрахунку температурних полів, засновані на теорії теплових полів М.М. Рикаліна

Аналітичні моделі температурних полів при зварюванні відіграють ключову роль у прогнозуванні геометрії зварного шва, оцінюванні термічного впливу на зону термічного впливу (ЗТВ) та визначенні напружено-деформованого стану конструкцій після термоциклічного навантаження. Одним із фундаментальних підходів у теоретичній термомеханіці зварювання є теорія теплових полів М. М. Рикаліна, що стала базою для подальших розрахункових та чисельних методів у галузі зварювальних технологій.

Теорія Рикаліна сформувала універсальну систему опису процесів перенесення тепла в зоні дії зварювального теплового джерела. Вона ґрунтується на ідеї аналізу теплового поля рухомого джерела тепла з урахуванням фізичних властивостей матеріалу, умов тепловідведення та кінематичних параметрів процесу зварювання. У її основі — принцип теплового балансу, що дає змогу визначити характер розподілу температури у будь-якій точці металу під час зварювання. Розвиток і модифікації цих моделей забезпечили можливість розрахунків для різних видів дугового, лазерного та гібридного зварювання.

Однією з ключових ідей Рикаліна є формування еталонного теплового поля, яке дозволяє зіставляти різні режими зварювання за єдиними критеріями — ефективністю нагрівання, глибиною проплавлення та шириною термічно впливної зони. Таке нормоване представлення теплових процесів забезпечило розвиток низки аналітичних методик, що використовуються як у дослідницькій, так і в інженерній практиці.

Подальший розвиток положень Рикаліна здійснювали дослідники в Україні, Європі та США, що призвело до формування декількох напрямів аналітичного моделювання температурних полів. Зокрема, українська школа зварювання,

представлена роботами Є. О. Патона, Б. Є. Патона та їхніх послідовників, активно використовує закономірності теплових полів для оптимізації дугових процесів та автоматизованих технологій зварювання. У своїх працях українські дослідники розширили застосування теорії Рикаліна до задач багатопарового зварювання, зварювання великогабаритних конструкцій та роботи зі складними алюмінієвими сплавами [12; 13].

Значний внесок у розвиток теорії теплових полів зробила й англомова дослідницька школа, яка зосередила увагу на аналітичних та напіваналітичних підходах до моделювання зварювальних процесів. Так, у працях J. Goldak, A. Chakravarti та M. Bibby було запропоновано узагальнені моделі теплового джерела, які стали стандартом для подальших аналітичних та чисельних моделей, включно з програмними комплексами ANSYS, ABAQUS та SYSWELD [14]. Хоча вони й відрізняються від класичної моделі Рикаліна, проте також спираються на ідею аналізу рухомого джерела тепла та принципи термічної рівноваги.

Окрему увагу привертають дослідження з моделювання теплових процесів у зварюванні алюмінієвих сплавів, зокрема сплавів серії АМг, які характеризуються високою теплопровідністю, що суттєво впливає на параметри теплового поля. Роботи з цієї проблематики демонструють ефективність використання аналітичних моделей Рикаліна для оцінки ширини ЗТВ, теплових деформацій та оптимізації параметрів зварювання тонких і середніх листових конструкцій [15].

Роботи останніх десятиліть значною мірою присвячені інтеграції аналітичних рівнянь теплових полів у чисельні моделі, що дозволяє поєднати переваги класичних рішень з можливостями скінченноелементного аналізу. Це сприяло значному зростанню точності прогнозування температурних циклів і структури металу шва, а також дозволило моделювати процеси з урахуванням фазових перетворень у складнолегованих та алюмінієвих сплавах [16; 17].

Загалом, теорія теплових полів М. М. Рикаліна залишається фундаментальною основою сучасного аналітичного та чисельного моделювання процесів зварювання. Її принципи використовуються в розрахунках температурних циклів, теплового впливу, утворення дефектів, прогнозуванні залишкових напружень, а також у методиках оптимізації режимів зварювання та

створення цифрових двійників технологічних процесів. Впровадження цих моделей у сучасні програмні комплекси дозволяє здійснювати технологічну підготовку виробництва з мінімальною кількістю експериментів, що значно зменшує витрати часу та ресурсів.

На підставі проведеного вище огляду можна зробити висновок про те, що аналітичні описи температурних полів, що створюються рухомими розподіленими і зосередженими джерелами нагріву, можуть забезпечити задовільну точність тільки при використанні експериментальних даних, перш за все щодо ефективного ККД зварювальної дуги і коефіцієнту зосередженості для розподіленого джерела нагріву. Ці додаткові параметри ускладнюють модель і для їх визначення необхідно проведення експериментів для конкретних умов зварювання.

1.4 Моделювання геометрії зварного шва за допомогою чисельних методів

Визначення параметрів теплового джерела під час моделювання зварювальних процесів є складним завданням, що зумовлено багатofакторною природою взаємодії реального джерела теплоти — електричної дуги, лазерного чи електронного променя — з металом. Через складність фізичних процесів, що супроводжують утворення зварювальної ванни, на практиці характеристики джерела нагріву часто встановлюють за геометричними параметрами отриманої ванни, отриманими експериментальним шляхом. Проте сучасні фізико-математичні підходи дають змогу істотно скоротити обсяги експериментальних робіт, водночас зменшуючи відповідні часові та матеріальні витрати.

У чисельному моделюванні температурних полів, зокрема при описі теплової дії зварювального джерела, найпоширенішими є метод скінченних елементів (МСЕ) та метод скінченних різниць (МСР). Порівняно з аналітичними моделями, побудованими на основі класичної теорії теплових полів, чисельні підходи мають низку суттєвих переваг. По-перше, теплофізичні властивості матеріалів можуть задаватися як функції температури, що забезпечує більшу

відповідність моделі реальним умовам нагріву та охолодження металу. По-друге, такі методи дозволяють розв'язувати задачі з тепловим контактом між різними елементами конструкції, що важливо для дослідження складних технічних систем. По-третє, чисельні схеми дають можливість цілеспрямовано керувати точністю розрахунку шляхом зміни параметрів розбиття моделі на скінченно-елементну сітку.

Для вибору раціональної моделі джерела нагріву доцільно розглянути основні типи теплових джерел, що застосовуються у моделюванні зварювальних процесів. Їхнє коректне відтворення визначає точність обчислення температурних полів, а відтак — прогнозування формування шва, напружено-деформованого стану та можливих дефектів у зоні зварювання.

1.4.1. Полуеліпсоїдальна модель Голдака

Полуеліпсоїдальна модель теплового джерела Голдака є однією з найпоширеніших та найобґрунтованіших моделей, застосовуваних у чисельному моделюванні зварювальних процесів. Її значення зумовлене тим, що традиційні аналітичні підходи, побудовані на основі класичних теорій теплових полів, здатні лише частково відображати складну просторово-часову структуру розподілу теплового потоку в зоні дії дуги або іншого концентрованого джерела енергії. Натомість модель Голдака дає можливість описати процес тепловкладення більш фізично коректно, враховуючи асиметрію теплового впливу перед та позаду дугового сліду, зміну об'єму розплавленої зони та просторову неоднорідність розподілу температури [18].

Основу моделі становить припущення, що тепловий потік від зварювального джерела поширюється в межах об'єму, форма якого наближено описується двома напівеліпсоїдами — переднім та заднім. Це дозволяє моделювати асиметрію процесу плавлення, властиву дуговому зварюванню, оскільки реальне джерело теплоти не є симетричним: його ефективність у напрямку руху дуги та позаду неї відрізняється. Саме введення двох різних напівоб'ємів дозволяє більш точно відтворити форму зони термічного впливу та зони сплавлення, що було підтверджено численними експериментальними дослідженнями та порівняльними

аналізами [19].

Однією з ключових переваг моделі Голдака є її універсальність. Вона може бути застосована для опису широкого спектра зварювальних процесів: дугового зварювання неплавким та плавким електродом, зварювання лазером і електронним променем, гібридного зварювання, а також наплавлення та пайки. При цьому налаштування параметрів моделі дозволяє враховувати як енергетичні характеристики процесу, так і геометрію ванни розплаву, що робить її придатною для досліджень з урахуванням різних матеріалів, типів швів та виробничих режимів [20].

У важливому аспекті модель Голдака вирізняється можливістю врахування просторової неоднорідності теплового потоку. Реальні зварювальні джерела, такі як дуга, характеризуються нерівномірним розподілом теплової енергії, зокрема інтенсивнішим нагрівом у центральній частині зони дії. Полуеліпсоїдна модель дозволяє відтворити цю властивість без необхідності описувати фізику дуги на мікрорівні, що спрощує моделювання і робить його доступним для практичного використання в інженерних задачах [21].

Особливе місце в застосуванні моделі Голдака займає можливість імітації нестационарних процесів теплопередачі. Оскільки зварювання є процесом, у якому джерело теплоти рухається, модель повинна коректно відображати зміну температури в кожній точці матеріалу в часі. Полуеліпсоїдальна модель дозволяє ефективно відтворювати не лише пікові температури, але й теплову історію матеріалу, яка є критично важливою для аналізу структурних перетворень, напружено-деформованого стану та появи залишкових напружень [22].

Важливо зазначити, що ефективність застосування моделі Голдака значною мірою залежить від точності вибору її параметрів. Коефіцієнти, що визначають форму переднього і заднього напівеліпсоїдів, повинні відповідати реальному процесу зварювання, що найчастіше визначається експериментально. Проте завдяки розвитку сучасних фізичних і комп'ютерних підходів з'являється можливість зменшувати кількість експериментальних вимірювань, мінімізуючи витрати та ризики, пов'язані зі зварюванням дорогих або відповідальних конструкцій [23].

Із розвитком програмних засобів моделювання, таких як ANSYS, Abaqus, SYSWELD, Simufact Welding, ця модель стала стандартом де-факто для розрахунків зварювальних температурних полів. Більшість сучасних пакетів вже містять реалізацію модельних функцій Голдака або дозволяють легко її задати через відповідні параметри. Таким чином, інженер отримує можливість виконувати високоточні розрахунки теплових полів навіть за відсутності повної інформації про фізичні властивості джерела теплоти [24].

Іншою суттєвою перевагою є те, що модель здатна відтворювати характерні особливості плавлення і кристалізації металу в зоні дії дуги, що є важливим для дослідження дефектів, таких як пори, гарячі тріщини, непровари та інші порушення структури. Можливість врахування змін теплофізичних властивостей матеріалу в залежності від температури дозволяє створювати точніші прогнози поведінки конструкції в процесі зварювання і після нього [25].

У науковій літературі модель Голдака розглядається як оптимальне поєднання простоти застосування та здатності до відтворення складних теплофізичних процесів. Її математичний апарат дозволяє адаптувати модель до широкого спектра задач від локального аналізу мікроструктурних змін до макрорівневих досліджень залишкових напружень і деформацій. У порівнянні з альтернативними моделями, такими як гаусівські або циліндричні моделі, полуеліпсоїдна модель забезпечує кращу відповідність експериментальним результатам та може бути налаштована практично для будь-якої технологічної схеми [26].

Разом з тим, для ефективного практичного застосування моделі Голдака важливо враховувати її обмеження. Наприклад, вона передбачає квазістаціонарний характер теплового джерела та не враховує окремих ефектів, пов'язаних із електромагнітною взаємодією дуги та зварювальної ванни. Крім того, параметри моделі мають статистичний характер, і для різних умов зварювання можуть суттєво відрізнятися. Проте ці недоліки не зменшують її значення, оскільки загалом модель забезпечує високий рівень точності для більшості інженерних і наукових задач [27].

Підсумовуючи, полуеліпсоїдна модель Голдака є сучасним інструментом

моделювання теплового процесу зварювання, що дозволяє отримувати високоточні результати без надмірного ускладнення математичного опису. Її широке застосування в наукових дослідженнях і промислових розрахунках підтверджує її ефективність і універсальність. Урахування асиметрії теплового потоку, можливість зміни параметрів джерела теплоти, відповідність експериментальним даним та зручність реалізації роблять модель Голдака основою сучасного чисельного аналізу зварювальних процесів як в Україні, так і за кордоном.

1.4.2. Модель подвійного еліпсоїда Голдака

Математичне моделювання теплових полів у процесах зварювання є одним із ключових напрямів підвищення керованості термічного циклу, якості формування шва та прогнозування структурно-фазових перетворень. Однією з найбільш універсальних і широко застосовуваних моделей локалізованого теплового джерела є модель подвійного еліпсоїда, запропонована Дж. Голдаком та співавторами наприкінці 1970-х – на початку 1980-х років [28–30]. Її поява стала відповіддю на необхідність точнішого опису теплової дії рухомого джерела, зокрема при дуговому зварюванні, де спостерігається суттєва асиметрія в напрямку наплавлення.

Модель Голдака належить до сімейства просторово-розподілених моделей теплового впливу, що дозволяють описувати об'ємне джерело теплоти на відміну від точкових та поверхневих моделей типу Розенталя. Її ключова перевага полягає у можливості реалістично відтворити форму зварювальної ванни та асиметрію температурних полів у передній та задній частині дуги. Саме ця асиметрія була недоступною для попередніх моделей та суттєво обмежувала точність чисельних розрахунків [31].

Класичні аналітичні рішення рівнянь теплопровідності, такі як модель Розенталя, розглядають точкове або лінійне джерело теплоти з нескінченною швидкістю теплопередачі в межах заданих геометричних спрощень. Ці моделі забезпечують загальні закономірності, проте практично не відтворюють реальні розміри та форму зварювальної ванни. Вони також не враховують фазові

переходи, нелінійність теплофізичних властивостей та складний просторовий розподіл енергії [32].

На відміну від цих підходів, модель Голдака базується на експериментальних спостереженнях за формою ванни при різних режимах зварювання та дозволяє узгодити розрахунковий розподіл температури з реальною геометрією. Вона ефективно комбінується з чисельними методами – зокрема методом скінченних елементів, що є стандартом у сучасному комп'ютерному моделюванні технологічних процесів [33].

Основним нововведенням Голдака стало введення поділу об'єму теплової дії на дві частини — передню та задню півеліпсоїдальні області, що відповідає фізичній природі рухомого джерела. Передня частина характеризується меншим тепловим внеском, тоді як задня — суттєво більшим, що узгоджується з експериментально визначеними розмірами ванни та швидкістю її переміщення.

Модель подвійного еліпсоїда розглядає розподіл густини тепловиділення у тривимірному просторі, де джерело поділяється на два еліпсоїдальні об'єми:

передній півеліпсоїд, який описує нагрів матеріалу перед дугою;

задній півеліпсоїд, який моделює нагрів у зоні позаду дуги.

Кожен з еліпсоїдів має власні коефіцієнти розподілу теплоти, що дає можливість відтворювати різні типи дуг, зокрема TIG, плазмову, електронно-променеву й лазерну [28].

Подвійний еліпсоїд нагадує грушоподібну форму реальної зварювальної ванни, у якій максимальна температура та глибина проплавлення припадають на задню частину ванни. Саме така форма й була виявлена у численних експериментальних роботах, зокрема в дослідженнях з зварювання та зварювання алюмінієвих сплавів [29, 34].

Кожна з частин моделі містить набір параметрів, що характеризують половинні осі еліпсоїда та тепловий внесок. Ці параметри підбираються або на основі експериментів, або шляхом оптимізації, забезпечуючи відповідність змодельованої ванни реальним геометричним характеристикам. Такий підхід забезпечує значно точнішу апроксимацію температурного поля порівняно з традиційними поверхневими моделями.

