

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА
ХЕРСОНСЬКИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра зварювання

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



к.т.н., проф. НУК Г.В. Єрмолаєв

«__» _____ 2023 р.

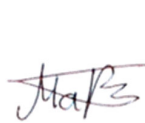
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістра»

на тему: Комп'ютерне моделювання температурних процесів у тонколистових зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів при дуговому зварюванні

Виконав: студент VI курсу, групи 6121зм
зі спеціальності 132 Матеріалознавство
за освітньо-професійною програмою
Інжиніринг зварювання та споріднених
процесів

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)



Керівник

Гарковенко Віктор Сергійович

(прізвище та ініціали)



Рецензент

Матвієнко Максим Валентинович

(прізвище та ініціали)

Єрмолаєв Геннадій Володимирович

(прізвище та ініціали)

Миколаїв-Херсон - 2023 р.

**Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут**

Факультет суднобудівний
Кафедра зварювання
Освітній рівень магістр
Спеціальність 132 Матеріалознавство
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Інжиніринг зварювання та споріднених процесів
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ



Гарант освітньої програми
к.т.н., доц. Матвієнко М.В.

“ ” 2023 року

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ**

Гарковенко Віктору Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Комп'ютерне моделювання температурних процесів у тонколистових зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів при дуговому зварюванні

керівник проекту Матвієнко Максим Валентинович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені розпорядженням ХННІ НУК від 10.10.2023 року №19

2. Строк подання студентом проекту 14.12 2023 р.

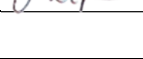
3. Вихідні дані до проекту Матеріал: алюмінієвий сплав АМг61, товщина 5 мм. Макрошліфи зварних з'єднань виконаних дуговим зварюванням.

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

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.

6. Консультанти розділів проекту

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

7. Дата видачі завдання 12.10.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд питань, пов'язаних з отриманням зварних з'єднань при дуговому зварюванні	28.10.2023р.	
2	Вибір методу дослідження	11.11.2023р.	
3	Розробка скінчено-елементної моделі	18.11.2023р.	
4	Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при дуговому зварюванні	25.11.2023р.	
5	Охорона праці	28.11.2023р.	
6	Графічна частина	04.12.2023р.	
7	Оформлення пояснювальної записки	05.12.2023р.	

Студент


(підпис)

Гарковенко В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Матвієнко М.В.

(прізвище та ініціали)

Зміст

Вступ	5
1. Огляд питань, пов'язаних з отриманням зварних з'єднань при дуговому зварюванні	6
1.1. Експериментальні дані та рекомендації щодо вибору основних параметрів режиму зварювання	6
1.2. Математичні моделі, побудовані на основі експериментальних даних про розміри зварного шва	7
1.3. Моделі аналітичного розрахунку температурних полів, засновані на теорії теплових полів М.М. Рикаліна	9
1.4. Моделювання геометрії зварного шва за допомогою чисельних методів	12
1.5. Комп'ютерні технології прогнозування формування шва при дуговому зварюванні	21
Висновки та постановка задач дослідження	23
2. Методика досліджень	27
2.1. Програмні комплекси для моделювання зварювання	27
2.2. Програмний комплекс скінчено-елементного аналізу ANSYS	36
2.3. Вибір типу скінченних елементів	38
Висновки	40
3. Розробка скінчено-елементної моделі дугового зварювання	44
3.1. Скінчено -елементна модель	44
3.2. Використані при моделюванні рівняння і граничні умови	45
Висновки	47
4. Моделювання температурної задачі при дуговому зварюванні	49
4.1. Вихідні дані	49
4.2. Скінчено-елементне моделювання температурної задачі при зварюванні неплавким електродом	50
4.3. Скінчено-елементне моделювання температурної задачі при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності	52

4.3. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом.....	55
Висновки	57
5. Охорона праці.....	60
5.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних факторів при проведенні складально - зварювальних робіт	61
5.2 Розрахунок захисного заземлення.....	68
Висновки	71
Загальні висновки	72
Література	74

Анотація

Магістерська робота присвячена розробці математичних моделей, що описують взаємозв'язок між геометрією зварного шва та параметрами режимів зварювання. Показано обмеженість регресійних залежностей, які не враховують фізику процесів, а також аналітичних моделей температурних полів, що потребують додаткових експериментальних параметрів.

Обґрунтовано використання чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів, який дозволяє враховувати температурну залежність властивостей матеріалу та підвищувати точність розрахунків. Розроблено скінчено-елементну модель температурних полів при зварюванні стикових з'єднань алюмінієвого сплаву АМг61 (5 мм) у програмному комплексі ANSYS із застосуванням моделі подвійного еліпсоїда Голдака.

Проведено моделювання процесів TIG, MIG та PAW. Встановлено, що найвища точність досягається для PAW, а найменша — для TIG. Розроблена модель може бути використана для прогнозування геометрії шва та залишкових напружень.

Ключові слова: зварювання, математичне моделювання, метод скінченних елементів, температурне поле, подвійний еліпсоїд Голдака, TIG, MIG, PAW, алюмінієвий сплав АМг61, теплове джерело, геометрія шва, ANSYS, залишкові напруження.

Abstract

The master's thesis is devoted to the development of mathematical models describing the relationship between weld geometry and welding режим parameters. It is shown that regression-based approaches that do not reflect the physical nature of welding processes require extensive experimental data and provide limited accuracy over wide parameter ranges. Analytical models of temperature fields are also limited due to the need for additional experimentally determined parameters.

The study substantiates the use of numerical methods, particularly the finite element method, which allows accounting for temperature-dependent material properties and improving calculation accuracy. A finite element model of temperature fields during welding of 5 mm thick AMg61 aluminum alloy butt joints was developed using ANSYS software. The Goldak double ellipsoidal heat source model was applied.

Numerical simulations were performed for TIG, MIG, and plasma arc welding (PAW). The highest accuracy was achieved for PAW, while TIG showed the largest deviations. The developed model can be used to predict weld geometry and residual stresses.

Keywords: welding, mathematical modeling, finite element method, temperature field, Goldak double ellipsoid, TIG, MIG, PAW, AMg61 aluminum alloy, heat source, weld geometry, ANSYS, residual stresses.

Вступ

Побудова математичних моделей, що визначають взаємозв'язок параметрів геометрії зварного шва і параметрів режимів зварювання, на основі регресійних залежностей, що не відображають фізику реальних процесів зварювання, пов'язане з великим обсягом проведених експериментів, побудовою математичних моделей тільки на одному матеріалі й низькою точністю в широких діапазонах варійованих параметрів режимів зварювання. 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.

При моделюванні теплового джерела з використанням чисельних методів для визначення температурного поля найбільш широко застосовують методи скінченних елементів і методи скінченних різниць. На відміну від моделей, заснованих на класичній теорії теплових полів, такі моделі мають ряд переваг, а саме: теплофізичні властивості матеріалу задаються функцією від температури, можливість розв'язання контактних теплових задач та можливий вибір необхідної точності розрахунку варіюванням параметрами скінчено-елементної сітки моделі.

Запропонована робота присвячена удосконаленню технології зварювання стикових з'єднань алюмінієвого сплаву АМг61 товщиною 5 мм із застосуванням скінчено-елементний програмний комплекс з відкритою можливістю настройки параметрів розв'язуваної задачі, наприклад, ANSYS Multiphysics ver. 23.0.

					МР 8.132.6121зм.01.05.01 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Огляд питань, пов'язаних з отриманням зварних з'єднань при дуговому зварюванні Лім.Арк.Аркуші ХННІ НУК		
Розробив	Гарковенко В.С.						
Перевірів	Матвієнко М.В.						
Рецензент							
Н. Контр.	Матвієнко М.В.						
Зав. каф.	Срмоласєв Г.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 матеріалах, довідниках і навчальних посібниках досить широко представлені рекомендовані режими дугового зварювання (ДЗ). Використання такої інформації досить утруднене тим обставиною, що для конкретного виду матеріалу заданої товщини рекомендованому значенню швидкості зварювання відповідає вузький діапазон зварювального струму, який обмежується неприпустимою геометрією зварного шва, прожогом або неприпустимою величиною підрізу шва.

Аналіз даних показує, що при зварюванні листових конструкцій відмінності в значеннях зварювального струму досягають 150%. Така відмінність між рекомендованими даними по зварювальному струму і швидкості зварювання, очевидно, викликане впливом неконтрольованих параметрів, які призводять до великої зміни розмірів зварних швів, що збільшує витрати по відпрацюванню технології зварювання нових виробів через проведення попередніх експериментів.

У зв'язку з освоєнням технології зварювання нових виробів виникає необхідність підбору режиму зварювання з проведенням якомога меншої кількості попередніх експериментів. При цьому часто попередні експерименти здійснюються на готових деталях, що збільшує частку браку і призводить до зростання собівартості готового виробу і зниженню ефективності виробництва. Тому для підвищення ефективності технологічної підготовки виробництва необхідно мати певний набір експериментально отриманих режимів зварювання для різних конструкцій технологічних пристосувань, що забезпечують отримання зварних швів з розмірами, регламентованими для з'єднання С4.