Поділ джерела на дві частини не є математичним формалізмом. Він відображає різні фізичні процеси, що відбуваються у фронтальній та тиловій частинах дуги:

1. Передня частина дуги переважно забезпечує попередній нагрів металу перед фронтом плавлення. Температура тут є нижчою, а тепловкладення — більш розосередженим. Це пов'язано з турбулентністю дугового струменя, динамічними процесами в плазмі, а також швидкістю переміщення дуги [35].

2. Задня частина дуги формує основне проплавлення та визначає глибину зварювальної ванни. Тут тепла енергія нагромаджується сильніше, оскільки розплавлений метал довше знаходиться у нагрітому стані. Відповідно, задній еліпсоїд має більший тепловий внесок, що відтворюється спеціальним коефіцієнтом розподілу.

Подвійний еліпсоїд дає змогу:

- моделювати асиметрію задньої частини ванни;
- контролювати ширину і довжину зони впливу;
- відтворювати глибину проплавлення для широкого спектру режимів;
- узгоджувати моделювання з високошвидкісними процесами зварювання.

У реальних зварювальних процесах теплоперенос є нелінійним і залежить від температури. Тому модель Голдака часто застосовується разом із температурозалежними теплофізичними коефіцієнтами, що дозволяє адекватно враховувати теплоємність, теплопровідність і приховану теплоту плавлення [36].

Модель подвійного еліпсоїда стала стандартом у чисельному аналізі зварювання. Вона реалізована у програмних комплексах:

- ANSYS
- SYSWELD
- Abaqus
- COMSOL Multiphysics
- спеціалізованих дослідницьких кодах для моделювання зварювальних теплових циклів.

У випадку алюмінієвих сплавів, до яких належить і сплав 1561 (АМг61), модель Голдака є особливо цінною, оскільки алюміній має високу теплопровідність, що спричиняє розтікання теплоти далеко від осереддя зварювання. Відтак, точна локалізація теплового джерела є важливою для прогнозування форми ванни та профілю шва [37].

Використання моделі дозволяє:

- зменшити кількість експериментів при налаштуванні режимів;
- досліджувати вплив параметрів режиму на глибину проплавлення;
- моделювати виникнення термічних напружень і деформацій;
- прогнозувати структуру металу шва та ЗТВ;
- оптимізувати режими для підвищення продуктивності.

Переваги:

1. Висока точність відтворення реальних форм ванни завдяки гнучкому підбору параметрів.
2. Врахування асиметрії температурного поля при русі дуги.
3. Сумісність із сучасними чисельними методами та можливість використання з нелінійними властивостями матеріалів.
4. Експериментально підтверджена ефективність, що робить модель універсальною для різних технологій.

Обмеження:

1. Для точного моделювання необхідно експериментально визначати або калібрувати параметри моделі.
2. Модель описує розподіл теплоти, але не враховує гідродинаміку ванни, пароутворення чи металургійні процеси.
3. При значних швидкостях зварювання або використанні концентрованих джерел (лазер, ЕПЗ) може знадобитися модифікація параметрів еліпсоїдів.

Модель подвійного еліпсоїда Голдака стала основою великої кількості сучасних досліджень, зокрема при комплексному моделюванні зварювання алюмінієвих, титанових, сталевих конструкцій, а також у задачах прогнозування

залишкових напружень і деформацій [38]. Її універсальність зробила її стандартом для академічних та промислових досліджень.

Для моделювання стикових швів у алюмінієвому сплаві 1561 (АМг61) товщиною 5 мм модель Голдака дозволяє отримати геометрію шва без додаткових фізичних експериментів, що скорочує витрати часу й ресурсів на технологічну підготовку виробництва.

1.4.3. Модель конічного джерела нагріву

Моделювання теплових процесів у зварювальному виробництві потребує використання математичних моделей, здатних адекватно описати просторово-часовий розподіл температури в металі під дією зосередженого джерела теплоти. Одним із підходів, що застосовуються в чисельному аналізі теплових полів під час дугового, лазерного та електронно-променевого зварювання, є **модель конічного джерела нагріву**. Ця модель розглядає джерело теплоти як об'єм, форма якого наближено відповідає конусу з вершиною, спрямованою вглиб матеріалу. Така геометрія є фізично обґрунтованою, оскільки відображає розширення зони впливу теплоти в напрямку від точки дії дуги або променя до зони проплавлення [39].

Поява конічних моделей була пов'язана з необхідністю спростити опис процесів теплопровідності, зберігши при цьому достатню точність відтворення температурних полів. У порівнянні з поверхневими або точковими моделями, конічна схема нагріву забезпечує якісніший опис просторового розподілу теплоти, особливо в умовах значних градієнтів температури та при моделюванні зварювання матеріалів з високою теплопровідністю — алюмінієвих та магнієвих сплавів [40].

Модель передбачає, що теплота генерується всередині об'єму конуса, при цьому густина теплової потужності зменшується від основи до вершини. Такий підхід дозволяє краще відтворити реальний механізм взаємодії дуги або променя з металом, оскільки максимальна тепла дія спостерігається в зоні дугового контакту, а далі теплота поширюється вглиб за рахунок теплопровідності та конвекції у зварювальній ванні [41].

Однією з ключових переваг моделі є можливість коректно задавати розподіл

густини теплового потоку відповідно до реальних експериментальних даних. У практичних розрахунках параметри конуса — такі як радіус основи, кут розкриття та глибина проникнення — визначаються або на основі фактичних вимірювань геометрії зварювальної ванни, або на підставі невеликої кількості попередніх термографічних експериментів [42]. Це дозволяє суттєво зменшити обсяг необхідних фізичних експериментів та оптимізувати технологічні режими вже на етапі комп'ютерного моделювання.

Серед основних сфер застосування моделі можна виділити зварювання неплавким електродом у середовищі інертних газів, лазерне зварювання, а також високошвидкісні процеси, де зона дії теплового джерела є малою і має чітко визначену форму. Особливо актуальною модель є під час досліджень зварювання алюмінієвих сплавів, для яких характерні низька температура плавлення та висока теплопровідність, що вимагає максимально точного відтворення теплових процесів у зоні зварювання [43].

У порівнянні з іншими об'ємними моделями, наприклад еліпсоїдальними чи циліндричними, модель конічного джерела нагріву має певні особливості. По-перше, конічна форма природним чином відтворює реальне зменшення інтенсивності нагріву з глибиною. По-друге, вона забезпечує точніше моделювання пікового нагріву у верхній частині ванни, де теплота концентрується і де формується основна частина металу, що переходить у рідкий стан [44]. По-третє, така модель краще підходить для моделювання вузьких та глибоких швів, які утворюються у процесах із високою щільністю теплового потоку.

У роботах українських та зарубіжних дослідників модель конічного джерела нагріву застосовувалася для аналізу напружено-деформованого стану металоконструкцій, визначення параметрів температурних циклів у зоні термічного впливу та оптимізації режимів зварювання. Особливо поширено її використання в дослідженнях із застосуванням скінченно-елементних програмних комплексів, таких як ANSYS, ABAQUS та SYSWELD, де вона може бути параметризована для різних технологічних умов [45].

При моделюванні зварювання за допомогою MCE, конічне джерело нагріву задається як об'ємний елемент із плавним розподілом потужності. Користувач

повинен визначити ключові параметри: коефіцієнт теплової ефективності, глибину дії джерела, розміри основи конуса та спад густини теплового потоку. Ці параметри можуть бути обчислені на основі відомих технологічних характеристик зварювального процесу — сили струму, напруги дуги, швидкості подачі та швидкості зварювання [46]. Практичні дослідження показують, що коректний вибір параметрів моделі забезпечує відтворення геометрії шва з точністю до 10 %, що є достатнім для більшості інженерних задач.

Незважаючи на переваги, модель має певні обмеження. Вона не завжди здатна коректно відтворити особливості теплової дії дуги при нестабільних режимах, наприклад під час пульсаційного зварювання або при наявності значної турбулентності металу у ванні. Крім того, для матеріалів із високою здатністю до рефракції тепла або під час лазерного зварювання з глибоким проплавленням може знадобитися коригування параметрів або використання комбінованих моделей [47]. Проте у більшості промислових випадків кінцева схема нагріву забезпечує прийнятну точність.

Таким чином, модель кінчного джерела нагріву є важливим і практичним інструментом для розрахунків температурних полів при зварюванні. Вона поєднує фізичну обґрунтованість, простоту параметризації та достатню точність, що робить її ефективним методом для проектування технологічних режимів зварювання, зменшення експериментальних витрат та вдосконалення якості зварних з'єднань [48].

1.4.4. Моделювання геометрії зварного шва при зварюванні з наскрізним проплавленням методами скінченних елементів (МСЕ) і скінченних різниць (МСР)

Моделювання процесів зварювання з наскрізним проплавленням є одним із найважливіших напрямів сучасної обчислювальної механіки зварювання. Такий режим забезпечує формування наскрізної зварювальної ванни та створює специфічні умови для утворення геометрії шва, включаючи ширину проплавлення, форму валика, розподіл у зоні термічного впливу та розміри кореневої частини шва. Точність опису цих характеристик суттєво впливає на прогнозування

залишкових напружень, деформацій і працездатності зварної конструкції, тому комп'ютерні методи аналізу набули значної популярності як у промислових, так і в дослідницьких застосуваннях.

Одним із ключових викликів при моделюванні геометрії шва під час повного проплавлення є коректне відтворення механізмів теплового впливу джерела нагріву, динаміки утворення зварювальної ванни та теплофізичних властивостей матеріалу, що істотно змінюються зі зростанням температури. Обидва провідні чисельні методи — методи скінченних елементів (МСЕ, FEM) та методи скінченних різниць (МСР, FDM) — є ефективними засобами для моделювання таких процесів, але кожен з них має власні переваги у відтворенні геометрії шва при наскрізному проплавленні.

Метод скінченних елементів (МСЕ) широко застосовується для моделювання теплових і механічних процесів у зварюванні завдяки своїй гнучкості в побудові складних геометричних областей. При моделюванні шва з наскрізним проплавленням МСЕ дозволяє будувати детальні тривимірні моделі, у яких враховуються локальні зміни теплопровідності, густини та теплоємності металу [49]. Зазвичай сітка в зоні проплавлення має високу деталізацію, оскільки саме там відбуваються найінтенсивніші температурні градієнти та формується геометрія зварювальної ванни.

Однією з суттєвих переваг МСЕ є можливість застосування різних типів моделей теплового джерела — наприклад, подвійного еліпсоїда Голдака, поверхневих або об'ємних джерел — залежно від необхідного ступеня точності [50]. При моделюванні наскрізного проплавлення модель подвійного еліпсоїда є найбільш поширеною, оскільки вона достатньо точно описує як фронтальну, так і задню частини зварювальної ванни, що дозволяє отримати коректні розміри зони проплавлення по всій товщині.

МСЕ також дозволяє поєднувати тепловий аналіз із механічним, що важливо для визначення деформацій та залишкових напружень, які значною мірою залежать від геометрії шва. Однак, однією з проблем є висока обчислювальна складність: моделі з повним проплавленням потребують дрібної сітки в області

зварювальної ванни та часових кроків малої тривалості, що вимагає значних обчислювальних ресурсів [51].

Метод скінченних різниць (МСР) також широко застосовується для аналізу зварювальних процесів, особливо в задачах, де домінує теплопровідність. На відміну від МСЕ, моделі МСР зазвичай будуються на регулярній прямокутній сітці, що значно спрощує обчислення та прискорює розрахунки, особливо у дво- та тривимірних моделях. Це робить МСР ефективним для аналізу проплавлення при високих швидкостях зварювання та при моделюванні великих конструкцій [52].

МСР ефективний при моделюванні геометрії шва з наскрізним проплавленням у випадках, коли необхідно забезпечити високу роздільність у напрямку товщини матеріалу. Регулярна сітка полегшує контроль за параметрами зварювальної ванни, дозволяє моделювати рухоме джерело тепла та швидко оновлювати поле температур при кожному кроці за часом. Це особливо важливо у випадку проплавлення, коли потрібно точно відстежити момент появи наскрізного проплавлення та його розвиток [53].

Основним недоліком МСР є складність моделювання складної геометрії або конструкцій зі змінною товщиною. Проте для типових зварних з'єднань із плоскими поверхнями метод залишається одним із найбільш ефективних щодо співвідношення точності та обчислювальних витрат.

У контексті моделювання зварювання з наскрізним проплавленням суттєвою відмінністю методів є спосіб опису межі розплавленої зони. МСЕ дозволяє точно відтворювати криволінійні межі проплавлення завдяки можливості адаптації сітки під форму зони плавлення. Натомість МСР дає змогу швидко виконувати розрахунки, але межа проплавлення описується приблизно, залежно від роздільності регулярної сітки.

У багатьох сучасних дослідженнях комбінуються підходи обох методів, наприклад, використання МСР на першому етапі для визначення області проплавлення та подальше уточнення твердіння та деформацій методом МСЕ [54].

Важливо, що моделі обох типів дозволяють враховувати зміну властивостей матеріалу в залежності від температури, включаючи фазові переходи, що істотно впливають на геометрію шва. У моделях з наскрізним проплавленням особливу

увагу приділяють опису динамічної межі між рідкою та твердою фазами. Це дає змогу точно передбачати глибину та ширину шва, які є критичними параметрами при прогнозуванні якості зварного з'єднання.

У промисловості моделі МСЕ та МСР використовують для оптимізації режимів зварювання із забезпеченням стабільного наскрізного проплавлення. На основі чисельного моделювання можна визначити оптимальне поєднання параметрів: зварювального струму, напруги, швидкості переміщення джерела, теплової ефективності та типу теплового джерела [55]. Це дозволяє зменшити кількість контрольних зварювань, мінімізувати витрати матеріалів та часу, а також забезпечити гарантовану якість і повторюваність процесу.

Застосування моделювання також сприяє прогнозуванню формування кореневого валика при зварюванні з повним проплавленням, що є одним з найважливіших параметрів якості стикових з'єднань. Створення чисельних моделей з урахуванням реальної геометрії шва дозволяє запобігати дефектам типу непровару, пор та усадкових раковин.

Таким чином, методи МСЕ та МСР є потужними інструментами для моделювання геометрії шва при зварюванні з наскрізним проплавленням, а їх комбіноване застосування забезпечує високу точність і ефективність досліджень.

1.5. Комп'ютерні технології прогнозування формування шва при дуговому зварюванні

Застосування сучасних комп'ютерних технологій істотно розширює можливості обчислювального експерименту та дозволяє з великої кількості варіантів параметрів зварювального процесу обирати найраціональніші або прогнозувати якість сформованого зварного шва [56], [57]. Одним із ключових завдань такого прогнозування є оцінювання ймовірності виходу показників формоутворення шва (наприклад, ширини зворотного валика чи величини підсилення) за допустимі межі, що встановлені для конкретного типу з'єднання [58]. Комерційні програмні комплекси, розроблені для моделювання теплових і механічних процесів під час

зварювання, значно спрощують ці процедури та зменшують трудомісткість технологічної підготовки виробництва [59].

Для чисельної оцінки термічних циклів та просторово-часового розподілу температури у зварюваному виробі використовують метод скінченних різниць (МСР) або метод скінченних елементів (МСЕ) [60]. У разі застосування МСЕ тривимірна геометрична модель зварної конструкції подається у вигляді області, поділеної на кінцеву кількість елементів. Для кожного елемента задається апроксимуюча функція, значення якої у вузлах є шуканими і визначаються шляхом розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь [61]. Натомість метод скінченних різниць передбачає побудову розрахункової сітки та запис різницевих рівнянь у вузлах цієї сітки, що дозволяє отримати наближене рішення диференціальних рівнянь теплопровідності [62].

Разом із тим, використання вбудованих у комерційні системи МСЕ інструментів для моделювання зварювання супроводжується низкою обмежень, які впливають на точність розрахунків. По-перше, для опису процесу наскрізного проплавлення зазвичай застосовують умовний об'ємний тепло-вий потік, який моделює комбінацію розподілених та об'ємних джерел нагріву. Такий підхід може спричиняти істотні похибки при визначенні реального розподілу температур через товщину зварюваного виробу, особливо при електронно-променевому або лазерному зварюванні [63]. По-друге, значна частина матеріалознавчих баз даних є закритими для користувача, що унеможливорює коригування таких параметрів, як ефективний коефіцієнт тепловкладання, коефіцієнти конвективного та променистого теплообміну, а також контактна теплопровідність [64]. По-третє, значним обмеженням є спрощене описання умов закріплення зразків, яке не враховує реальні сили притиснення деталей у технологічних пристроях [65].

Зазначені спрощення впливають на точність визначення температурних полів, що може зумовлювати суттєві похибки у прогнозуванні глибини проплавлення, форми ванни та геометрії шва [66]. У зв'язку з цим доцільним є використання

математичних моделей, що максимально ґрунтуються на експериментальних даних, які застосовуються як вхідні параметри чисельного аналізу. Для коректного опису просторового розподілу температур доцільним є використання моделі джерела нагріву типу подвійного еліпсоїда Голдака, що забезпечує адекватне відтворення реальної форми зони термічного впливу [67]. Крім того, для отримання більшої точності результатів бажано використовувати програмні комплекси з відкритими можливостями налаштування параметрів чисельного алгоритму та редагування бази даних матеріалів, такі як ANSYS чи інші універсальні МСЕ-системи [68].

Висновки та постановка задач дослідження

Побудова математичних моделей, що встановлюють взаємозв'язок між параметрами геометрії зварного шва та параметрами режимів зварювання, на основі суто регресійних залежностей має істотні обмеження. Такі моделі не відображають фізичної природи теплових процесів, що відбуваються під час зварювання, потребують виконання значного обсягу експериментальних досліджень, формуються здебільшого для одного конкретного матеріалу й характеризуються недостатньою точністю при варіюванні параметрів у широких діапазонах. Унаслідок цього їх застосування в інженерній практиці часто є неефективним.

Аналітичні моделі температурних полів, що формуються рухомими концентрованими або розподіленими джерелами теплоти, забезпечують задовільну точність лише за умови використання додаткових експериментальних даних. Насамперед це стосується визначення ефективного коефіцієнта корисної дії зварювальної дуги та коефіцієнта зосередженості теплового потоку для відповідного типу джерела. Уведення таких параметрів суттєво ускладнює аналітичні моделі та вимагає проведення додаткових вимірювань для кожної конкретної технологічної ситуації, що знижує їх універсальність.

На відміну від аналітичних описів теплових полів, чисельні методи моделювання — метод скінченних елементів (МСЕ) та метод скінченних різниць (МСР) — дають можливість формувати точніші моделі, які враховують широкий спектр фізичних параметрів. Зокрема, у МСЕ та МСР теплофізичні характеристики можуть задаватися як функції температури, що є надзвичайно важливим для коректного опису поведінки металу в умовах значних температурних градієнтів. Крім того, ці методи дають змогу розв'язувати контактні теплові задачі та регулювати точність розрахунку шляхом зміни параметрів дискретизації моделі.

Разом з тим чисельні схеми, що ґрунтуються на використанні складних комбінацій великої кількості теплових джерел, виявляються малоефективними для моделювання зварювання стикових з'єднань тонколистової продукції. У таких випадках універсальним і фізично обґрунтованим підходом є застосування моделі подвійного еліпсоїда Голдака, яка коректно описує розподіл теплового потоку уздовж і вглиб зварювальної ванни та забезпечує високу адекватність при моделюванні зварювання матеріалів малої товщини.

Для забезпечення максимальної точності моделювання доцільно використовувати скінчено-елементні програмні комплекси, що мають відкриті можливості модифікації параметрів задачі та дозволяють врахувати всю необхідну сукупність фізичних і технологічних чинників. Одним із найбільш ефективних інструментів цього класу є програмний комплекс ANSYS, який забезпечує гнучкість налаштування, можливість введення експериментально визначених параметрів теплового джерела та високий рівень достовірності результатів чисельних розрахунків.

Тому **метою роботи** було розробити чисельну модель, засновану на методі скінченних елементів, для моделювання теплових процесів зварювання неплавким електродом (TIG), імпульсно-дугового зварювання плавким електродом на зворотній полярності (MIG) і плазмового автоматичного зварювання з присадним дротом (PAW).

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Визначити кількісні залежності, що зв'язують основні параметри геометрії зварного шва для стикових з'єднань з тонколистових зварних

конструкцій алюмінієвих сплавів товщиною 5 мм з режимами зварювання неплавким електродом (TIG), імпульсно-дугового зварювання плавким електродом на зворотній полярності (MIG) і плазмового автоматичного зварювання з присадним дротом (PAW).

2. Обґрунтувати метод дослідження і програмний комплекс для моделювання теплового джерела з використанням чисельних методів для визначення температурного поля при зварюванні TIG, MIG и PAW.
3. Розробити математичну модель, що описує основні параметри геометрії зварного шва стикового з'єднання при дуговому зварюванні тонколистових зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів товщиною 5 мм.
4. Провести моделювання для дослідження теплового стану зварних з'єднань при зварюванні TIG, MIG и PAW.
5. Виконати аналіз результатів моделювання.
6. Дати рекомендації щодо можливості використання обраної моделі джерела нагріву для зварювання TIG, MIG и PAW тонколистових матеріалів.

					MP 8.132.6121м.04.05.02 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вибір методу дослідження	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	Вдовиченко С.В.						33	
Перевірів	Матвієнко М.В.							
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.	Матвієнко М.В.							
Зав. каф.	Матвієнко М.В.							

2. Вибір методу дослідження

2.1. Сучасні програмні комплекси для моделювання зварювання

Моделювання зварювальних процесів є одним із ключових напрямів сучасної інженерії, оскільки дозволяє значно зменшити кількість натурних випробувань, скоротити витрати на виготовлення експериментальних зразків та оптимізувати технологічні режими зварювання. Розвиток обчислювальних алгоритмів, підвищення продуктивності комп'ютерів і поява спеціалізованих програмних комплексів створили можливість детально аналізувати теплові цикли, залишкові напруження, деформації та формування зварних швів у конструкціях різного рівня складності [69–72].

Нині найпоширенішими програмними комплексами, що застосовуються у світовій практиці для моделювання процесів дугового, лазерного, електронно-променевого та гібридного зварювання, є ABAQUS, ADINA, COSMOS/M, MSC/NASTRAN, а також програмні середовища пострадянської школи інженерного аналізу — LIRA-SAPR, SCAD Office та STARK. Кожен із цих комплексів має свої унікальні можливості, обмеження та спеціалізовані інструменти, що визначає доцільність їх застосування для певних типів задач.

ABAQUS

Програмний комплекс ABAQUS є одним із найбільш потужних інструментів у галузі моделювання термомеханічних процесів, включно зі зварюванням. Його популярність зумовлена високою точністю нелінійного аналізу, здатністю працювати з великими деформаціями та складними фізичними моделями, а також наявністю модулів для квазістаціонарного та транзйентного теплообміну [69].

ABAQUS дозволяє моделювати:

теплові цикли при різних моделях джерел нагріву (голдаківський подвійний еліпсоїд, поверхневі та об'ємні джерела);

фазові перетворення у сталях і сплавах;

залишкові напруження та деформації від зварювання;

процеси охолодження та контрольованого термооброблення.

Перевагою ABAQUS є можливість користувацького розширення—через підпрограми UMAT, UHARD, DFLUX користувач може реалізувати власні моделі теплового джерела, температурно-залежні властивості та закони пластичності [69]. Це робить ABAQUS одним із найточніших інструментів для досліджень складних зварювальних процесів у науковій сфері.

ADINA

Програмний комплекс ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis) широко використовується для моделювання термомеханічних задач і є одним із найбільш поширених рішень для дослідження зварювання у промисловості. Завдяки надійним алгоритмам нелінійного аналізу ADINA ефективно працює з розрахунками залишкових напружень, визначенням температурних полів і оцінкою структурної цілісності конструкцій після зварювання [70].

Серед ключових можливостей ADINA:

точний розрахунок конвекції та випромінювання під час зварювання;
моделювання різних типів контактів при складанні та кріпленні деталей;
опис механічної поведінки матеріалу з урахуванням пластичності, повзучості та релаксації;

можливість поєднання структурного, теплового та гідродинамічного моделювання.

ADINA часто застосовують у суднобудуванні, енергетичному машинобудуванні та авіакосмічній галузі для аналізу зварювання великих конструкційних елементів, де точність визначення залишкових напружень має критичне значення [70].

COSMOS/M

COSMOS/M — один з ранніх, але досі застосовуваних комплексів для інженерного аналізу, особливо у навчальних та промислових організаціях. І хоча його функціональність поступається ABAQUS і ADINA, він має достатні можливості для аналізу теплових процесів і лінійної/нелінійної механіки [71].

Переваги COSMOS/M:

порівняно низькі вимоги до апаратних ресурсів;

зручний інтерфейс і швидке налаштування моделей;
наявність термічного аналізу з можливістю реалізації користувацьких джерел тепла.

COSMOS/M може використовуватися для базового моделювання зварювання, однак складні моделі (наприклад, моделі голдаківського подвійного еліпсоїда або аналіз багатопрохідного зварювання) реалізувати в ньому складніше [71].

MSC/NASTRAN

Комплекс MSC/NASTRAN широко використовується у галузях авіації, космічних систем та автомобілебудування. Його початкове призначення — структурний аналіз, але сучасні версії включають модулі теплопровідності та термомеханічного аналізу, що робить його придатним для моделювання деяких аспектів зварювання [72].

MSC/NASTRAN дозволяє:

- проводити аналіз впливу температурних полів на міцність конструкції;
- виконувати моделювання термонавантажень у процесах зварювання;
- оцінювати поведінку тонкостінних панелей при термічних деформаціях.

Проте самотійного модуля для специфічних зварювальних джерел нагріву комплекс не містить, тому його частіше використовують як інструмент післяпроцесорного механічного аналізу результатів, отриманих іншими програмами [72].

LIRA-SAPR

Хоча LIRA-SAPR є продуктом Східноєвропейської інженерної школи та традиційно орієнтований на будівельні конструкції, він має повноцінний модуль термонапруженого аналізу, що дозволяє проводити моделювання нагріву та деформацій від термічного впливу.

У контексті зварювання LIRA-SAPR застосовується для:

- аналізу впливу зварних з'єднань на напружено-деформований стан великих металоконструкцій,
- оцінки температурних полів у зварюваних елементах будівельних та мостових конструкцій,

дослідження стабільності та міцності зон, ослаблених термічним впливом.

Хоча в LIRA-SAPR відсутні спеціалізовані зварювальні моделі джерел тепла, можливості теплофізичного аналізу дозволяють застосовувати її для проектування металоконструкцій, що містять зварні елементи [73].

SCAD Office

Програмний комплекс SCAD Office також орієнтований на аналіз будівельних конструкцій, проте має розвинений модуль термомеханічного аналізу, що дозволяє розглядати вплив локальних джерел тепла на металеві конструкції. У проектуванні зварних елементів SCAD застосовується для:

визначення розподілу температур під час зварювання великих конструкційних вузлів;

оцінки залишкових деформацій у балках, фермах і плитах;

аналізу вогнестійкості та поведінки металоконструкцій у складних термічних умовах [74].

Попри відсутність спеціальних моделей зварювальних джерел тепла, SCAD Office використовується для наближених розрахунків при проектуванні реальних конструкцій, що містять значну кількість зварених з'єднань.

STARK

Комплекс STARK є інструментом для аналізу напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, однак містить модулі теплопровідності та термомеханіки, які дозволяють моделювати вплив локального нагріву.

STARK застосовується для:

дослідження термічних деформацій у зварних конструкціях, таких як ферми, колони, балки;

аналізу поведінки вузлів, що піддаються локальному нагріву при монтажному зварюванні;

виявлення зон підвищених залишкових напружень [75].

Комплекс не має спеціалізованого зварювального функціоналу, проте може ефективно застосовуватися на етапі аналізу конструкції, коли важливо оцінити вплив теплових деформацій на загальну міцність та стабільність виробу.

Ринок інженерного програмного забезпечення пропонує широкий спектр програм, що можуть бути використані для моделювання процесів зварювання.

ABAQUS і ADINA є найточнішими та науково орієнтованими комплексами для моделювання теплових циклів, залишкових напружень і деформацій зварювання.

COSMOS/M та MSC/NASTRAN доцільно застосовувати у задачах середньої складності та для аналізу конструкцій після зварювання.

LIRA-SAPR, SCAD Office і STARK не є спеціалізованими зварювальними пакетами, але ефективно використовуються для оцінки впливу термічних процесів на будівельні та машинобудівні конструкції.

Таким чином, вибір програмного комплексу залежить від складності технологічного процесу, необхідної точності та доступності інструментів реалізації специфічних моделей теплових джерел.

2.2. Програмний комплекс ANSYS

Сучасні тенденції розвитку зварювального виробництва нерозривно пов'язані з упровадженням високоточного комп'ютерного моделювання, яке дозволяє досліджувати теплові, механічні та деформаційні процеси зварювання без дорогих фізичних експериментів. Одним із найпотужніших інструментів такого типу є універсальний інженерний програмний комплекс ANSYS, що став галузевим стандартом для чисельного аналізу технологічних процесів, зокрема термічних і термомеханічних явищ, які виникають під час зварювання різних матеріалів. Завдяки широким можливостям адаптації, ANSYS застосовується для аналізу стаціонарних і нестаціонарних теплових задач, розподілу залишкових напружень, оцінювання деформацій, моделювання фазових перетворень і прогнозування геометрії зварного шва [76; 80].

ANSYS дозволяє виконувати комплексний аналіз процесів зварювання на основі фізико-математичних моделей, що враховують теплопровідність, конвекцію, випромінювання, пластичну деформацію, термомеханічне зміцнення та інші явища. Основною перевагою комплексу є широкі можливості налаштування

параметрів задачі, прямий доступ до матеріальних моделей, потужна система скриптів APDL (ANSYS Parametric Design Language) та підтримка великих обчислювальних доменів для 3D-моделювання.

До ключових можливостей ANSYS, що роблять його одним із найефективніших засобів аналізу зварювання, належать:

підтримка нестационарного теплового аналізу, що дозволяє враховувати переміщення джерела нагріву у просторі;

реалізація різних моделей теплових джерел, включно з моделлю подвійного еліпсоїда Голдака, поверхневими та об'ємними джерелами [77; 82];

використання температурно залежних матеріальних характеристик, що значно підвищує точність моделювання;

можливість моделювання фазових перетворень у сталях та інших сплавах;

розрахунок залишкових напружень і деформацій, що є критично важливим для міцнісного аналізу;

інтеграція теплових і структурних моделей, що дозволяє проводити повністю зв'язаний термомеханічний аналіз.