У зв'язку з великою трудомісткістю експериментального визначення взаємозв'язку «режим зварювання - розміри зварного шва» доцільно розглянути подані в літературі математичні моделі процесу зварювання, що зв'язують геометрію зварного шва стикових з'єднань з параметрами режиму ДЗ.

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

Для практичного застосування цікаві математичні моделі, узагальнюючі експериментальні дані, які отримують в формі рівняння регресії або у вигляді статечних залежностей. Такі нечисленні статистичні моделі форми шва при ДЗ представлені в роботах [1 – 4]. Вони зручні для розрахунку параметрів зварювання і можуть бути досить точними (~ 8-10%), проте їх застосування обмежується межами варійованих в моделі параметрів.

Ступінь впливу вхідних параметрів зварювання на формування зворотного валика при стикового аргонодугового зварюванні розглядали в статті [1]. Дані аналізу апіорної інформації (літературні дані, патентна інформація) дозволили виділити 7 основних факторів, що впливають на геометрію стикового шва при зварюванні алюмінієвих сплавів: зварювальний струм X_1 , швидкість зварювання X_2 , довжину дуги X_3 , швидкість подачі присадного дроту X_4 , зміщення електрода від стику X_5 , зміщення кромки при складанні X_6 . Досліди проводили за планом дрібного факторного експерименту з реплікою, яка дорівнює 1/16 від повного факторного експерименту 2^7 . Вимірювали ширину зварного шва із зворотного боку з'єднання e_1 на зразках зі сплаву АМг6 товщиною 2 мм. Після статистичної обробки результатів експериментів, було отримано рівняння регресії, яке описує вплив досліджуваних факторів на геометрію зварного шва:

$$e_1 = 4,2 + 3,1X_1 - 1,25X_2 + 0,13X_3 - 0,0125X_4 - 0,05X_5 - 0,3X_6$$

Авторами не були зазначені діапазони регулювання основних факторів і точність їх стабілізації при зварюванні.

В роботі [2] була зроблена спроба узагальнити дані, накопичені в науковій літературі в області зварювального виробництва про основні параметри режиму ДЗ різних матеріалів в захисних газах неплавким електродом - зварювальному струмі $I_{зв}$ і швидкості зварювання $V_{зв}$. В результаті статистичної обробки залежність $I_{зв} = f(V_{зв})$ для зварювання алюмінію з присадочною дротом мала вигляд $I_{зв} = 36,97 \cdot 8^{0,78} \cdot V_{зв}^{0,29}$, а для зварювання титану без присадного дроту - $I_{зв} = 19,2 \cdot 8$

$V_{зв}^{0,408}$, де δ - товщина матеріалу, мм. Авторами не було зазначено варіант отримання зварного з'єднання - на мідній підкладці або на вазі.

У статті [5] на основі статистичних методів були розроблені регресійні моделі ДЗ з урахуванням впливу безлічі факторів, проведена їх оптимізація, визначено оптимальне поєднання параметрів режиму, при якому проведено зварювання, керована за моделями, отриманими з рівнянь квазістатичного рівноваги зварювальної ванни або балансу енергій дуги. В якості критеріїв оптимізації використовували сталість розмірів зварного шва (ширини шва e , висоти зворотного валика g_1 і посилення шва g). В якості значущих чинників використовували зварювальний струм $I_{зв}$ і функцію $1/V_{зв}^{1/2}$. Авторами статті не були представлені кількісні взаємозв'язку геометрії зварного шва з параметрами режиму ДС.

Відомо, що кількість експериментів при збільшенні вхідних параметрів зростає. Для вирішення цієї проблеми Тагучі [6] запропонував метод використання спеціальної конструкції ортогональних рядів для дослідження всієї області параметрів з малим числом експериментів. Результати експерименту потім перетворювалися в стосунки signal-to-noise (S / N). Таким чином, оптимальний рівень параметрів процесу був рівень з найвищим співвідношенням (S / N). Як джерело живлення використовувався 250 GTSW Thermalarc змінного струму. Матеріал - пластини з алюмінію 1100 товщиною 1,6 мм, $l_d = 2,4 \dots 3,2$ мм, $V_{зв} = 24 \dots 46$ см/хв, $V_{п.п.} = 15 \dots 25$ см/хв, $I_{зв} = 80 \dots 110$ А. Після чого результати було піддано статистичному аналізу дисперсії (ANOVA). Про збіг експериментальних і розрахункових авторами зазначено не було, а також не були представлені кількісні взаємозв'язку геометрії зварного шва з параметрами режиму зварювання і не вказано критерій, який зумовлює оптимізацію параметрів режиму зварювання.

Узагальнюючи вищевикладене, можна зробити висновок, що побудова математичних моделей, що визначають взаємозв'язок параметрів геометрії зварного шва і параметрів режимів зварювання, на основі регресійних залежностей, що не відображають фізику реальних процесів зварювання, пов'язане з наступними труднощами:

- 1) великим обсягом проведених експериментів;
- 2) побудовою математичних моделей тільки на одному матеріалі;

3) низькою точністю в широких діапазонах варійованих параметрів режимів зварювання.

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

Застосування аналітичних досліджень, заснованих на методах аналітичного опису температурних полів, розроблених М.М. Рикаліним, при яких введення схеми рухомих джерел нагріву дозволяє спростити моделі поширення тепла від реальних зварювальних джерел.

Перші моделі геометрії проплавлення, запропоновані в роботі [7], були засновані на використанні принципу місцевого впливу. Теплове джерело моделювалося в просторі як точковий, лінійний або поверхневий. Кожне з них могло бути нерухомим, рухомих або швидкорухомим [8].

Для однопрохідної зварювання листів з наскрізним проплавленням, використовуючи розрахункову схему швидкорухомого лінійного джерела нагріву в пластині без тепловіддачі, для розрахунку ширини зварного шва запропоновано такий вираз [7, 8]:

$$e = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi \cdot \exp \frac{\delta}{\delta}}} \cdot q_n}{c\rho(T_{пл} - T_n)}, \quad (1.1)$$

де q_n – погонна енергія, Дж/см; δ – товщина пластини, см; $c\rho$ – об'ємна теплоємність, Дж/(см³·К); T_n і $T_{пл}$ – початкова і температура плавлення, °С.

Надалі М.М. Рикаліним і А.І. Бекетовим були використані безрозмірні критерії, що характеризують довжину, ширину і площу зварювальної ванни і залежні від зварюваного матеріалу і прийнятої схеми джерела тепла [9]. Отримані таким чином емпіричні формули для визначення основних параметрів зварювальної ванни як з боку лицьового шва, так і зі зворотного боку пластини у всьому діапазоні рекомендованих режимів ДС стали Х18Н10Т з наскрізним проплавленням. На жаль, авторами роботи не були зазначені діапазони зміни параметрів режимів зварювання.

При дослідженні розмірів ванни авторами [10, 11] були використані залежності

розмірів зварювальної ванни від параметрів режиму зварювання у вигляді зв'язку між безрозмірними критеріями, такими ж як і в роботі [12]:

$$\xi = \frac{vL}{a}, \eta = \frac{VB}{2a}, \sigma = \frac{V^2 F}{a^2} \quad (1.2)$$

і критерієм режиму:

$$p = \frac{q}{\lambda T_{нз}} \sqrt{\frac{V}{a\delta}}, \quad (1.3)$$

де F - площа проплавлення, см^2 ; λ - коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{см}\cdot^\circ\text{C})$; a - коефіцієнт температуропровідності, $\text{см}/\text{с}^2$.

З використанням безрозмірних критеріїв були оброблені результати експериментального визначення параметрів геометрії зварного шва при ДЗ в нижньому положенні пластин зі сталі X18H10T товщиною 4-6 мм. Вольфрамовий електрод при цьому заточували на конус (з кутом $30-40^\circ$ з притуплюванням діаметром 1-2 мм) перед кожним запалюванням зварювальної дуги, що забезпечувало більшу стабільність теплового режиму дуги. Довжину дуги підтримували постійною, рівною 0,8 мм при зварюванні пластин товщиною 2 - 4 мм і 1 мм - для пластин 5 - 6 мм. За неякісні були прийняті режими, зварювання на яких приводила до нестабільності зварювальної ванни і прожогам. Для кількісної характеристики розкиду експериментальних даних були визначені параметри геометрії зварного шва на 12 зразках, отриманих на строго постійному режимі ($I_{зв} = 210 \text{ А}$, $V_{зв} = 0,239 \text{ см}/\text{с}$). Помилка при аналітичному визначенні параметрів проплавлення не перевищувала в середньому 10%. Для лицьового боку шва залежність ширини шва від параметрів режиму зварювання мала вигляд [10, 11]:

$$e = \frac{0,348 \sqrt{a}}{\lambda T_n} \frac{q_n}{\sqrt{v\delta}}, \quad (1.4)$$

Для обраної сторони шву:

$$e_1 = \frac{0,214 \sqrt{a}}{\lambda T_n} \frac{q_n}{\sqrt{v\delta}} \quad (1.5)$$

Авторами роботи не були наведені дані по дослідженому діапазоні швидкості

зварювання і сили зварювального струму.