ANSYS став одним із ключових інструментів у дослідженнях зварювання завдяки можливості адаптації під будь-який процес: дугове, лазерне, електронно-променеве, точкове, дифузійне або гібридне зварювання [78; 79].

Одним із найважливіших аспектів моделювання зварювання є правильний вибір та математичне описання моделі теплового джерела. У ANSYS реалізовано кілька підходів до задання джерела теплоти:

Поверхневі джерела (функції розподілу теплового потоку) – використовуються для моделювання лазерного або електронно-променевого зварювання.

Об'ємні джерела, що імплементуються через аналітичні функції або користувацькі підпрограми.

Модель подвійного еліпсоїда Голдака – універсальна модель для дугових процесів, яка найточніше описує форму зварювальної ванни та розподіл теплових потоків у металі [82].

Завдяки використанню макросів APDL користувач може задавати рухоме джерело нагріву зі змінними параметрами, створювати складні багатопрохідні схеми зварювання та контролювати енергію дуги залежно від конкретних технологічних вимог.

Важливою перевагою ANSYS є можливість задання температурної залежності будь-якої теплофізичної або механічної властивості матеріалу. Це особливо важливо для моделювання:

- теплопровідності;
- питомої теплоємності;
- густини;
- коефіцієнта лінійного розширення;
- модуля пружності;
- границі текучості;
- коефіцієнтів фазових перетворень (для сталей).

Доступ до редагування матеріальних даних повністю відкритий, що є суттєвою перевагою над комерційними спеціалізованими пакетами, де такі дані часто недоступні для модифікації [81].

Після завершення процесу зварювання у виробі виникають складні поля залишкових напружень, які можуть впливати на експлуатаційну міцність конструкції. ANSYS забезпечує можливість:

- повністю зв'язаного термомеханічного моделювання;
- покрокового аналізу із врахуванням історії навантаження;
- моделювання релаксації напружень при високих температурах;
- оцінювання деформаційних викривлень виробів після охолодження.

Багато наукових досліджень демонструють високу точність прогнозування залишкових напружень за допомогою ANSYS у порівнянні з експериментом [76; 80].

У порівнянні з ABAQUS, COMSOL або SYSWELD, ANSYS має такі переваги:

- якісна реалізація термомеханічного зв'язаного аналізу;
- зручність написання макросів APDL для моделювання рухомого джерела;

потужні інструменти роботи з великими сітками;
підтримка нелінійного матеріального поведінкового аналізу;
широка база користувачів та докладна документація [83].

Завдяки універсальності, ANSYS підходить як для дослідницьких задач, так і для промислової сертифікації конструкцій.

Застосування ANSYS дозволяє значно скоротити кількість фізичних експериментів, підвищити прогнозованість якості зварювання та оптимізувати технологічні режими. Серед ключових практичних переваг:

можливість дослідження процесів у важкодоступних або небезпечних умовах;

швидка модифікація моделі для нових матеріалів і типів з'єднань;

оптимізація параметрів зварювання до початку виготовлення виробу;

економія матеріальних ресурсів та часу;

можливість інтеграції результатів з CAD-системами та іншими інженерними пакетами.

Таким чином, ANSYS є одним із найефективніших інструментів для моделювання явищ, які супроводжують процес зварювання, і дозволяє інженерам прогнозувати поведінку матеріалу під час нагріву, охолодження та навантаження, що підвищує якість і надійність зварних конструкцій.

2.3. Вибір типу скінченних елементів

Процес побудови скінченно-елементної моделі в програмному комплексі ANSYS базується на використанні широкої бібліотеки елементів, яка налічує понад 80 їх типів. Кожен тип елемента орієнтований на певний клас задач — механічних, теплових, електромагнітних, електричних, задач руху рідин або мультифізичних розрахунків. Крім того, елементи відрізняються геометричною формою (одновимірні, площинні, об'ємні), а також типом просторового відображення (2D або 3D), що дає можливість адекватно відображати фізику конкретної задачі.

Процедура формування скінченно-елементної сітки в ANSYS/Multiphysics включає три основні етапи:

1. Задання атрибутів елементів. На цьому етапі здійснюють вибір типу елемента — наприклад, твердотільного (*SOLID*), оболонкового (*SHELL*), контактного (*CONTA*) або мультифізичного (*Coupled Field*), що визначається специфікою поставленої задачі. Правильний вибір типу елемента забезпечує коректність фізичної інтерпретації процесів, що моделюються.
2. Встановлення параметрів розбиття. У ANSYS реалізовано широкий спектр інструментів контролю сітки, які дозволяють варіювати ступінь деталізації моделі. За необхідності можна налаштовувати локальне ущільнення сітки, тип елементів, рівень їх згладження тощо. У більшості стандартних задач достатньо параметрів розбиття, встановлених за замовчуванням, що спрощує підготовку моделі.
3. Генерування сітки. На цьому етапі здійснюють безпосереднє побудування сітки та перевірку її коректності. Для цього використовують інструменти MechTool (Main Menu → Preprocessor → MechTool), що надають доступ до інтуїтивного інтерфейсу управління побудовою сітки. Інструментарій включає:
 - автоматичне керування розмірами елементів (*SmartSize*);
 - налаштування параметрів елементів;
 - вибір форми елементів;
 - визначення режиму розбиття (вільне чи контрольоване);
 - розбиття тривимірних геометричних об'єктів;
 - очистку або повторну генерацію сітки.

Хоча більшість функцій доступні через графічний інтерфейс, користувач може використовувати команди APDL (ANSYS Parametric Design Language), що дозволяє створювати високоточно контрольовані та автоматизовані моделі. Це особливо важливо при виконанні багатоетапних або параметризованих задач.

Вибір елементів для задач теплопровідності

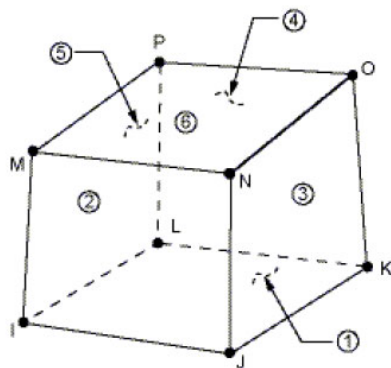
Для розв'язання задач тривимірного теплоперенесення в ANSYS рекомендовано застосовувати елементи типу SOLID70, що підтверджується

результатами наукових досліджень [84, 85]. Елемент SOLID70 призначений для моделювання стаціонарних і нестаціонарних теплових процесів. Він має такі характеристики:

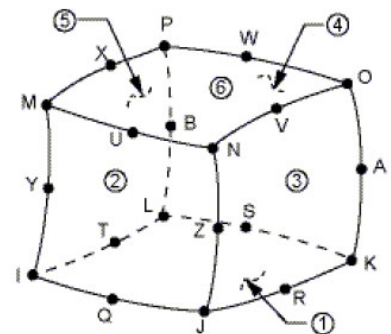
- 8 вузлів з одним ступенем свободи у кожному вузлі (температура);
- підтримка тривимірної теплопровідності;
- можливість застосування у задачах з великими градієнтами температур.

Основним недоліком елемента SOLID70 є відсутність можливості моделювання контактної теплопередачі, що істотно обмежує його застосовність у задачах, де враховуються контактні взаємодії. У таких випадках доцільно використовувати елемент SOLID90, який належить до високопорядкових елементів і забезпечує кращу точність та можливість врахування контактних теплових умов.

Таким чином, бібліотека елементів ANSYS надає широкі можливості для адекватного моделювання теплових процесів у зварювальних задачах, а гнучкі інструменти генерації сітки дозволяють адаптувати модель до складної геометрії та реальних умов теплообміну. Це визначає ANSYS як один із найефективніших програмних комплексів для дослідження зварювальних теплових явищ у рамках чисельного моделювання.



а



б

Рисунок 2.1. Типи скінченних елементів для вирішення 3D теплових задач: SOLID 70 (а) і б) SOLID 90 (б)

Цей елемент має 20 вузлів з одним ступенем свободи в кожному. Елементи SOLID 90 застосовні для моделювання контактних теплових задач і мають можливість завдання теплового контакту як функції від температури. Внаслідок чого, вибір цього типу скінченного елемента є найбільш раціональним для вирішення поставленого завдання.

Висновки

1. Сучасні методи чисельного аналізу, зокрема скінчено-елементний метод (СЕМ), дають змогу ефективно та з високою точністю розв'язувати широкий спектр інженерних задач у стислі терміни. Для автоматизації всіх етапів обчислювального експерименту застосовуються спеціалізовані програмні комплекси, які мають забезпечувати повний цикл робіт:

- препроцесинг (побудова геометричної моделі, формування скінчено-елементної сітки, задання граничних та початкових умов);
- чисельне розв'язання задачі;
- постпроцесинг (оброблення, інтерпретація та візуалізація результатів).

Програмний комплекс ANSYS містить усі перелічені функціональні можливості, що робить його універсальним інструментом для теплотехнічного, механічного, електромагнітного та мультифізичного аналізу. З огляду на вимоги дослідження, ANSYS повністю задовольняє необхідні умови для проведення моделювання теплових процесів зварювання та дозволяє врахувати широкий спектр фізичних факторів, зокрема нестационарність нагріву, нелінійну змінність властивостей матеріалу та вплив контактних взаємодій.

2. Для моделювання процесів теплопередачі у задачах, де важливим є врахування теплового контакту та його залежності від температури, доцільним є використання спеціалізованих типів скінчено-елементних моделей. Елементи SOLID 90, які реалізовані в ANSYS, призначені для аналізу тривимірних теплових полів та дозволяють коректно описувати контактну теплопередачу, включаючи можливість задання температурно залежних параметрів контактного теплового опору. Завдяки підвищеній точності апроксимації та підтримці нелінійних

залежностей, елементи SOLID 90 забезпечують більш коректне відтворення реальних умов зварювальних процесів порівняно з елементами SOLID 70, які не підтримують контактні взаємодії. Тому використання SOLID 90 є найбільш обґрунтованим вибором для вирішення поставленої задачі та забезпечує підвищену достовірність отриманих результатів моделювання.

					МР 8.132.6121м.04.05.02 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ Документа	Підпис			45

					МР 8.132.6121м.02.05.03 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Вдовиченко С.В.				Розробка скінчено-елементної моделі	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Матвієнко М.В.						44	
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.	Матвієнко М.В.							
Зав. каф.	Матвієнко М.В.							

3. Розробка скінчено-елементної моделі

3.1. Скінчено -елементна модель

Проведений аналіз був спрямований на визначення просторового розподілу температурних полів під час зварювання неплавким електродом (TIG), імпульсно-дугового зварювання плавким електродом на зворотній полярності (MIG), а також плазмового автоматичного зварювання різнополярним асиметричним струмом із присадним дротом (PAW). Для відтворення теплових процесів у зоні термічного впливу була розроблена тривимірна скінчено-елементна модель, сформована за допомогою мови команд APDL програмного комплексу ANSYS.

У моделі було використано геометрію зразка розміром $200 \times 200 \times 5$ мм. З огляду на симетрію задачі, числове моделювання виконувалося на половині геометричної області, що дозволило зменшити обчислювальні витрати без втрати точності. Особлива увага приділялася побудові сітки у зоні дії теплового джерела: розмір скінчено-елементної комірки в цій частині становив 0,5 мм, що забезпечувало достатню детальність у критично важливих областях формування температурних градієнтів та теплових деформацій. Зовнішній вигляд зразка і скінчено-елементна модель показані на рис.3.1.

Загальна структура моделі була сформована з урахуванням вимог до розв'язання нестационарних задач теплопровідності, характерних для дугових процесів зварювання. У моделюванні реалізовано часовий крок, достатній для коректного відображення змін теплового циклу під час переміщення джерела нагріву. Граничні умови включали конвективний теплообмін із навколишнім середовищем, радіаційні втрати та фіксацію значень температури на площинах симетрії.

Побудована модель дозволяє оцінити характер нагріву й охолодження металу при різних видах зварювання, порівняти інтенсивність тепловпливу та сформувати базу для подальших розрахунків напружено-деформованого стану, прогнозування деформацій і аналізу можливості наскрізного проплавлення. Такий підхід забезпечує можливість варіювання параметрів зварювання та визначення

оптимальних режимів для процесів TIG, MIG та PAW на основі узгодженого чисельного експерименту.

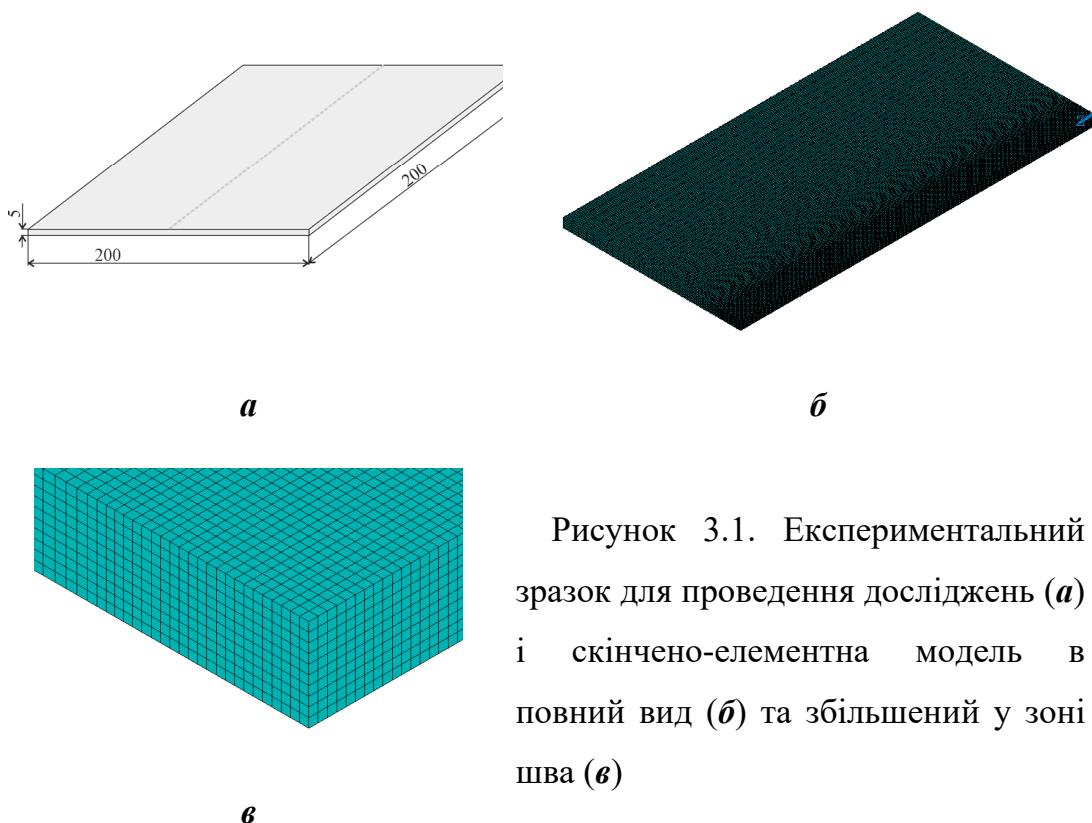


Рисунок 3.1. Експериментальний зразок для проведення досліджень (а) і скінчено-елементна модель в повний вид (б) та збільшений у зоні шва (в)

Для визначення раціональної кількості скінченних елементів у зонах з найбільш інтенсивними температурними градієнтами, насамперед у області формування зварного шва, було проведено серію чисельних досліджень. Моделювання виконували з використанням сіток різної густоти — із 5, 10 та 20 елементами по товщині матеріалу. Результати порівняльного аналізу показали, що застосування 10 елементів (що відповідає 11 вузловим точкам) по товщині листа завтовшки 5 мм забезпечує оптимальне співвідношення між точністю розрахунку та обчислювальними витратами. Така конфігурація сітки демонструє достатню збіжність результатів за суттєво меншого часу розв’язання порівняно з моделями підвищеної густоти.

Для виконання термічного аналізу в ANSYS використовувався 20-вузловий тривимірний твердотільний елемент SOLID 90, який рекомендується для

моделювання нестационарних теплових процесів завдяки підвищеній точності апроксимації температурного поля.

Під час зварювання тепла енергія концентрується в локалізованій області малого радіуса, що призводить до утворення високих температур, які у разі стандартного моделювання можуть перевищувати температуру випаровування матеріалу. Тому для підвищення фізичної адекватності моделі необхідно враховувати фазові переходи, що відіграють суттєву роль у тепловому балансі. З цією метою ентальпія розглядається як температурозалежна функція із включенням прихованої теплоти плавлення.

У моделюванні прийнято такі основні припущення:

- температура навколишнього середовища та початкова температура моделі становлять 20 °С;
- теплофізичні властивості матеріалу (густина, теплопровідність, теплоємність, коефіцієнт випромінювання) є функціями температури;
- теплові втрати через конвекцію та випромінювання враховуються на всіх відкритих поверхнях, за винятком площини симетрії;
- переміщення елементів конструкції під час зварювання не впливають на характер теплового поля;
- у моделі враховані конвективні та радіаційні механізми теплообміну.

Термічний аналіз передбачає визначення та збереження розподілів температури для кожного кроку навантаження. При цьому вважається, що миттєвий тепловий стан системи не залежить від структурних деформацій, отриманих на попередніх етапах, тобто термопружні зв'язки не враховуються. Такий підхід забезпечує коректність опису теплових процесів у рамках прийнятої постановки задачі.

3.2. Використані при моделюванні рівняння і граничні умови

Рівняння задачі теплопровідності для однорідного твердого тіла в прямокутній системі координат (x, y, z) має вигляд:

$$\rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (-v) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z) \quad 3.1$$

де $Q(x, y, z)$ – об'ємне джерело тепла, що залежить від режимів зварювання, K , c , ρ и v – теплопровідність, питома теплоємність, густина матеріалу і швидкість зварювання.

Початкові умови:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad 3.2$$

Граничні умови:

$$K_n \left(\frac{\partial}{\partial n} \right) - q + h(T - T_0) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) = 0 \quad 3.3$$

де q - тепловий потік (Вт/м²·°C), σ - постійна Стефана-Больцмана, ε – коефіцієнт випромінювання.

При моделюванні теплових полів методом скінченних елементів однією з основних задач є моделювання зварювального джерела тепла $Q(x, y, z)$.

Моделювався процес зварювання тонкої (5 мм) пластини алюмінієвого сплаву 1561 (АМг61). Хімічний склад алюмінієвого сплаву показаний в таблиці 3.1. Враховувалося, що термомеханічні властивості сплаву, що залежать від температури (рис. 3.2).

Таблиця 3.1 Хімічний склад алюмінієвого сплаву 1561 (АМг61) згідно https://auremo.biz/materials/splav-amg61-1561.html?utm_source=chatgpt.com

Si	Mn	Al	Cu	Zr	Fe	Be	Zn	Mg
< 0,4	0,7 - 1,1	інше	< 0,1	0,02 - 0,12	< 0,4	< 0,003	< 0,2	5,5 - 6,5

Враховувалися також температурна залежність властивостей матеріалу, фазовий перехід, конвективні та радіаційні теплові втрати зі всієї поверхні листа. Для проведення розрахунків в ANSYS використовувався мову APDL-команд.

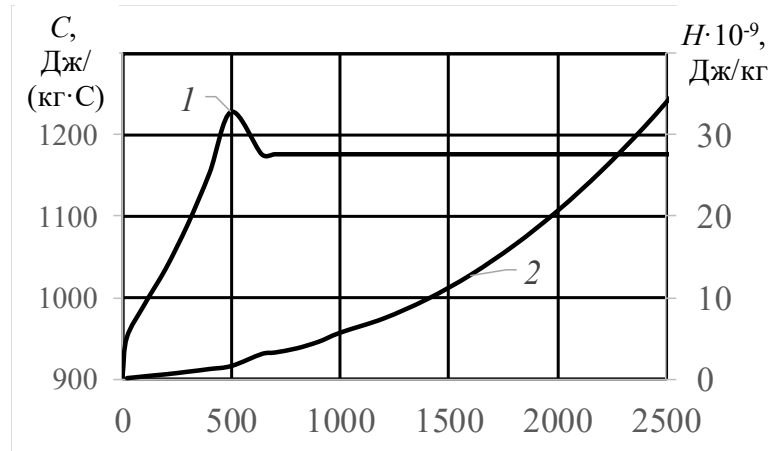
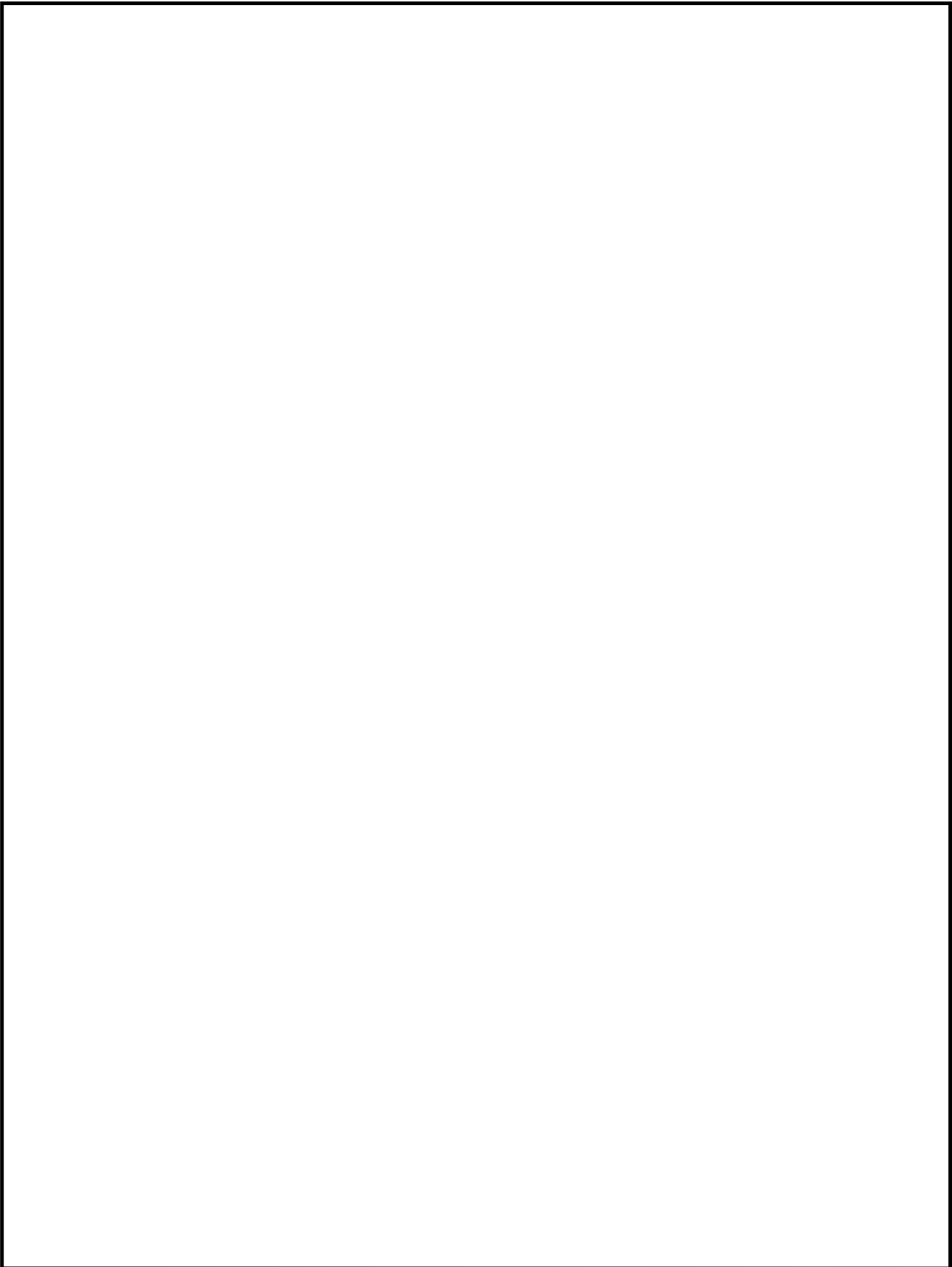


Рисунок 3.2. Теплофізичні властивості алюмінієвого сплаву 1561 (АМг61): 1 – питома теплоємність, 2 – ентальпія

Висновки

1. Створено тривимірну скінчено-елементну модель, призначену для чисельного відтворення теплових процесів під час зварювання неплавким електродом (TIG), імпульсно-дугового зварювання плавким електродом на зворотній полярності (MIG) та плазмового автоматичного зварювання різнополярним асиметричним струмом із подачею присадного дроту (PAW). Розроблена модель забезпечує можливість порівняльного аналізу температурних полів для різних типів зварювальних технологій.

2. Математична модель побудована з урахуванням геометричної симетрії зразка та температурно-залежних термофізичних властивостей матеріалу. Для забезпечення коректності розрахунків у діапазоні високих температур ентальпія була представлена як функція температури, що дало змогу враховувати фазові переходи, зокрема приховану теплоту плавлення, які суттєво впливають на тепловий баланс у зоні термічного впливу.



					MP 8.132.6121м.04.05.04 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Скінчено-елементне модельювання теплової задачі при дуговому зварюванні	Літ.	Арк.	Аркушіів
Розробив		Вдовиченко С.В.					52	
Перевірів		Матвієнко М.В.						
Рецензент								
Н. Контр.		Матвієнко М.В.						
Зав. каф.		Матвієнко М.В.				ХННІ НУК		

4. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при дуговому зварюванні

4.1. Вихідні дані для моделювання

Для моделювання зварювального теплового джерела було використано модель Дж. Голдака (J. Goldak). Геометричні моделі стикового зварного з'єднання, сформовані за досліджуваними способами, будувалися на основі фактичних розмірів, отриманих із аналізу форми зварювальної ванни (рис. 1) [86].

Параметри режимів процесів TIG, MIG і PAW під час зварювання пластин зі сплаву 1561 наведені в таблиці 4.1. Геометричні характеристики зварювальних ванн, що були використані для формування моделі теплового джерела відповідно до моделі Голдака, подані в таблиці 4.2.

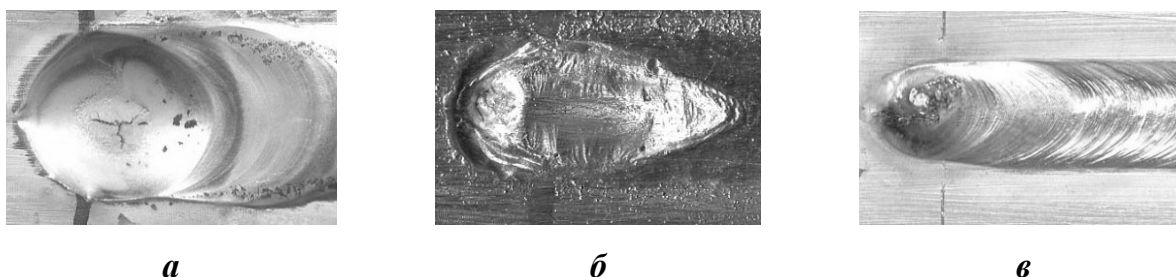


Рисунок. 4.1 Вид зварювальної ванни зварного з'єднання пластин з алюмінієвого сплаву 1561 розмірами $200 \times 200 \times 5$ мм для способів: ***a*** – TIG; ***б*** – MIG; ***в*** – PAW

Таблиця 4.1 Параметри режимів процесів TIG, MIG й PAW зварювання пластин сплаву 1561 ($\delta = 5$ мм) дротом $\varnothing 1,2$ мм в захисті аргону (18-20 л/хв) [51]

Спосіб зварювання	Зварювальний струм, а	Напруга на дузі, В	ККД процесу	Погонна енергія, Дж/мм	Швидкість зварювання, мм/хв
TIG	275	17,8	0,75	1100	200
MIG	253	25,8	0,85	555	600
PAW	325	24,9	0,60	485	600

Таблиця 4.2 Геометричні параметри зварювальних ванн для процесів TIG, MIG, PAW зварювання

Спосіб зварювання	Довжина, мм	Ширина, мм	Глибина, мм
TIG	18	13	5
MIG	25,6	13,5	5
PAW	10	10	5

Для моделювання процесів зварювання при TIG, MIG и PAW було обрано комбіноване джерело нагріву, що складається з двох полуеліпсоїдів,. Це джерело має назву подвійний еліпсоїд Голдака. Для використання цієї моделі необхідно задати розміри першого та другого еліпсоїда, визначити яка частина теплового потоку діє у передній частині зварювальної ванни, а яка у задній, вказати теплову потужність та швидкість зварювання.

4.2. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при зварюванні неплавким електродом (TIG)

Параметри моделі подвійного еліпсоїда Голдака, що використовуються при моделюванні зварювання неплавким електродом показані в таблицях 4.1, 4.2 та 4.3.

Таблиця 4.3 Параметри моделі подвійного еліпсоїда Голдака, що використовуються при моделюванні зварювання неплавким електродом TIG пластин сплаву 1561

Параметри моделі	Величина
Розмір еліпсоїду a, м	0,0065
Розмір еліпсоїду b, м	0,005
Розмір передньої частини зварювальної ванни c_f , м	0,0085
Розмір задньої частини зварювальної ванни c_r , м	0,0095
Частина теплового потоку в передній частині ванни, ff	1,5
Частина теплового потоку у задній частині ванни, fr	0,5

На рис. 4.2 та 4.3 показані результати чисельного моделювання температурних полів у зварювальному зразку при зварюванні неплавким електродом TIG пластин сплаву 1561.

На рис.4.4. показано порівняння експериментальних і розрахункових перетинів шва.