Зазначені в роботах [12, 13] розбіжності між експериментальними і розрахунковими даними пояснюється прийнятою схемою ідеалізації процесу, а також відсутністю обліку енергій фазових переходів в перерахованих математичних моделях.

Авторами роботи [14] була зроблена спроба пов'язати ширину зварного шва з коефіцієнтом зосередженості зварювальної дуги k по схемі нагріву рухомим нормально-круговим джерелом нагрівання для напівнескінченного тіла. В результаті дослідження встановлено зростання коефіцієнта зосередженості джерела при збільшенні швидкості зварювання і зменшення потужності дуги. Експериментальна перевірка розрахункової методики здійснювалася при аргонодугового зварюванні вольфрамовим електродом корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т товщиною 2 мм на наступних режимах - $I_{зв} = 180\text{А}$, $U = 13\text{В}$ і $V_{зв} = 1,26\text{ см/с}$, при якому було визначено коефіцієнт k , що дорівнює $6,7\text{ см}^2$. Експериментальні та розрахункові дані цієї роботи збігалися з задовільною точністю при $\eta_i = 0,7 \dots 0,75$, але кількісні взаємозв'язку параметрів геометрії зварного шва з параметрами режимів зварювання в роботі наведені не були.

У статті [15] вивчали вплив режимів автоматичного ДЗ на процес формування кореневого шву. Дослідження проводили на пластинах зі сталі Х18Н10Т товщиною 3 мм, з параметрами режиму зварювання: $I_{зв} = 100 \dots 240\text{А}$, $V_{зв} = 3 \dots 37\text{ м/год}$, $l_d = 0,8 - 3,0\text{ мм}$. При зварюванні застосовували вольфрамовий електрод діаметром 4 мм з постійним кутом заточки. В роботі визначали характер зміни ширини зварного шва, посилення і висоту зворотного валика від зазначених параметрів режиму. Отримані дані показали, що залежно ширини від зварювального струму і швидкості зварювання в основному досить точно описуються рівнянням поширення тепла потужного лінійного швидкого руху джерела без тепловіддачі в навколишнє середовище:

$$e = \frac{0,484 q}{V_{св} c \gamma^l \delta} \quad (1.6)$$

де γ^l - питома вага металу ванни, г.; q - повна потужність дуги, Вт.

Ефективний ККД для дугового зварювання η був прийнятий рівним 0,5. Використовуючи раніше отримані дані щодо визначення обсягу металу ванни, в роботі отримана емпірична формула для визначення посилення зварного шва:

$$g = k \alpha T_{пл} \delta \text{ (см)}, \quad (1.7)$$

де k - коефіцієнт, для аргонодугового зварювання $k = 1,33 \dots 1,84$ [15].

Зіставлення даних, обчислених за формулою (1.6), з результатами експериментів показало їх задовільну збіжність на режимах з малою погонною енергією (похибка не перевищувала 15%).

У роботах [16, 17, 18] розрахунок ширини зварного шва здійснювався за формулою (1.6), що і в роботі [15], але з використанням поправочних емпіричних коефіцієнтів. Зварювання вольфрамовим електродом здійснювалася в нижньому положенні без оброблення крайок. Такі коефіцієнти отримані для маловуглецевої і нержавіючої сталі, титану та міді. Досліди проводилися на пластинах з сталей Ст.3 $\delta = 4$ мм, 1X18H10T $\delta = 2,5; 4$ і 6 мм, сплаву ВТ-1 $\delta = 3$ мм. Авторами роботи не були представлені кількісні взаємозв'язку геометрії зварного шва з параметрами режимів ДЗ.

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

Складність визначення параметрів джерела нагріву обумовлена складністю взаємодії реального джерела теплоти (електричної дуги, лазерного або електронного променя) з металом, тому часто параметри джерела визначають за розмірами зварювальної ванни, одержуваної при виконанні експериментальних досліджень. У той же час сучасні фізико-математичні методи досліджень дозволяють не тільки істотно скоротити час експериментальної частини досліджень, а й знизити витрати на їх проведення.

При моделюванні теплового джерела з використанням чисельних методів для визначення температурного поля найбільш широко застосовують методи скінченних елементів (МСЕ) і методи скінченних різниць (МСР). На відміну від моделей, заснованих на класичній теорії теплових полів, такі моделі мають ряд переваг:

- 1) теплофізичні властивості матеріалу задаються функцією від температури;
- 2) є можливість розв'язання контактних теплових задач;
- 3) можливий вибір необхідної точності розрахунку варіюванням параметрами скінчено-елементної сітки моделі.

Для вибору раціональної схеми джерел нагріву, розглянемо основні їх види, які використовуються для моделювання зварювальних процесів.

1.4.1. Полуеліпсоїдальна модель Голдака

Для зварювальних процесів, в яких пульсації дуги порівняно невеликі, через відсутність обліку ефекту жорсткості дуги модель розподілу Гаусса володіє низькою точністю. Ще одним важливим фактором є те, що поверхневе джерело нагріву не враховує утворився кратер зварювальної ванни, що виникає навіть при малих величинах погонної енергії. Для вирішення цієї проблеми Голдаком [19, 20] спочатку була запропонована модель полуеліпсоїдального джерела нагріву, в якому тепловий потік поширюється не по нормально-круговому закону, а по всьому об'єму джерела. Тепловий потік досягає максимального значення в центрі джерела нагріву, розподіл за обсягом якого задається відповідно до рис. 1.5 наступним виразом:

$$q(x,y,z)=q_{\max}\exp(-Ax^2-By^2-Cz^2), \quad (1.8)$$

де A , B и C - коефіцієнти розподілу теплового потоку.

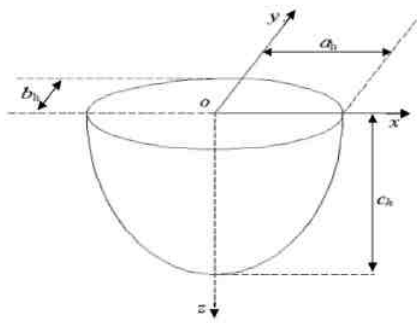


Рисунок 1.5. Полуеліпсоїдальне розподілення тепла в джерелі

Так як тепловий потік розподілений всередині об'єму джерела, то його щільність може бути виражена таким чином:

$$q = \eta UI = \frac{q_m \pi \sqrt{\pi}}{2\sqrt{ABC}}, \quad (1.9)$$

де

$$q_m = \frac{2Q\sqrt{ABC}}{\pi\sqrt{\pi}} \quad (1.10)$$

Припускаючи, що 95% енергії вводиться всередину полуеліпсоїда, тепловий потік обчислюється таким чином:

$$q(a_h, 0, 0) = q_m \exp(-A a_h^2) = 0,05 q_m \quad (1.11)$$

Приймаючи $A=3/a_h^2$, $B=3/b_h^2$, $C=3/c_h^2$ і підставляючи їх в вирази (1.9, 1.10), отримаємо:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q}{a_h b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_h^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right) \quad (1.12)$$

При рівності коефіцієнтів a_h , b_h і c_h модель перетворюється в напівсферичну. Напівсферичне джерело нагріву може бути використаний для опису зварювальної ванни при зварюванні стрічковим електродом.

1.4.2. Модель подвійного еліпсоїда Голдака

Для зменшення похибки, що виникає при описі форми зварювальної ванни для концентрованих джерел нагріву, Голдаком було запропоновано комбіноване джерело нагріву [21], що складається з двох полуеліпсоїдів, представлених на рис. 1.6. У зарубіжній науковій літературі це джерело має назву подвійний еліпсоїд Голдака.

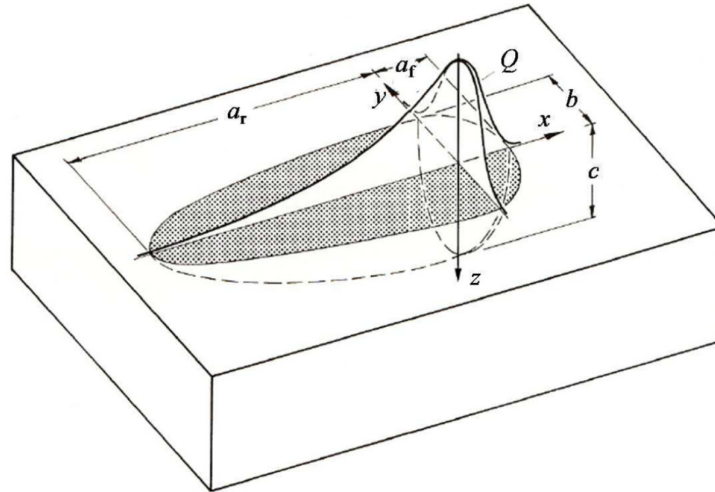


Рисунок 1.6. Розподіл теплового потоку в моделі подвійного еліпсоїда Голдака

Для точки всередині першого полуелліпсоїда, розташованої в передній частині зварювальної ванни, тепловий потік визначається за наступним виразом:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q)}{a^1 b^1 c^1 \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0 \quad (1.13)$$

де f_f - частина теплового потоку в передній частині ванни.