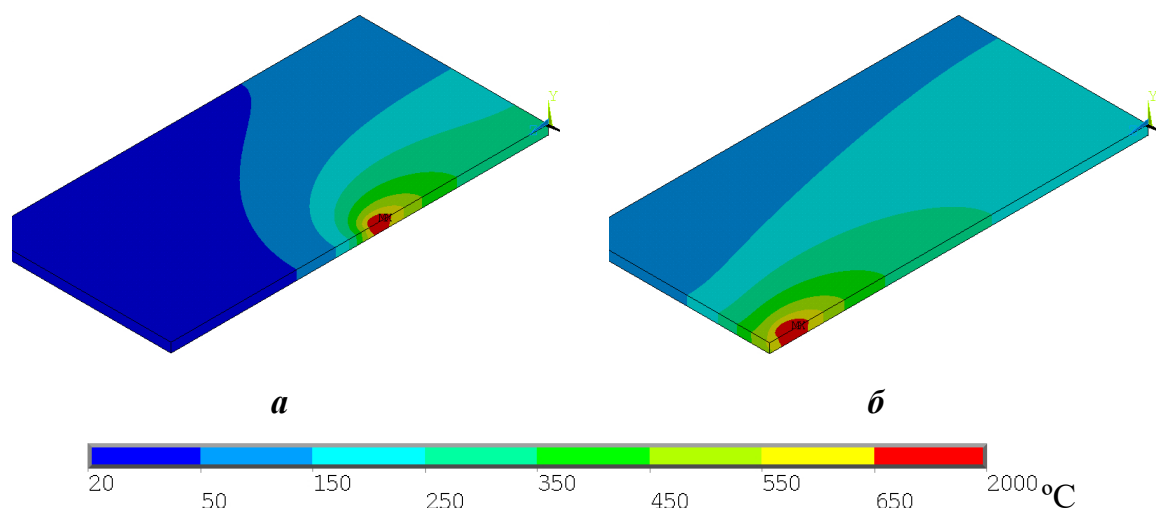


Рисунок 4.2. Розподіл температурних полів при зварюванні неплавким електродом (TIG): *a* - 30 с (посеред зразка), *б* - 60 с (кінець зразка)

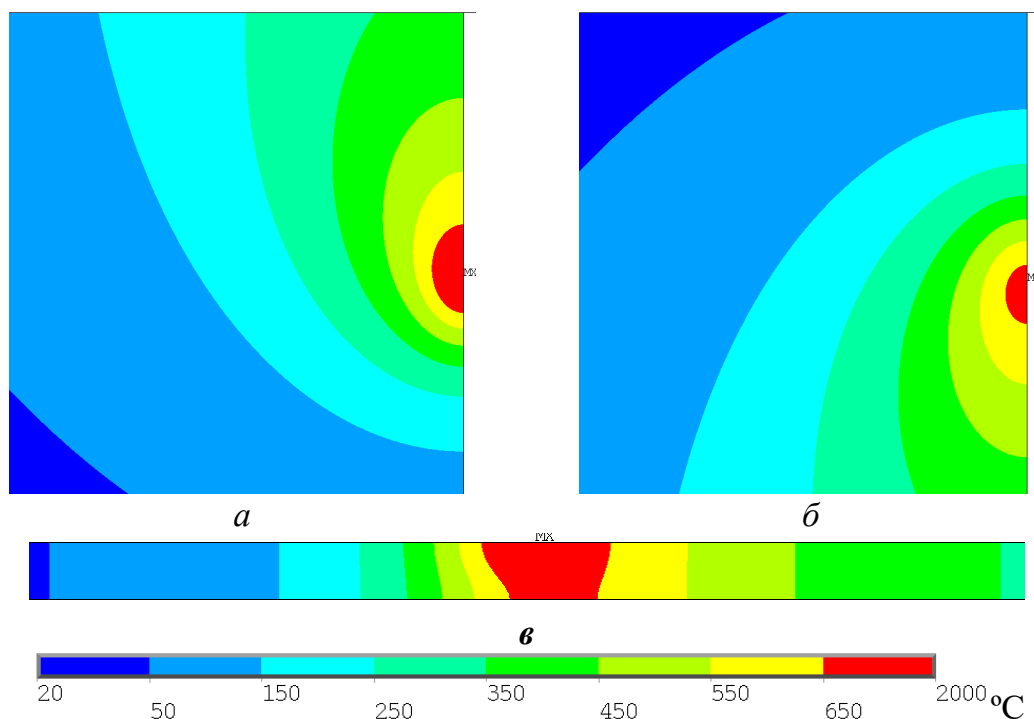


Рисунок 4.3. Розподіл температурних полів при зварюванні неплавким електродом (TIG): *a*-вид зверху, *б* - вид знизу, *в* - вид з боку симетричної площі (час зварювання 30 с)



Рисунок 4.4. Порівняння експериментальних і розрахункових перетинів шва (час зварювання 30 с)

Аналіз температурних полів рис. 4.2-4.3 показує, що максимальна температура в зварювальній ванні становить 787°C і не перевищує температуру кипіння сплаву. Біляшовна зона термічного впливу має значні розміри. Вид зварювальної ванни зварних з'єднання (вид зверху) близький до експериментального.

Результати, представлені на рис.4.4 показують, що чисельна модель зварювання неплавким електродом (TIG) недостатньо добре узгоджується з експериментом. Поперечний переріз шва, отриманий експериментальним шляхом, має більшу ширину шва (вид зверху) на 30%. Ширина зворотного боку в експериментальному й розрахунковому перетинах шву практично збігається. Однак форма проплавлення має значну відмінність.

4.3. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності (MIG)

Параметри моделі подвійного еліпсоїда Голдака, що використовуються при моделюванні зварювання плавким електродом показані в таблицях 4.1, 4.2 та 4.4.

На рис. 4.5 и 4.6 показані результати чисельного моделювання температурних полів у зварювальному зразку при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності (MIG) пластин сплаву 1561.

Аналіз температурних полів рис. 4.5-4.6 показує, що максимальна температура в зварювальній ванні становить 875°C і не перевищує температуру кипіння сплаву. Біляшовна зона термічного впливу має незначні розміри. Вид

зварювальної ванни зварних з'єднання (вид зверху) близький до експериментального.

Таблиця 4.4 Параметри моделі подвійного еліпсоїда Голдака, що використовуються при моделюванні імпульсно-дугового зварювання плавким електродом на зворотній полярності (MIG) пластин сплаву 1561

Параметри моделі	Величина
Розмір еліпсоїду a , м	0,00675
Розмір еліпсоїду b , м	0,005
Розмір передньої частини зварювальної ванни c_f , м	0,0074
Розмір задньої частини зварювальної ванни c_r , м	0,0182
Частина теплового потоку в передній частині ванни, f_f	1,5
Частина теплового потоку у задній частині ванни, f_r	0,5

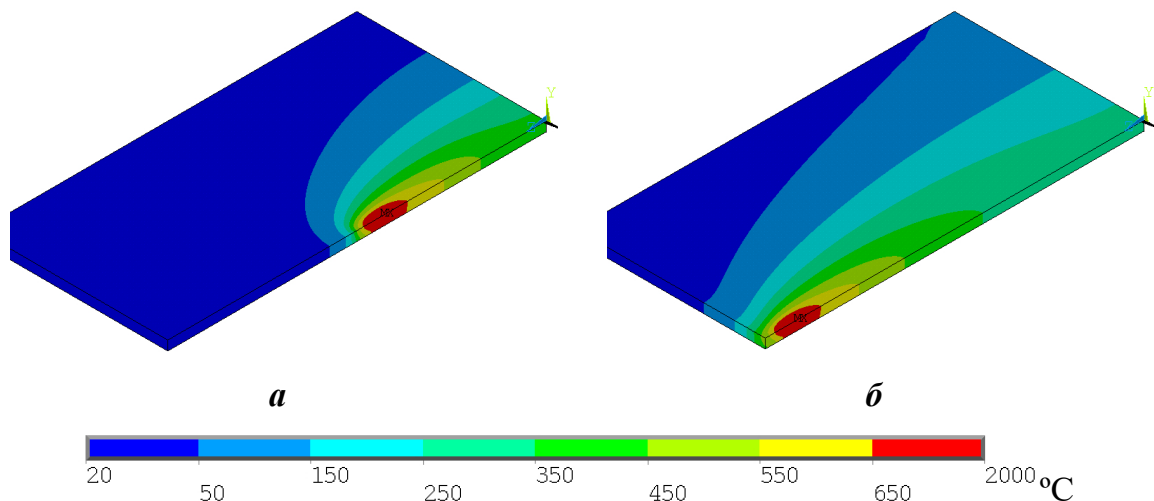


Рисунок 4.5. Розподіл температурних полів при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності (MIG): ***a*** - 10 с (посеред зразка), ***б*** - 20 с (кінець зразка)

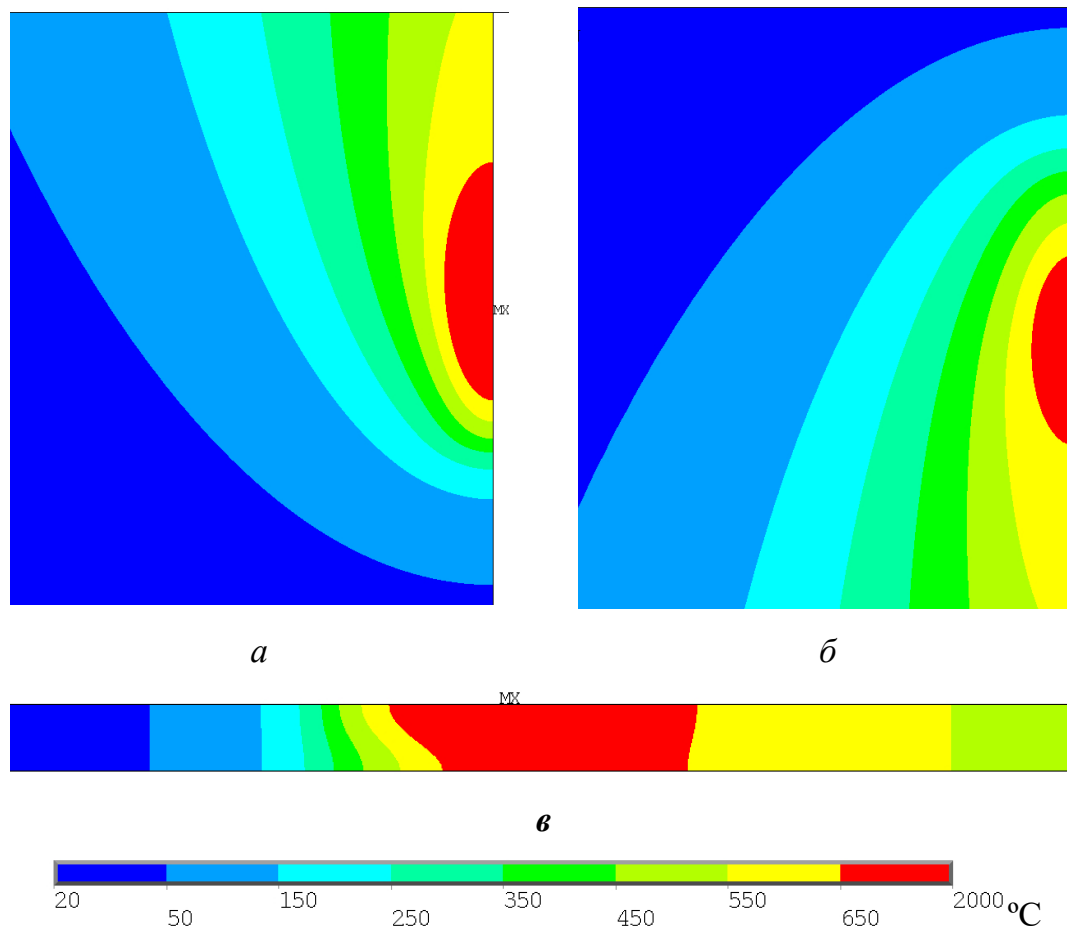


Рисунок 4.6. Розподіл температурних полів при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності (MIG): *а*-вид зверху, *б* - вид знизу, *в* - вид з боку симетричної площі (час зварювання 10 с)

Результати порівняння експериментальних і розрахункових перетинів шву, представлені на рис.4.7, показують, що чисельна модель при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності (MIG) достатньо добре узгоджується з експериментом. Однак, лицьова ширина шву, отриманого експериментальним шляхом, має більшу ширину шва (вид зверху) на 27 %. Ширина зворотного боку в експериментальному й розрахунковому перетинах шву збігається. Форма проплавлення в зоні кореня шва й на половині товщини пластини повністю збігається. На верхній половині товщини присутня розбіжність за формою проплавлення.



Рисунок 4.7. Порівняння експериментальних і розрахункових перетинів шву

4.4. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом (PAW)

Параметри моделі подвійного еліпсоїда Голдака, що використовуються при моделюванні плазмового автоматичного зварювання з присадним дротом показані в таблицях 4.1, 4.2 та 4.5.

Таблиця 4.5 Параметри моделі подвійного еліпсоїда Голдака, що використовуються при моделюванні плазмового автоматичного зварювання різнополярним асиметричним струмом (PAW) пластин сплаву 1561

Параметри моделі	Величина
Розмір еліпсоїду a , м	0,005
Розмір еліпсоїду b , м	0,005
Розмір передньої частини зварювальної ванни c_f , м	0,005
Розмір задньої частини зварювальної ванни c_r , м	0,005
Частина теплового потоку в передній частині ванни, f_f	1,42
Частина теплового потоку у задній частині ванни, f_r	0,58

На рис. 4.8 й 4.9 показані результати чисельного моделювання температурних полів у зварному зразку при плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом (PAW) пластин сплаву 1561.

Аналіз температурних полів рис. 4.8 та 4.9 показує, що максимальна температура в зварювальній ванні становить 1005°C і не перевищує температуру кипіння сплаву. Біляшовна зона термічного впливу має незначні розміри. Вид

зварювальної ванни зварних з'єднання (вид зверху) близький до експериментального.