Для точок (x, y, z) всередині другого полуелліпсоїда в задній частині зварювальної ванни, тепловий потік описується виразом:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_z Q)}{a^1 b^1 c^1 \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x < 0 \quad (1.14)$$

де f_z - тепловий потік в задній частині зварювальної ванни.

Застосування подібних джерел нагріву доцільно для опису геометрії зварного шва при неповному проплавлення дуговими способами зварювання. Наприклад, зварні шви з поперечним перерізом виду відповідно до рис. 1.7, а. Для моделювання зварних швів більш складної форми, як на рисунку 1.7, б, використовується поєднання чотирьох і більше еліпсоїдів для точного моделювання [22].

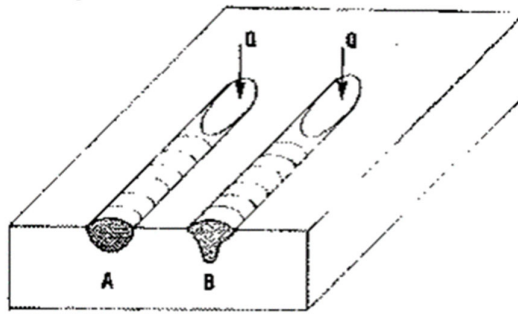


Рисунок 1.7. Опис використання подвійного еліпсоїда (А) і більш точна форма опису чотирма еліпсоїдами (В)

1.4.3. Модель кінчного джерела нагріву

Модель кінчного джерела нагріву використовується для визначення параметрів геометрії наскрізного проплавлення при електронно-променевої та плазмової зварюваннях [23 – 25]. Вона являє собою комбінацію нормально-кругових джерел нагріву, введених з лицьової і зворотної сторони зварного шва. Вид джерела нагріву і схема розподілу теплових потоків представлені на рис. 1.8.

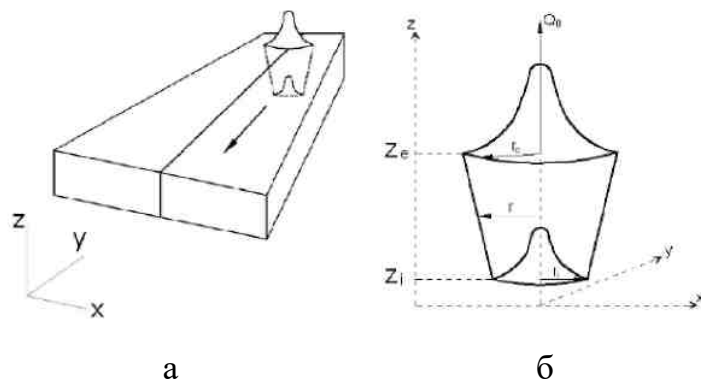


Рисунок 1.8. Рухоме кінчне джерело нагріву (а) і його параметри (б)

Введений в виріб тепловий потік виражається формулою:

$$q(x, y, z) = q_0 \exp\left(\frac{-r^2}{r_0^2}\right), \quad (1.15)$$

де r і r_0 дорівнюють відповідно:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (1.16)$$

$$r_0 = r_e - (r_e - r_i) * (z_e - z) / (z_e - z_i), \quad (1.17)$$

де q_r - питомий тепловий потік; r_e - радіус плями нагріву у верхній площині $z=z_e$; r_i - радіус плями нагріву у верхній площині $z=z_i$.

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

Рішення рівняння теплопровідності чисельними методами дозволяє моделювати форму проплавлення, що виникає від впливу електронного пучка, лазерного та плазменного зварювання і високоамперних зварювальних дуг. Для подібних випадків Голдаком [21, 26] була запропонована комплексна модель розподілу потужностей у вигляді двох полуеліпсоїдів. Для оцінки величини залишкових зварювальних напружень у стиковому з'єднанні з аустенітної сталі ALSI 304 товщиною 1,6 мм в роботі [27], в якому геометрія зварного шва стикового з'єднання описувалася подвійним еліпсоїдом Голдака [21]. Авторами роботи не було вказано похибка розробленої чисельної моделі.

У статті [28] розглядали розподіл залишкових напружень, що виникають при ДЗ з наскрізним проплавленням жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718 з використанням сполученого термодеомаційного аналізу. Верифікація розподілу залишкових напружень за результатами чисельного моделювання проводилася з використанням техніки нейтронної дифракції. Зразки представляли собою тонкі пластини розмірами $200 \times 100 \times 2$ мм. Зварювання проводили на режимі $I_{зв} = 80$ А, $U = 9$ В, $V_{зв} = 1,59$ мм/с. Для визначення розподілу температури від реального джерела нагріву використовували термопари, розташовані поперек зварного шва. Для суміщеного термодеомаційного аналізу використовували скінченно-елементний комплекс ABAQUS. Геометрія наскрізного проплавлення визначалася по ізотермі плавлення від рухомого джерела, питомий тепловий потік якого задавався за формулою:

$$q_r = \frac{\eta_u Q}{\pi a^2}, \quad (1.18)$$

де a - розмір скінченного елемента, м.

Конвективна тепловіддача була врахована з верхньої і нижньої граней зразка за формулою:

$$q_{\text{conv}}(T)=h(T_0-T_{\infty}), \quad (1.19)$$

де h - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_0 - початкова температура ($T=20^{\circ}\text{C}$).

Для аналізу залишкових напружень після зварювання використовували тип лінійної пружнопластичної задачі з ізотропним зміцненням. В результаті порівняння експериментальних даних про розподіл залишкових напружень та численних, виявили їх задовільну збіжність (розбіжність з експериментом не більше 10%). При цьому автори статті встановили, що при вирішенні пружнопластичної задачі доцільно використання скінченні елементи «високого» порядку (гексаедрічеський тип з 20 вузлами) і в якості методу вирішення було необхідно застосовувати або 3D лагранжевий метод, або 2D метод Ейлера [28].

Робота [29] присвячена визначенню залишкових напружень і деформацій при впливі поверхневого джерела нагріву при зварюванні сталі 25 (GB / T 699-1988) товщиною 2 мм з наскрізним проплавленням. ДЗ проводилося на наступних режимах: $I_{\text{зв}} = 180 \text{ А}$, $U = 10 \text{ В}$, $V_{\text{зв}} = 10 \text{ мм/с}$, $\eta_i = 0,75$, $r_n = 6 \text{ мм}$. Початкова температура становила 25°C . Крім того, для скорочення часу обчислень і зниження вимог до конфігурації комп'ютера, використовували 3D-модель половини пластини. Реалізація 3D моделі отримана в комплексі ANSYS 11.0. Результатами роботи послужили рекомендації щодо оптимізації параметрів режимів зварювання, що забезпечують найменші залишкові напруження і деформації виробу. Однак, авторами статті не були вказані діапазони варіювання параметрів режиму зварювання.

В роботі [30] для отримання картини розподілу залишкових напружень по товщині при електронно-променевого зварювання титанового сплаву ТА15 товщиною 50 мм форма геометрія наскрізного проплавлення описувалася комбінацією 2D-конічного об'ємного джерела тепла з комбінацією Гауссового і лінійного джерел нагріву. Про точність отриманих результатів авторами зазначено не було.

Рішення рівняння теплопровідності для пластини зі сталі 12Х18Н10Т

розмірами $200 \cdot 100 \cdot 10$ мм методом функції Гріна приведено в роботі [23]. За допомогою комбінованого джерела нагріву була розрахована геометрія зварного шва з наскрізним проплавленням при електронно-променевому зварюванні, термічні цикли зварювання і миттєві швидкості охолодження. Комбінований джерело нагріву представляв собою поєднання лінійного джерела нагріву по глибині і точкового на поверхні. Авторами була представлена лише методика для моделювання геометрії наскрізного проплавлення.

Геометрія стикового зварного шва при ДЗ в роботі [31] описувалася изотермами плавлення від рухомого комбінованого джерела, що представляє собою поєднання двох нормально-кругових джерел, один з яких вводився з лицьової поверхні шва, інший - через поверхню, що розділяє зразок на 2 частини. Авторами не були приведені відомості про матеріал вироби і діапазонах режимів зварювання.

У статті [32] наведені математичні методи аналізу імпульсного впливу концентрованого джерела (зварювальної дуги) на перебіг процесів теплопереносу, плавлення, кристалізації і утворення супутніх їм деформаційних процесів при ДЗ пластин $80 \cdot 40 \cdot 8$ мм з низьколегованої сталі 10Г2С. Для вирішення завдання методом кінцевих різниць тривимірну задачу розбивали на 2 двовимірні. Авторами були визначені режими зварювання, що забезпечують зварному з'єднанню більш рівномірну впорядковану структуру по всій довжині і підвищену міцність в зоні термічного впливу. Подібний підхід дозволив істотно знизити розрахунковий час чисельної моделі не втрачаючи при цьому в точності отриманих результатів. Схожа методика застосована в роботах [30, 33] для оцінки керуючих впливів при зварюванні на якість зварних з'єднань, а також для оцінки впливу коливань параметрів режимів орбітального зварювання на розміри зварного шва в багаторівневому описі технологічних процесів.

В роботі [34] розроблено методику, що базується на припущенні про наявність тісного кореляційного зв'язку між формою хвостової частини зварювальної ванни і характером кристалізації. Для опису форми зварювальної ванни використовували модель подвійного еліпсоїда Голдака в кінцево-різницевої постановці рішення диференціального нелінійного рівняння теплопровідності. Чисельна модель враховувала граничні умови конвективного і променевої тепловіддачі з поверхні.

Експериментальну верифікацію чисельної моделі проводили на листових заготовках з аустенітної хромомарганцевистої сталі 12Х15Г9НД товщиною 2,0 і 2,5 мм і аустенітної хромонікелевої сталі 12Х18Н10Т товщиною 1,0 мм. Режими зварювання підбирали таким чином, щоб забезпечити наскрізне проплавлення пластин і зберегти постійної ширину зварювальної ванни. Зіставлення розрахункових даних з експериментальними термічними циклами і макрошліфів зони проплавлення підтвердили адекватність побудованої чисельної моделі, при цьому похибка розрахунків не перевищувала 7%.

При очевидній доцільності застосування комбінованих джерел нагрівання для опису геометрії зварного шва стикових з'єднань в розглянутих вище роботах авторами були дані конкретні рекомендації з розподілу ефективної потужності між джерелами нагріву, яку необхідно визначати експериментально для підвищення точності виконуваних розрахунків. Тому при використанні комбінованих джерел нагрівання з'являються додаткові невідомі параметри моделі. Невідомими параметрами при використанні комбінованих джерел нагрівання при моделюванні ДЗ, крім величини ефективної потужності, є:

1) для поєднання, нормально-кругового розподіленого і зосередженого лінійного джерел [19, 35] - величина розподілу ефективної потужності між джерелами і коефіцієнт зосередженості розподіленого джерела;

2) для напівеліпсоїдального джерела Голдака [20, 26] - коефіцієнти a_h , b_h і c_h , що описують геометрію зварного шва (рис. 1.5);

3) для подвійного еліпсоїда Голдак [21, 34, 36, 37, 38,] - коефіцієнти a^1 , b^1 і c^1 , описують геометрію зварного шва, і величина розподілу ефективної потужності між напів еліпсоїдами (рис. 1.5);

4) для конічного джерела [23, 24, 25, 39] - розподіл ефективної потужності між джерелами і коефіцієнти зосередженості кожного джерела;

5) для поєднання трьох і більше джерел [22, 27, 40] - розподіл ефективної потужності між джерелами нагріву і коефіцієнти, що описують геометрію зварного шва.

Зрозуміло, що чисельні моделі, які використовують схеми нагріву з великою кількістю джерел нагріву, для опису зварного шва стикових з'єднань з

тонколистових матеріалів не підходять. Модель еліпсоїдального джерела описує геометрію зварного шва з наскрізним проплавленням з великою похибкою, при цьому маємо велику кількість варійованих параметрів в моделі - більше чотирьох. Отже, застосування подібної моделі для опису геометрії зварного шва при ДЗ тонколистового матеріалу не доцільно. Найбільш універсальним поєднанням джерел нагріву для ДЗ тонколистових матеріалів є модель подвійного еліпсоїда Голдака, оскільки кількість невідомих параметрів при моделюванні в цьому випадку становить не більше трьох. При цьому розподіл ефективної потужності між джерелами можна прийняти постійним для певної товщини матеріалу.

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

Застосування комп'ютерних технологій значно розширює можливості обчислювального експерименту, що, зокрема, дає можливість з безлічі варіантів технології зварювання вибрати найбільш підходящу або спрогнозувати якість зварного шва [41].

Основне завдання прогнозування якості зварного шва складається в оцінці ймовірності виходу одного з показників формування шва (наприклад, ширини зворотного валика або посилення зварного шва) за допустиме значення для даного з'єднання. Для цих цілей і багатьох інших, пов'язаних зі зменшенням трудомісткості технологічної підготовки виробництва і вдосконаленням технології різних видів зварювання, широко застосовують комерційні комп'ютерні програмні продукти і програмні комплекси.

Для чисельної оцінки впливу термічного циклу зварювання на розподіл температури у виробі використовують скінчено -різницеву (MCP) або скінчено-елементну (MCE) схему.

Використовуючи MCE, вся 3D - модель зварного виробу являє собою область, в якій шукається рішення диференціальних рівнянь, розбивається на кінцеве кількість подобластей (елементів). У кожному з елементів довільно вибирається вид

апроксимуючої функції. Значення функцій на границях елементів (в вузлах) є рішенням задачі і заздалегідь невідомі. Коефіцієнти апроксимуючих функцій зазвичай визначаються з умови рівності значення сусідніх функцій на границях між елементами (в вузлах). Потім ці коефіцієнти виражаються через значення функцій у вузлах елементів і складається система лінійних алгебраїчних рівнянь [24, 42 – 46].

При використанні МКР на розрахунковій області будується сітка, потім вибирається різницева схема і для кожного вузла сітки записується різницеве рівняння (аналог вихідного рівняння, але з використання різницевої схеми), потім проводиться облік крайових умов (для крайових умов другого і третього роду також будується деяка розносна схема). Виходить система лінійних алгебраїчних рівнянь, вирішуючи яку у відповіді отримують наближені значення рішення у вузлах [34, 47].

Однією з проблем, що виникають в процесі освоєння скінчено-елементних програмних пакетів, є висока складність і адаптивність до вирішення завдань, що виникають в процесі моделювання процесу зварювання для нових виробів і не передбачених розробниками. У зв'язку з цим розробниками цих програмних комплексів введені ряд спрощень і припущень, що знижують точність результатів чисельних розрахунків. Основні допущення, пов'язані з вирішенням завдань в області зварювального виробництва:

1) для зручності опису геометрії зварного шва при наскрізному проплавлення для всіх видів зварювання використовується об'ємне джерело нагріву типу комбінації об'ємних і розподілених джерел нагріву, що викликає суттєві похибки при описі розподілу температурних полів по товщині зразка, наприклад, при зварюванні плавиться, або електронно-променевого зварювання;

2) Закритість і відсутність можливості редагування вбудованих баз даних матеріалів, а також параметрів, які суттєво впливають на величину тепловкладення в зварюваний зразок (ефективний ККД, конвективний і променистий теплообмін, контактна термічна провідність);

3) Умовне закріплення зразків при зварюванні і неможливість обліку зусилля притиснення виробу в оснащенні.

Ці припущення істотно впливають на розподіл температурних полів і знижують точність розрахунків. Тому доцільно використовувати математичну модель, повністю засновану на експериментальних даних, які є вхідними параметрами чисельної моделі. При цьому для опису температурних полів необхідно використовувати джерело нагріву типу подвійного еліпсоїда Голдака. Крім того, для отримання більш точного результату моделювання найдоцільніше використовувати скінчено-елементний програмний комплекс з відкритою можливістю настройки параметрів розв'язуваної задачі, наприклад, ANSYS.

Висновки та постановка задач дослідження

Побудова математичних моделей, що визначають взаємозв'язок параметрів геометрії зварного шва і параметрів режимів зварювання, на основі регресійних залежностей, що не відображають фізику реальних процесів зварювання, пов'язане з великим обсягом проведених експериментів, побудовою математичних моделей тільки на одному матеріалі й низькою точністю в широких діапазонах варійованих параметрів режимів зварювання.

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.

При моделюванні теплового джерела з використанням чисельних методів для визначення температурного поля найбільш широко застосовують методи скінченних елементів і методи скінченних різниць. На відміну від моделей, заснованих на класичній теорії теплових полів, такі моделі мають ряд переваг, а саме: теплофізичні властивості матеріалу задаються функцією від температури,

можливість розв'язання контактних теплових задач та можливий вибір необхідної точності розрахунку варіюванням параметрами скінчено-елементної сітки моделі.

Чисельні моделі, які використовують схеми нагріву з великою кількістю джерел нагріву, для опису зварного шва стикових з'єднань з тонколистових матеріалів не підходять.

Найбільш універсальним поєднанням джерел нагріву для ДЗ тонколистових матеріалів є модель подвійного еліпсоїда Голдака.

Для отримання найбільш точного результату моделювання доцільно використовувати скінчено-елементний програмний комплекс з відкритою можливістю настройки параметрів розв'язуваної задачі, наприклад, ANSYS

Тому **метою робити** було розробити комп'ютерну модель, засновану на методі скінченних елементів, для моделювання температурних процесів у тонколистових зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів при дуговому зварюванні неплавким електродом, імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності і плазмового автоматичному зварюванні з присадним дротом.