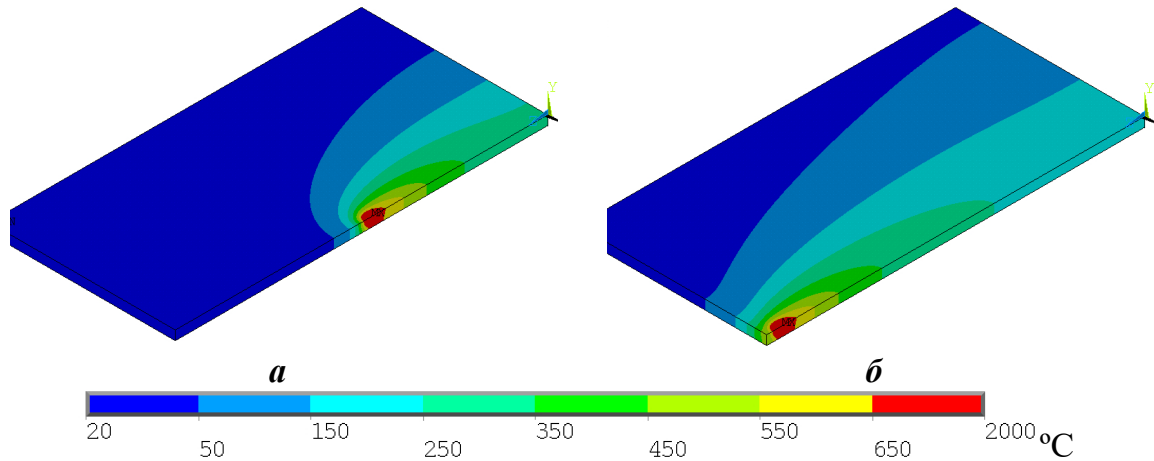


Рисунок 4.8. Розподіл температурних полів при плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом (PAW): *а* - 10 с (посеред зразка), *б* - 20 с (кінець зразка)

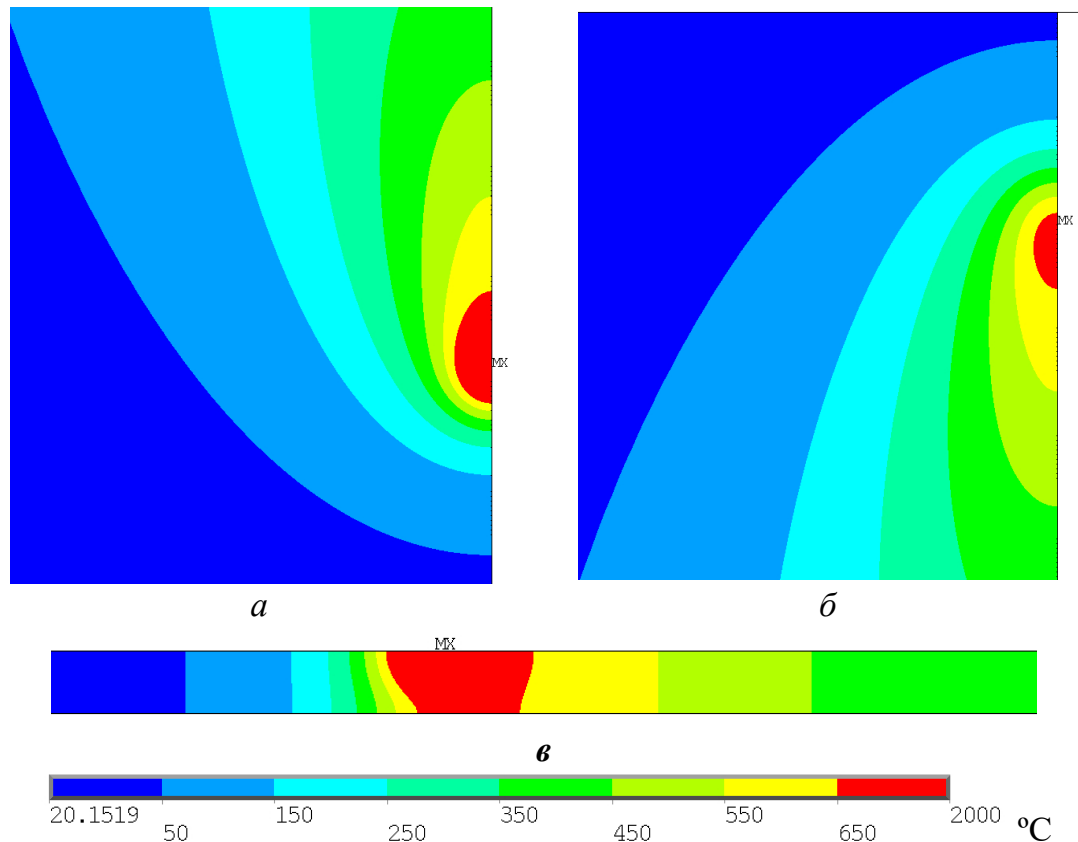


Рисунок 4.9 Розподіл температурних полів при плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом (PAW): *а*-вид зверху, *б* - вид знизу, *в* - вид з боку симетричної площі (час зварювання 10 с)

Результати, представлені на рис.4.10 показують, що чисельна модель плазмового автоматичного зварювання різнополярним асиметричним струмом (PAW) досить добре узгоджується з експериментом. Поперечний переріз шва, отриманий експериментальним шляхом якісно збігається з розрахунковим. Однак, кількісно, відмінність розмірів розплавленого металу при чисельному моделюванні, менше на 25...28 % у порівнянні з експериментальними даними.

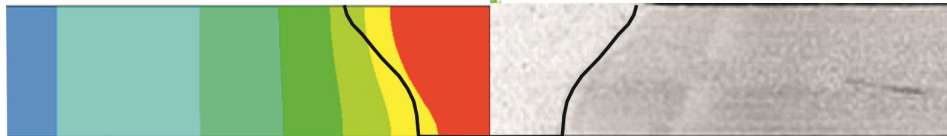


Рисунок 4.10. Порівняння експериментальних і розрахункових перетинів шву

Висновки

1. Виконано термічний аналіз із застосуванням комбінованого джерела нагріву у вигляді подвійного еліпсоїда Голдака, що моделює просторовий розподіл теплового потоку під час зварювання.

2. Встановлено, що для процесу зварювання неплавким електродом (TIG) модель подвійного еліпсоїда Голдака не забезпечує достовірного відтворення геометрії зварного шва. Отримана чисельна форма проплавлення суттєво відрізняється від експериментальної: ширина лицевої поверхні шва (вид зверху) є меншою приблизно на 30%.

3. З'ясовано, що застосування моделі подвійного еліпсоїда Голдака для імпульсно-дугового зварювання плавким електродом на зворотній полярності (MIG) забезпечує достатньо високу точність відтворення температурного поля у поперечному перерізі. Форма проплавлення в ділянці кореня та в зоні половини товщини пластини повністю збігається з експериментальною. Розбіжності спостерігаються лише у верхній частині перерізу.

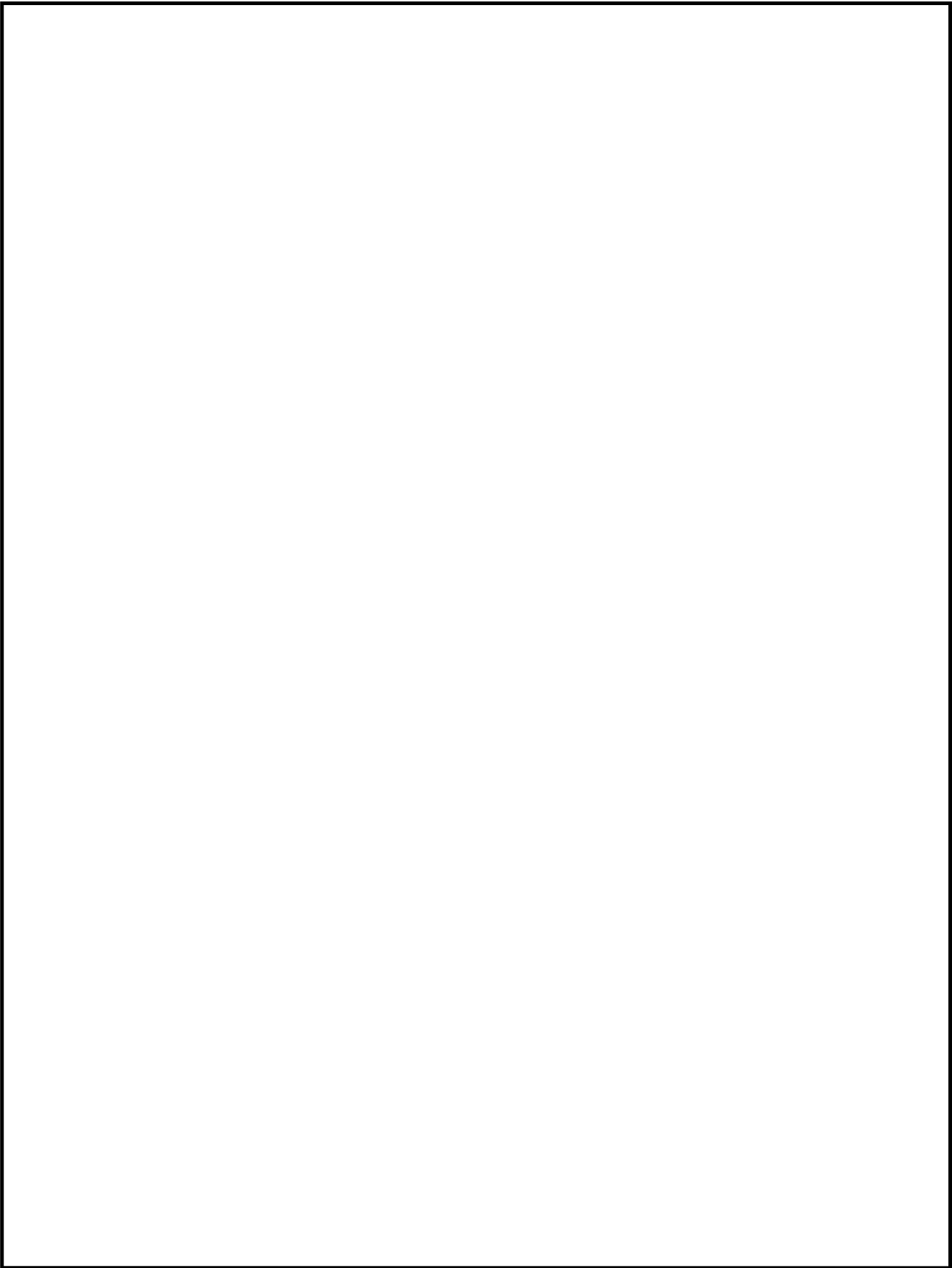
4. Показано, що використання подвійного еліпсоїда Голдака для моделювання плазмового автоматичного зварювання різнополярним

асиметричним струмом (PAW) дозволяє якісно відтворити геометрію зварного шва. Кількісна різниця між чисельними та експериментальними розмірами проплавлення становить 25...28%, що є прийнятним для термічних моделей такого типу.

5. Найвищу точність розроблена чисельна модель демонструє для процесу PAW, тоді як найнижча точність спостерігається при моделюванні зварювання неплавким електродом (TIG).

6. Показано, що для підвищення точності відтворення геометрії зварного шва чисельна теплова модель потребує удосконалення за рахунок детальнішого аналізу співвідношення теплових потоків у передній (ff) і задній (fr) частинах зварювальної ванни. Зміна цих параметрів суттєво впливає на форму проплавлення.

7. Розроблена теплова модель джерела нагріву може бути використана як базова для прогнозування форми проплавлення та подальшого визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях.



					MP 8.132.6121м.04.05.05 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Вдовиченко С.В.			Охорона праці при TIG, MIG та PAW зварюванні			
Перевірів		Матвієнко М.В.						
Рецензент								
Н. Контр.		Матвієнко М.В.						
Зав. каф.		Матвієнко М.В.						
					Літ.	Арк.	Аркуші	
							63	
					ХННІ НУК			

5. Охорона праці при TIG, MIG та PAW зварюванні

Зварювання методами TIG (Tungsten Inert Gas), MIG (Metal Inert/Active Gas) та PAW (Plasma Arc Welding) належить до робіт підвищеної небезпеки, оскільки під час їх виконання робітник зазнає дії низки шкідливих та небезпечних виробничих факторів [87]. Забезпечення охорони праці є ключовою умовою організації робочого процесу та гарантує безпечні умови праці під час виконання зварювальних операцій. Комплекс заходів охоплює вимоги до технологічного обладнання, організації робочого місця, засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), систем вентиляції, протипожежних заходів та дотримання правил безпеки персоналом.

5.1. Шкідливі та небезпечні фактори під час TIG, MIG та PAW зварювання

Під час зварювальних робіт на працівника діє ціла сукупність небезпечних факторів, які за відсутності належних заходів можуть призвести до травм, захворювань або аварійних ситуацій [88].

5.1.1. Електромагнітне та оптичне випромінювання дуги

Усі три процеси — TIG, MIG та PAW — супроводжуються інтенсивним випромінюванням зварювальної дуги. Дуга є джерелом:

ультрафіолетового випромінювання, що може викликати «електроофтальмію» та опіки шкіри;

інфрачервоного випромінювання, небезпечного перегрівом тканин ока;
видимого світла високої інтенсивності [89].

Особливо інтенсивним випромінювання є при PAW-зварюванні, де температура дуги є найвищою.

5.1.2. Небезпечні хімічні фактори

Зварювальні процеси супроводжуються утворенням аерозолів та диму, що містять: оксиди металів, озон, оксиди азоту, шкідливі гази, що утворюються під час згоряння покриття дроту чи присадового матеріалу [90].

Найбільша інтенсивність димовиділення характерна для MIG-зварювання плавким дротом. TIG утворює найменше диму, оскільки не відбувається плавлення електрода, однак створюється озон, який є токсичним при вдиханні [91].

5.1.3. Опіки та травми внаслідок бризок розплавленого металу

Під час MIG- та PAW-зварювання утворюється значна кількість бризок. Це становить небезпеку для шкіри, очей та може призвести до займання горючих матеріалів [92].

5.1.4. Пожежна та вибухонебезпека

Зварювання відноситься до пожежонебезпечних процесів. Можливі причини займання: іскри та бризки; перегрів металу; наявність горючих речовин; використання інертних газів з балонів під високим тиском [93]. Особливо небезпечним є зварювання у замкнених ємностях.

5.1.5. Електротравмування

Усі види дугового зварювання використовують джерела струму з напругою до 80–120 В на дузі, а в режимах холостого ходу — навіть більше. Порушення ізоляції кабелів, підвищена вологість або дотик до струмопровідних частин можуть викликати ураження електрострумом [87].

5.2. Організація безпечних умов праці при зварюванні

5.2.1. Вимоги до робочого місця

Робоче місце зварювальника повинно бути обладнане:

системою місцевої витяжної вентиляції;

екранами для захисту інших працівників від випромінювання;

вогнестійкими перегородками;

негорючими поверхнями робочих столів [94].

Для TIG- і PAW-зварювання важливо забезпечити захист від протягів, які руйнують газовий захисний потік.

5.2.2. Вентиляція та очищення повітря

Згідно з вимогами [90], зварювальні пости повинні бути обладнані:

місцевими відсмоктувачами,

витяжними вентиляційними зонтами,

системами фільтрації аерозолів.

Для MIG та PAW вентиляція є обов'язковою умовою, інакше концентрація аерозолів може перевищувати допустимі норми у десятки разів.

5.2.3. Електробезпека

Основні заходи електробезпеки включають:

заземлення корпусів апаратів;

застосування кабелів із непошкодженою ізоляцією;

використання діелектричних рукавиць у вологих умовах;

заборону роботи у мокрому одязі [87].

Зварювальні джерела повинні проходити регулярну перевірку ізоляції.

5.2.4. Протипожежні заходи

На робочому місці мають бути:

вогнегасники (вуглекислотні або порошкові),

ящик з піском,

азбестова тканина.

Заборонено зберігати легкозаймисті матеріали ближче ніж 10 м від поста зварювання [93].

5.2.5. Газові балони

Під час TIG і PAW застосовуються інертні гази (аргон, гелій). Балони повинні:

зберігатися у вертикальному положенні;

мати справний редуктор;

бути віддаленими від джерел тепла не менше ніж на 5 м;

транспортуватися лише на візках [88].

Пошкодження вентилів може призвести до вибуху.

5.3. Засоби індивідуального захисту

5.3.1. Засоби захисту очей і органів зору

Для зварювачів TIG, MIG та PAW використовуються:

автоматичні маски зі світлофільтрами DIN 9–13;

зварювальні щитки;

окуляри для шліфування та попередніх операцій [89].

При PAW рекомендовано застосовувати маски з мінімальним часом затухання та підвищеним ступенем затемнення.

5.3.2. Спецодяг

Спецодяг зварювальника включає:

					MP 8.132.6121м.04.05.05 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ Документа	Підпис			66

костюм із брезенту або вогнестійкої тканини;

рукавиці зі шкіри;

високе шкіряне взуття;

нарукавники та фартух під час робіт у сидячому положенні [92].