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 режимами дугових способів зварювання.

2. Обґрунтувати метод дослідження і обрати програмний комплекс для моделювання джерела тепла з використанням чисельних методів для визначення температурних полів при дугових способах зварювання.

3. Розробити комп'ютерну модель, що описує основні параметри геометрії зварного шва стикового з'єднання при дуговому зварюванні тонколистових зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів.

4. Провести моделювання для дослідження теплового стану зварних з'єднань при зварюванні неплавким електродом, імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності і плазмового автоматичному зварюванні з присадним дротом..

5. Провести аналіз результатів моделювання.

6. Дати рекомендації щодо можливості використання обраної моделі

джерела нагріву для дугових способів зварювання.

					MP 8.132.6121зм.01.05.02 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Методика досліджень	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив		Гарковенко В.С.					26	17
Перевірів		Матвієнко М.В.						
Рецензент								
Н. Контр.		Матвієнко М.В.						
Зав. каф.		Єрмолаєв Г.В.				ХННІ НУК		

2. Методика досліджень

2.1. Програмні комплекси для моделювання зварювання

На базі кінцево-елементного підходу розроблено велику кількість потужних програмних комплексів. Серед них можна відзначити такі як ABAQUS, ADINA, ANSYS, COSMOS/M, MSC/NASTRAN, ЛІРА, SCAD, STARK. Більшість з них має велику бібліотеку скінчених елементів і дає можливість виконувати моделювання процесів зварювання враховуючі фізичну і геометричну не лінійність, ортотропію матеріалу, температурні навантаження і т. д.

NX Nastran — інструмент для проведення комп'ютерного інженерного аналізу (CAE) проєктованих виробів методом кінцевих елементів (МСЕ) від компанії Siemens PLM Software. NX Nastran разом з додатковими програмами для рішення призначений для рішення як статичних, так і динамічних лінійних і нелінійних задач інженерного аналізу.

У 1964 р. національне агентство з авіації і дослідженню космічного простору США (NASA) для підтримки проєктів, пов'язаних з космічними дослідженнями і, зокрема, для проведення аналізу і проєктування засоби виведення ракети носія «Сатурн V», ставить задача розробки програмного пакета для проведення кінцево-елементного аналізу виробів. Випуск першої комерційної версії пакета програм NASTRAN (NASA STRuctural ANalysis) відбувся в 1972 році. Однією з компаній, що брали участь у розробці, була MSC (MacNeal-Schwendler Corporation). У 2003 році, компанія UGS придбала вихідний код програми у MSC.Software, середу і права для подальшої розробки і пропозиції вирішення на ринку. Сучасне рішення від компанії Siemens PLM Software - вирішувач NX Nastran.

Вирішувач NX Nastran забезпечує виконання повного набору інженерних розрахунків, включаючи розрахунок напружено-деформованого стану, власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, вирішення задач теплопередачі, дослідження сталих і несталих процесів, нелінійних статичних процесів, нелінійних динамічних перехідних процесів, аналіз частотних характеристик, відгуку на динамічні та випадкові впливи.

Вирішувач NX Nastran доступний спільно з інженерними системами для підготовки розрахункових моделей NX і Femap або у вигляді самостійного застосування, використовуюваного на спеціально виділених CAE серверах або високопродуктивних обчислювальних кластерах з будь-якими сумісними інструментами пре-/постпроцессорной обробки NX Nastran.

Система NX Nastran поширена в таких галузях промисловості, як аерокосмічна, автомобільна, суднобудування, важке машинобудування, медицина і товари народного споживання, забезпечуючи аналіз напружень, вібрацій, довговічності, передачі тепла, шуму / акустики. Система забезпечує високу ступінь інтеграції з великим числом CAE додатків.

Пакет засобів розробки NX Nastran SDK надає користувачам програми інструменти розробки, призначені для спрощення використання можливостей NX Nastran у власних клієнтських і галузевих інструментах.

У грудні 2008 р. Siemens PLM Software повідомила про те, що за допомогою NX Nastran фахівцям компанії вдалося вирішити складну статичну лінійну просторову задачу механіки деформування твердого тіла (МДТТ) для крила літака, що знаходиться під дією згинальних навантажень. Для РЕ рішення задачі була розроблена повномасштабна просторова РЕ модель, яка містила ~ 98 млн оболонкових і ~ 49 млн просторових кінцевих елементів. Загальне число рівнянь - ~ 500 млн рівнянь. Час РЕ розрахунку склало менше 18-ти годин на 8-ми ядерному сервері IBM Power 570.

LS-DYNA - багатоцільова програма, яка використовує явне формулювання методу кінцевих елементів (МКЕ), - призначена для аналізу нелінійного динамічного відгуку тривимірних пружних структур. LS-DYNA була задумана як частина оборонної програми США і до цих пір є нею.

Повністю розпаралелений і векторизований високоефективний алгоритм рішення нелінійних і швидкоплинних процесів, автоматизований процес вирішення контактних задач, а також безліч функцій з перевірки одержуваного рішення дозволяють інженерам у всьому світі успішно вирішувати найскладніші задача удару, руйнування і формування.

Унікальний математичний апарат включає більше 25 алгоритмів контактної взаємодії, більше 100 рівнянь стану, що дозволяє вирішувати задача: нелінійної динаміки; теплові; руйнування; розвитку тріщин; контакту; квазістатіки; Ейлерової формулювання МКЕ; довільної Лагранжо-ейлерової поведінки; акустики в реальному масштабі часу; багатодисциплінарного аналізу: міцність, теплофізика, акустика;

Всі наведені аналітичні інструменти дозволяють моделювати широкий круг реальних завдань. Ось лише деякі програми можливостей LS-DYNA:

1. Оцінка опірності удару (краш-тест): автомобілів, літальних апаратів, поїздів, суден;
2. Аналіз динамічної міцності автомобільних комплектуючих: кузов, бампери, колісні диски, рульові колонки і т.д. при русі по нерівній поверхні;
3. Оцінка безпеки пасажирів: взаємодія повітряної подушки і віртуальної моделі людини з моделюванням ременів безпеки, прорив подушки безпеки та ін;
4. Формування металу, скла, пластиків: прокат, видавлювання, штампування, волочіння, сверхпластичне формування, різка, прокат профілів, лиття, глибока витяжка, гідроформування (включаючи великі деформації) і багатоступінчасті процеси;
5. Птицестійкість і задача про відрив лопатки турбінних двигунів;
6. Взаємодія потоків рідини і газу з конструкцією;
7. Вибухова навантаження на вироби;
8. Задача проникнення (пробивання броньовий пластини, впровадження в ґрунт пенетратора і т.п.);
9. Розрахунок зварних, клепаных і болтових з'єднань;
10. Біомедичні програми;
11. Моделювання землетрусів.

ADAMS (Mechanical Dynamics, Inc.). На сьогоднішній день ADAMS знаходить застосування в автомобілебудуванні, авіабудуванні, космонавтиці, залізничному транспорті, загальному машинобудуванні, суднобудуванні, робототехніці, приладобудуванні, біомеханіки і навіть в індустрії відпочинку та розваг.

ADAMS надає користувачам наступні можливості:

1. Створювати комп'ютерну модель системи з твердих і деформівних елементів, з'єднаних між собою різними зв'язками і шарнірами;
2. Створювати параметризованих модель на базі ядра твердотілого моделювання Parasolid, а також обмінюватися геометричними моделями в форматах IGES, STEP, DXF, DWG, STL;
3. Візуалізувати модель конструкції потужними засобами графіки;
4. Задавати вимушені переміщення і руху елементів системи і прикладати активні зовнішні сили і моменти;
5. Проводити статичний, динамічний і кінематичний аналіз системи;
6. Візуалізувати рух системи і фіксувати задані події;
7. Аналізувати вплив варіацій параметрів конструктивних елементів на поведінку системи (аналіз чутливості);
8. Оптимізувати виріб по заданому критерію;
9. Отримувати результати аналізу в зручному для оцінки та інтерпретації вигляді: графіки, таблиці, анімація (високоякісна анімація, в тому числі і спеціалізовані - з «точки зору водія», обліт рухомого виробу камерою по заданій траєкторії, «що стежить камера» і т.д.);
10. Виробляти двосторонній обмін інформацією з програмними комплексами автоматизованого проектування, кінцево-елементного аналізу, анімації;
11. Налаштовувати комплекс під типові задачі конкретного користувача;
12. Використовувати спеціалізовані модулі, орієнтовані на конкретні галузі техніки (автомобільна, залізнична);
13. Визначати всі параметри руху системи як з абсолютно жорстких, так і з пружних ланок; обчислювати зусилля в зв'язках і реакції в опорах з повною історією зміни за часом, що приходять зусилля на елементи управління; визначати взаємне переміщення складових частин, переміщення та кути повороту в шарнірах; проводити статичний та модальний аналіз і багато іншого.

Star-CD (Computational Dynamics) була першою в світі програмою, що включила в себе процедуру так званих ковзних сіток. Ефективна паралелізація алгоритму рішення, заснованого на застосуванні методу кінцевих обсягів, в

поєднанні з унікальними методиками автоматизованого розбиття області течії дозволяє моделювати задачу будь-якого ступеня складності геометричної.

Star-CD є багатоцільовим єдиним CFD-пакетом, що надає користувачеві наступні можливості для рішення задач механіки рідин і газів: Стаціонарні та нестаціонарні течії; Ламінарні течії - модель Ньютона і неньютонівських рідини; Турбулентні течії (застосовується декілька найбільш відомих моделей); Стискувані і нестискувані (включаючи близько і надзвукові); Теплопереніс (конвективний, радіаційний, теплопровідність з урахуванням твердих тіл); Массопереніс; Хімічні реакції; Горіння газоподібного, рідкого і твердого палива; Розподілене опір (наприклад, в пористих середовищах, теплообмінниках); Багатокомпонентні перебігу; Багатофазні потоки - модель Лагранжа (дисперсні гази - тверде тіло, газ - рідина, рідина - тверде тіло, рідина - рідина); Багатофазні потоки - модель Ейлера; Вільні поверхні.

До числа інших можливостей відносяться: Графічний і командний введення;

Спеціалізовані режими роботи «новачок» / «експерт», супроводжувані інтерактивними підтвердженнями і засобами підказки; Великий набір засобів побудови сіток, включаючи автоматизоване згущення; Імпорт геометричних моделей у форматах STL, IGES і VDAFS; Інтерфейси до CAD / CAE - програмам, включаючи трансляцію кінцево-елементних моделей, графічне представлення результатів та ін: Ansys, HEXAR, ICEM, I-DEAS, Nastran, Patran, Hypermech і SAMM; Різноманітні засоби візуалізації та обробки результатів (векторні, кольорні контурні заливки, ізоповерхні, перетини, трасування частинок, анімація тощо); Екстаполяція результатів на сітці і поверхні довільного виду (використовуються для видачі результатів у кінцево-елементні пакети); Побудова графіків.

Як препроцесор в Star-CD використовується SAMM (Semi Automatic Meshing Methodology - «напівавтоматична технологія розбивки») розробка інжинірингової фірми Adarco. SAMM надає наступні можливості: Використання змішаних сіток як з чотирьох традиційних (наприклад, гексагональних і тетраедричних), так і з унікальних зрізаних призматичних елементів; Процедура автоматичної «зшивання» полів параметрів в суміжних областях з незбіжними розбивкою - довільний інтерфейс; Автоматизоване адаптивне згущення, засноване на оцінці помилки

розрахунку; Динамічне спотворення (підстроювання) сітки для вирішення завдань зі змінними граничними умовами (наприклад, поршневі двигуни); Тимчасово-залежні, так звані ковзні сітки з використанням алгоритму «довільний інтерфейс» для лопаткових машин та ін; Додаткові адаптивні процедури перебудови (такі, як динамічне впровадження та видалення елементів); Множинні обертаються системи координат для моделювання процесів, що відбуваються в багатоступінчастих турбінних насосах, вентиляторах і т.д.; Засоби обліку циклічної симетрії або інших видів періодичності для лопаткових і багатоступінчастих машин з метою зменшення розмірності задачі.

Pro/Engineer. Pro/MESH, Pro/FEM-POST і Pro/SURFACE - модулі Pro/Engineer для розрахунку на міцність методом кінцевих елементів.

Pro/MESH забезпечує конструктору можливість створення сітки кінцевих елементів для моделей, отриманих в Pro/Engineer. Тонкостінні і твердотільні об'єкти можуть автоматично моделюватися, розбиватися і експортуватися в різні програми для подальшого аналізу. Pro/MESH є додатковим модулем сімейства Pro/Engineer.

Pro/FEM-POST забезпечує повний набір можливостей постпроцесора для аналізу результатів, отриманих методом кінцевих елементів (МКЕ), і надає користувачам можливість відображати результати аналізу в середовищі Pro/Engineer. Pro/FEM-POST спрощує процес наскрізного проектування / аналізу в інтегрованому середовищі, яка об'єднує повну асоціативність Pro/Engineer з можливостями сучасного постпроцесора, для аналізу результатів, отриманих методом кінцевих елементів. Дружній користувачеві інтерфейс забезпечує перевірку правильності рішень при проектуванні і оптимізації на ранніх етапах розробки виробу. Pro/MESH є необхідною умовою побудови сітки для Pro / FEM-POST.

Pro/SURFACE розширює можливості Pro/Engineer, надаючи інструменти для ефективної розробки та вдосконалення найбільш складних геометричних поверхонь і поверхонь вільної форми. Так як всі поверхні, створені в Pro/SURFACE, повністю асоціативні, численні проекти можуть оцінюватися легко і швидко. За допомогою

Pro/SURFACE розробники можуть створювати моделі зі складними поверхнями для аерокосмічної промисловості, а також товари народного споживання.

Pro/MESH швидко і просто розбиває моделі Pro/Engineer, що скорочує цикл "моделювання-тестування" та покращує якість виробу. Після розбиття модель може бути передана в зовнішні програми аналізу для обчислення термонапруженого стану, потоку рідини, переміщення, теплопередачі, механізми утворення тріщин, втоми і уявлення про корозійному середовищі. Цей модуль автоматично створює сітку відповідно до вимог конструктора, який може інтерактивно уточнювати її там, де це необхідно. Користувачі можуть швидко оцінювати різні конфігурації моделей при різних навколишніх і геометричних умовах. Ця інтерактивна зв'язок скорочує час аналізу, дозволяє досліджувати більше варіантів конструкції, забезпечує більшу гнучкість проекту і якості виробу. Pro / MESH дає конструктору можливість створювати моделі для аналізу методом кінцевих елементів. Ці можливості, зокрема, дозволяють конструктору проводити наступні дії:

Швидко створювати сітки кінцевих елементів. Для створення моделі в Pro/MESH необхідно пройти наступні етапи. По-перше, параметричні навантаження і граничні умови прикладаються безпосередньо на геометрію (поверхні, грані або точки). Точність розбиття визначається допустимими глобальними та/або локальними розмірами елемента і властивостями матеріалу, визначеними у моделі. І останній етап - Pro/MESH автоматично розбиває деталь, показує результати при перегляді і визначає якість розбиття.

Створювати різні елементи. Pro/MESH дозволяє створювати оболонкові елементи (трикутні і чотирикутні), об'ємні (тетраедри), масові елементи і різні однорозмірних bar-елементи (наприклад, бруси, гар-елементи, пружини, балки).

Визначати положення тонкостінного оболонкового елемента. Pro/MESH полегшує високоточний аналіз тонкостінних моделей (наприклад, пластмасове лиття та деталі з металевого листа) з автоматичним визначенням пар на паралельних поверхнях і розташуванням оболонкового елемента на центральній поверхні. Якщо краща зовнішня, внутрішня або визначена користувачем поверхню, вона може бути вказана.

Визначати контактні умови в кінцево-елементної збірці моделей. Pro/MESH дозволяє конструктору визначати контактні умови між "склеєними" деталями в збірці. Якщо необхідно, відповідний bar-елемент автоматично створюється для моделювання контактних умов. Ті ж самі параметричні навантаження, граничні умови і розміри елементів, які визначені в деталі, використовуються в збірці.

Модифіковані параметри та умови. Навантаження, граничні умови, розміри елементів можуть бути модифіковані в будь-який час у процесі проектування. Навантаження і розмір елемента можуть контролюватися також шляхом використання співвідношення.

Експортувати дані розбиття для зовнішнього аналізу.

Весь процес аналізу, від створення сітки до постобробки, може бути проведений в середовищі Pro/Engineer. Відразу після створення кінцево-елементної моделі вона може бути виведена в різні програми MCE для вирішення безпосередньо з інтерфейсу. Формати файлів, в яких можуть бути виведені дані про розбиття, включають такі промислові стандарти, як PATRAN, ANSYS, NASTRAN, SUPERTAB, COSMOS/M, Pro/MESH може створювати нейтральний файл FEM Neutral, що переносить інформацію про кінцево-елементної моделі в будь певної користувачем транслятор. Крім цього, перебуваючи в середовищі Pro/Engineer, користувач може переглянути результати розрахунків, використовуючи Pro/FEM-POST.

ABAQUS. ABAQUS/Standard - це кінцево-елементна програма загального призначення, розроблена для найбільш складних інженерних розрахунків, виконуваних на виробництві. За допомогою наявних у ній засобів моделювання може бути вирішене широкий спектр прикладних задач.

ABAQUS/Standard розроблений для ефективної роботи на комп'ютерах від персональних, працюють із системами Windows NT або UNIX, до серверів і суперкомп'ютерів. Він дозволяє використовувати різні методи аналізу в тимчасовій і частотній області. Ці методи поділяються на два класи: «узагальнені типи аналізу», в яких задача може бути лінійною або нелінійною, і «лінеаризовану аналіз», в якому лінійний відгук моделі розраховується щодо спільного, можливо нелінійного, вихідного стану. Один розрахунок може включати в себе різні типи аналізів.