5.3.3. Засоби захисту органів дихання

Необхідність респіраторів визначається концентрацією аерозолів:

при TIG інколи достатньо загальної вентиляції;

при MIG часто застосовуються респіратори класу FFP2–FFP3;

при PAW рекомендовані системи подачі чистого повітря (PAPR) [91].

5.4. Особливості охорони праці залежно від методу зварювання

5.4.1. Охорона праці при TIG-зварюванні

TIG-процес характеризується: високою яскравістю дуги, утворенням озону, небезпекою опіків від нагрітого вольфраму [91].

Основні ризики: ефекти випромінювання на очі, ураження струмом, перегрівання пальника та кабелів.

4.2. Охорона праці при MIG-зварюванні

MIG-процес супроводжується: інтенсивним виділенням зварювального диму, дрібними бризками металу, підвищеною пожежонебезпекою через високу продуктивність [92].

Основні заходи: обов'язкове встановлення витяжки, застосування респіраторів FFP3, захист відкритих ділянок тіла.

4.3. Охорона праці при PAW-зварюванні

Плазмове зварювання характеризується: найвищою температурою дуги, сильним шумом, утворенням озону та оксидів азоту [91].

Особливі заходи: використання масок із найвищим ступенем затемнення; застосування активної вентиляції з фільтрацією; обов'язковий захист від шуму.

5. Вимоги до підготовки персоналу

Зварювальник повинен:

пройти навчання за програмою з охорони праці,

мати кваліфікацію відповідного рівня,

знати інструкції з пожежної та електробезпеки,

вміти надавати першу допомогу [87].

Повторні інструктажі проводяться не рідше ніж раз на 6 місяців.

Висновки

Проаналізовані потенційно небезпечні і шкідливі фактори, при проведенні TIG, MIG та PAW зварювання.

					MP 8.132.6121м.04.05.05 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ Документа	Підпис			68

Загальні висновки

1. Побудова математичних моделей, що визначають взаємозв'язок між параметрами геометрії зварного шва та параметрами режимів зварювання, на основі регресійних залежностей є недостатньо точною, оскільки такі залежності не відображають реальної фізики процесів зварювання.
2. Для моделювання теплового джерела та визначення температурного поля найбільш ефективними є чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів (МСЕ) та метод скінченних різниць (МСР).
3. Модель подвійного еліпсоїда Голдака є найбільш універсальною для моделювання джерела нагріву при зварюванні тонколистових матеріалів.
4. Для підвищення точності моделювання доцільним є застосування скінчено-елементних програмних комплексів із можливістю детального налаштування параметрів задачі, таких як ANSYS.
5. Елементи SOLID90 в ANSYS дозволяють моделювати контактні теплові задачі з урахуванням залежності теплового контакту від температури, що підвищує точність термічного аналізу.
6. Розроблено скінчено-елементну математичну модель температурних полів для трьох способів зварювання: TIG, MIG та PAW, з урахуванням симетрії зразка і термомеханічних властивостей матеріалу.
7. Термічний аналіз виконано з використанням комбінованого джерела тепла, сформованого з двох півеліпсоїдів відповідно до моделі подвійного еліпсоїда Голдака.
8. Найвищу точність модель демонструє для процесу PAW, тоді як найнижча точність спостерігається при моделюванні процесу TIG.
9. Чисельна модель потребує подальшого удосконалення, зокрема уточнення розподілу теплового потоку у передній (ff) та задній (fr) частинах зварної ванни, які суттєво впливають на форму проплавлення, а також уточнення значень коефіцієнта корисної дії.

10. Розроблена модель джерела тепла може бути використана як основа для прогнозування форми проплавлення та подальшого розрахунку залишкових напружень у зварних з'єднаннях.

11. В розділі охорона праці проаналізовані потенційно небезпечні і шкідливі фактори, при проведенні TIG, MIG та PAW зварювання.

Література

1. Дудко Д. А. Технологія та обладнання зварювання плавленням : підручник. Київ : Видавництво КПІ ім. І. Сікорського, 2017. 356 с.
2. Глущенко А. А., Піддубний А. О. Довідник з дугового зварювання. Харків : Фоліо, 2014. 288 с.
3. Кердан О. О. Технологія зварювання та різання металів : навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2018. 212 с.
4. AWS Welding Handbook. Vol. 1: Welding Science and Technology. Miami : American Welding Society, 2012. 760 p.
5. ДСТУ EN ISO 9692-1:2016. Підготовка з'єднань перед зварюванням. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
6. Goldak J., Akhlaghi M. Computational Welding Mechanics. New York : Springer, 2005. 326 p.
7. Lindgren L.-E. Finite element modeling of welding processes. Mathematics & Computers in Simulation. 2001. Vol. 61. P. 495–509.
8. Kou S. Welding Metallurgy. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2003. 461 p.
9. Lancaster J.F. The Physics of Welding. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1986. 321 p.
10. Kim I.-S., Jeong Y.-C., Rhee S. “Optimization of arc welding processes using statistical models.” Journal of Materials Processing Technology. 1997. Vol. 72. P. 302–310.
11. Taguchi G., Chowdhury S., Wu Y. Taguchi's Quality Engineering Handbook. New York: Wiley-Interscience, 2005. 1668 p.
12. Рикалін М. М. Тепловые процессы при сварке. Москва: Машиностроение, 1975. 288 с.
13. Патон Є. О., Патон Б. Є., Кудря С. О. Теоретичні основи зварювання металів. Київ: Наукова думка, 1997. 412 с.
14. Goldak J., Chakravarti A., Bibby M. “A New Finite Element Model for Welding Heat Sources.” Metallurgical Transactions B, 1984, vol. 15, pp. 299–305.

15. Гаврилюк В. П. Теплові процеси при дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів. Автоматичне зварювання, 2011, № 3, с. 34–39.
16. Kou S. Welding Metallurgy. 2nd ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003. 450 p.
17. Lancaster J. F. Metallurgy of Welding. 6th ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 1999. 464 p.
18. Голдак, Дж. Моделирование сварочных процессов. — Москва: Машиностроение, 1992. — 312 с.
19. Рикалін, Н. Н. Тепловые процессы при сварке металлов. — Москва: Металлургия, 1978. — 240 с.
20. Kou, S. Welding Metallurgy. — 2nd ed. — New Jersey: Wiley, 2003. — 480 p.
21. Lancaster, J. F. The Physics of Welding. — Oxford: Pergamon Press, 1986. — 389 p.
22. Дяченко, С. С. Процеси теплопереносу у дуговому зварюванні. — Київ: Наукова думка, 2014. — 228 с.
23. DebRoy, T., Bhadeshia, H. K. Heat and Mass Transfer in Fusion Welding. Progress in Materials Science, 1995. — 39(4). — P. 325–377.
24. ANSYS, Inc. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. — 2020. — 1247 p.
25. Устименко, О. В. Моделювання теплових процесів при дуговому зварюванні. — Харків: ХНУРЕ, 2011. — 146 с.
26. Radaj, D. Heat Effects of Welding: Temperature Field, Residual Stress, Distortion. — Berlin: Springer, 1992. — 309 p.
27. Kim, C., Goldak, J. Heat Input Models for Arc Welding Simulations. Welding Journal, 2009. — 88(3). — P. 45–52.
28. Goldak, J., Chakravarti, A., & Bibby, M. A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical Transactions B, 1984, vol. 15B, pp. 299–305.
29. Goldak, J., & Akhlaghi, M. Computational Welding Mechanics. New York: Springer, 2005.
30. Goldak, J. Double Ellipsoidal Heat Source Model. Welding Journal, 1988, vol. 67, no. 3, pp. 60–70.
31. Radaj, D. Heat Effects of Welding. Berlin: Springer-Verlag, 1992.

32. Rosenthal, D. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. Transactions of the ASME, 1946, vol. 68, pp. 849–866.
33. Lindgren, L.-E. Finite element modeling of welding. Mat. Sci. and Tech., 2001, vol. 17, pp. 1099–1110.
34. Kou, S. Welding Metallurgy. 2nd ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.
35. Lancaster, J.F. The Physics of Welding. Oxford: Pergamon Press, 1986.
36. Мовчан, В.П., Копняк, Н.М. Математичне моделювання теплових процесів при зварюванні. Київ: Наукова думка, 2019.
37. Гладкий, В.М., Черненко, В.І. Теплові цикли та напруження при зварюванні алюмінієвих сплавів. Дніпро: НМетАУ, 2020.
38. DebRoy, T., Bhadeshia, H.K.D.H. Numerical simulation of welding processes. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, vol. 15, pp. 266–271.
39. Рикалін Н. Н. Теория сварочных процессов. Москва: Машиностроение, 1975. 480 с.
40. Гладкий В. Ф. Теплові процеси при дуговому зварюванні. Київ: Наукова думка, 2009. 312 с.
41. Lancaster J. F. The Physics of Welding. Oxford: Pergamon Press, 1986. 424 p.
42. Kou S. Welding Metallurgy. 2nd ed. New York: Wiley, 2003. 461 p.
43. Малінов Л. С. Моделювання теплових процесів у зварюванні легких сплавів. Харків: ХНАДУ, 2014. 198 с.
44. Goldak J., Chakravarti A., Bibby M. A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical Transactions B. 1984. Vol. 15, № 2. P. 299–305.
45. Nguyen N., Ohta A. Computational Welding Mechanics. Tokyo: Springer, 2010. 325 p.
46. Дьяконов І. М. Чисельні методи розрахунку зварювальних процесів. Дніпро: Пороги, 2018. 276 с.
47. DebRoy T., Bhadeshia H. K. Numerical modelling of weld phenomena. Acta Materialia. 2010. Vol. 58, № 2. P. 559–570.
48. Gery D., Long H. Finite element modelling of welding processes. Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 168, № 3. P. 393–406.

49. Goldak J., Akhlaghi M. Computational Welding Mechanics. New York: Springer, 2005. 316 p.
50. Lindgren L.-E. Finite element modeling of welding processes. Materials Science and Technology, 2008, vol. 24, no. 2, pp. 130–142.
51. Nguyen N. T. Computational Methods for Welded Structures. Oxford: Elsevier, 2012. 420 p.
52. Tsai C. L., Park S. C. Modeling of heat flow in weld pools using finite difference methods. Welding Journal, 1991, vol. 70, no. 2, pp. 43–52.
53. DebRoy T., David S. A. Physical processes in fusion welding. Reviews of Modern Physics, 1995, vol. 67, no. 1, pp. 85–112.
54. Mishra S., DebRoy T. Heat and fluid flow modeling in fusion welding. Progress in Materials Science, 2016, vol. 75, pp. 1–72.
55. Kou S. Welding Metallurgy. 2nd ed. New York: Wiley, 2003. 450 p.
56. Kou, S. Welding Metallurgy. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2003. 473 p.
57. Lancaster, J. F. The Physics of Welding. Oxford: Pergamon Press, 1986. 354 p.
58. Radaj, D., Zhang, X., Sonsino, C. M. Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. 436 p.
59. Nguyen, N. T., Ohta, A. Computational Welding Mechanics. Tokyo: Springer, 2010. 258 p.
60. DebRoy, T., Wei, H., Zuback, J. S. et al. Numerical Modeling of Welding Processes. Progress in Materials Science, 2018, vol. 92, pp. 112–224.
61. Dhondt, G. The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Applications. New York: Wiley, 2004. 348 p.
62. Smith, G. D. Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods. Oxford: Oxford University Press, 1998. 337 p.
63. Kim, C., Na, S. J. A Study on Heat Source Models for Laser Welding Simulation. Journal of Laser Applications, 2000, vol. 12, no. 4, pp. 219–227.
64. Zeng, X., Yu, G. Advanced Welding and Joining Technologies. London: Elsevier, 2021. 512 p.
65. Goldak, J., Akhlaghi, M. Computational Welding Mechanics. New York: Springer, 2005. 322 p.

66. Gery, D., Long, H., Maropoulos, P. Effects of Welding Process Parameters on Distortion. Journal of Materials Processing Technology, 2005, vol. 167, pp. 393–401.
67. Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. Metallurgical Transactions B, 1984, vol. 15B, pp. 299–305.
68. ANSYS Inc. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Canonsburg, PA, 2022. 1240 p.
69. Kou, S. Welding Metallurgy. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2003. 478 p.
70. Nguyen, N. T., Ohta, A. Computational Welding Mechanics. Tokyo: Springer, 2010. 320 p.
71. Dhondt, G. The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Applications. New York: Wiley, 2004. 392 p.
72. Lancaster, J. F. The Physics of Welding. Oxford: Pergamon Press, 1986. 424 p.
73. Radaj, D., Zhang, X., Sonsino, C. M. Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. 672 p.
74. Smith, G. D. Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods. Oxford: Oxford University Press, 1998. 334 p.
75. DebRoy, T., Wei, H., Zuback, J. S. et al. Numerical Modeling of Welding Processes. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112–226.
76. Kou S. Welding Metallurgy. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2003. 478 p.
77. Lancaster J. F. The Physics of Welding. Oxford: Pergamon Press, 1986. 340 p.
78. Radaj D., Zhang X., Sonsino C. M. Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. 720 p.
79. Nguyen N. T., Ohta A. Computational Welding Mechanics. Tokyo: Springer, 2010. 324 p.
80. DebRoy T., Wei H., Zuback J. S. et al. Numerical Modeling of Welding Processes. Progress in Materials Science, 2018, vol. 92, pp. 112–227.
81. Dhondt G. The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Applications. New York: Wiley, 2004. 379 p.
82. Smith G. D. Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods. Oxford: Oxford University Press, 1998. 337 p.

83. ANSYS Inc. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Canonsburg, PA, 2022. 1450 p.
84. Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using WELD PLANNER / R.N. Lidam [et al.] // Journal of Mechanical Science and Technology. 2011. Vol. 25, Issue 10. P. 2641-2646.
85. Modeling of inconel 625 TIG welding process / Siwek A. [et al.] // Computer methods in material science. 2013. Vol. 13. P. 181-187.
86. Korzhyk V. Kvasnytskyi V. Khaskin V. Prokhorenko D. Grynyuk A. Babych O. The impact of consolidation in a rigid tool on the formation of residual stress-strain state of butt joints of plates from an alloy 1561 at MIG, PAW PAW and HYBRID-MIG welding // American Scientific Journal. 2017. Vol.2, №17. P. 2182-2189.
87. Правила охорони праці під час зварювання металів : затверджено наказом Міністерства соціальної політики України від 14.12.2012 № 1425. — Київ : Мінсоцполітики України, 2013. — 52 с.
88. Охорона праці при зварювальних роботах : методичні рекомендації. — Київ : ОППБ, 2019. — 64 с.
89. Техніка безпеки при дуговому зварюванні : навч. посіб. — Харків : ХНАДУ, 2017. — 112 с.
90. Зварювальні аерозолі та їх вплив на здоров'я : рекомендації Держпраці України. — Київ : Держпраці України, 2021. — 28 с.
91. Безпека під час TIG, MIG і PAW-зварювання : практичний посібник для зварювальників. — Львів : Новий Світ, 2020. — 96 с.
92. Захист зварювальника від опіків та аерозолів : довідник. — Дніпро : УкрНДІОП, 2018. — 48 с.
93. Правила пожежної безпеки під час зварювальних робіт : НПАОП 0.00-5.12-2014. — Київ : ДСНС України, 2014. — 40 с.
94. Організація зварювальних постів та вимоги до вентиляції : інструкція підприємства. — Київ, 2022. — 15 с.