Типи аналізу в ABAQUS/Standard можуть бути об'єднані в будь-який фізично розумній формі. Наприклад, один розрахунок може об'єднувати нелінійний статичний аналіз і наступний за ним нелінійний динамічний аналіз, в якому результат статичного аналізу забезпечує початкові умови для визначення динамічного відгуку.

Користувач розбиває історію навантаження на кроки, ґрунтуючись виключно на зручності. Для чисто лінійного аналізу кожен крок є, по суті, випадком навантаження. У разі нелінійного аналізу, кожен крок - це один щабель у спільній історії навантаження. Тип аналізу задається всередині кожного кроку.

Лінійний аналіз може бути лінеаризовану відхиленням щодо нелінійного базового стану. Наприклад, деяка деталь з гуми може бути деформована і попередньо напружена під час нелінійного статичного аналізу, за яким може слідувати серія лінеаризовану розрахунків для отримання власних частот і малого вібраційного відгуку деталі, використовуючи жорсткість і геометрію базового стану.

У нелінійному аналізі початковими умовами для кожного кроку є стан моделі в кінці попереднього кроку. Така залежність забезпечує зручність при аналізі складних історій навантаження, таких як технологічний процес. Кожен крок поділяється на збільшення; в кожному збільшенні ABAQUS/Standard виробляє ітерації для визначення рівноважного стану, використовуючи в більшості випадків повний метод Ньютона. Критерій збіжності ABAQUS/Standard визначає автоматично, хоча користувач може вручну відкоригувати ці величини.

Результати аналізу можуть передаватися між ABAQUS/Standard і ABAQUS/Explicit. Така передача результатів дозволяє працювати з моделлю використовуючи обидва вирішувача ABAQUS і найбільш підходящі технології рішення на кожному рівні моделювання. Наприклад, деякі деталі можуть бути об'єднані в ABAQUS/Standard в збірку для моделювання попереднього статичного навантаження, далі ця модель може бути використана в ABAQUS/Explicit для моделювання удару по попередньо навантаженої збірці. З іншого боку, моделювання штампування може бути виконано в ABAQUS/Explicit, а потім модель

може бути передана в ABAQUS/Standard для визначення величини пружінення, коли інструменти прибрані і деталь обрізана.

2.2. Програмний комплекс скінчено-елементного аналізу ANSYS

ANSYS - універсальна програмна система скінчено-елементного (MCE) аналізу, яка існує і розвивається протягом останніх 40 років, є досить популярною у фахівців в області комп'ютерного інжинірингу (CAE, Computer-Aided Engineering) і CE рішення лінійних і нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних просторових задач механіки деформування твердого тіла та механіки конструкцій (включаючи нестаціонарні геометрично і фізично нелінійні задачі контактної взаємодії елементів конструкцій), завдань механіки рідини і газу, теплопередачі і теплообміну, електродинаміки, акустики, а також механіки пов'язаних полів. Моделювання та аналіз в деяких областях промисловості дозволяє уникнути дорогих і тривалих циклів розробки типу «проектування - виготовлення - випробування». Система працює на основі геометричного ядра Parasolid [48].

Програмна система KE аналізу ANSYS розробляється американською компанією ANSYS Inc.. Компанія також випустила інші системи KE моделювання, у тому числі DesignSpace, AI Solutions (NASTRAN, Icem CFD); призначені для використання в більш специфічних галузях виробництва.

В якості стратегічного партнера фірма співпрацює з багатьма компаніями, допомагаючи їм провести необхідні зміни. Пропоновані фірмою ANSYS Inc. кошти чисельного моделювання та аналізу сумісні з деякими іншими пакетами, працюють на різних ОС. Програмна система ANSYS сполучається з відомими CAD-системами Unigraphics, CATIA, Pro/ENGINEER, SolidEdge, SolidWorks, Autodesk Inventor та деякими іншими.

Програмна система ANSYS є досить відомою CAE-системою, яка використовується на таких відомих підприємствах, як ABB, BMW, Boeing, Caterpillar, Daimler-Chrysler, Exxon, FIAT, Ford, БелАЗ, General Electric, Lockheed Martin, MeyerWerft, Mitsubishi, Siemens, Shell, Volkswagen-Audi та інші, а також застосовується на багатьох провідних підприємствах промисловості.

Перша реалізація програми значно відрізнялася від останніх її версій і стосувалася тільки рішення задач теплопередачі і міцності в лінійній постановці. Як і більшість інших програм того часу, вона працювала в пакетному режимі і лише на супер-ЕОМ.

На початку 70-х років ХХ століття в систему було внесено багато змін у зв'язку з впровадженням нової обчислювальної технології та реалізацією запитів користувачів. Були додані нелінійності різної природи, з'явилася можливість використовувати метод підконструкцій, була розширена бібліотека кінцевих елементів. Компанія звернула увагу на що з'явилися в той час персональні комп'ютери і векторні графічні термінали. Протягом декількох років ці нові апаратні кошти були освоєні програмними розробками компанії.

Наприкінці 70-х рр.. істотним доповненням до системи ANSYS, з'явився інтерактивний режим роботи. Це значно спростило процедури створення КЕ моделі та оцінку результатів (пре-і пост-процесорна обробка). Стало можливим використовувати інтерактивну графіку для перевірки геометрії моделі, заданих властивостей матеріалу і граничних умов перед початком рахунку. Графічна інформація могла бути відразу ж виведена на екран для інтерактивного контролю результатів рішення.

Ansys – єдина скінчено-елементна система з таким повним охопленням явищ різної фізичної природи: теплофізика, міцність, гідрогазодинаміка і електромагнетизм з можливістю вирішення пов'язаних завдань, які об'єднують всі перераховані види. Серед безлічі звичайно-елементних програмних комплексів Ansys - перший і єдиний, розроблений та сертифікований відповідно до міжнародних стандартів ISO 9000 та ISO 9001.

Препроцесор Ansys дозволяє не тільки створювати геометричні моделі власними коштами, але імпортувати вже готові, створені засобами CAD-систем. Треба зазначити, що геометрична модель в подальшому може бути модифікована будь-яким чином, оскільки при імпорті здійснюється перетрансляція даних в геометричний формат Ansys, і деталь не підміняється «недоторканною» кінцево-елементної сіткою. Користувач може видаляти несуттєві дрібні подробиці, добудовувати певні деталі, проводити згущення/розрідження сітки та інші

найважливіші операції, без яких подальший рішення може бути абсолютно некоректно або взагалі виявиться недосяжним. Побудова поверхонь, твердотільної і каркасної геометрії та внесення змін здійснюється засобами власного геометричного моделера.

Єдина система команд і єдина база даних Ansys повністю виключають проблеми інтеграції та взаємного обміну між зазначеними сферами. Більш того, в програмі використані спеціалізовані скінчені елементи, що мають крім переміщень і поворотів у вузлах, ступеня свободи по температурі, а також перемикання типу елемента, наприклад, електромагнітного на міцнісний. Завдяки цьому в програмі реалізовані унікальні можливості проведення пов'язаного аналізу.

2.3. Вибір типу скінчених елементів

Бібліотека скінчених елементів програми ANSYS містить більше 80 типів елементів, кожен з яких визначає придатність елемента до тієї чи іншої області розрахунків (прочностной, теплової, магнітний та електричний аналізи, рух рідини або пов'язані завдання), характерну форму елемента (лінійну, плоску, у вигляді бруска і т.д.), а також двовимірної (2-D) або тривимірність (3-D) елемента як геометричного тіла. Процедура генерації вузлів і елементів в ANSYS / Multiphysics складається з трьох основних кроків:

1. Установка атрибутів елементів;

2. Встановлення контролю розбиття. ANSYS передбачає велику кількість видів контролю розбиття, які ви можете відключити при відсутності необхідності;

3. Генерація розбиття.

Перший крок - вибір типу скінченного елемента (твердотільний SOLID, оболонка Shell, контактний Conta, пов'язаний Coupled Field) в залежності від типу розв'язуваних завдань;

Другий крок - установка контролю розбиття. Не обов'язковий до виконання, так як контроль розбиття за замовчуванням підходить для багатьох моделей.

Третій крок - вибір способу розбиття сітки і перевірка правильності побудови сітки. Інструменти розбиття (Mechtool) в ANSYS (Main Menu> Preprocessor>

Mechtool) представляють собою зручний інтерфейс для більшості випадків користування під наглядом розбиття.

Хоча всі функції доступні в інструментах розбиття, можна скористатися традиційними командами ANSYS (мова програмування APDL). Функції інструментів розбиття включають: Контроль рівня розмірів (SmartSize); Установка контролю розмірів елементів; Вибір форми елементів; Вибір типу розбиття (вільне або контрольований); Розбиття об'єктів твердотільної моделі; Побудова сітки; Очищення розбиття.

Розглянемо типи елементів для вирішення тривимірної задачі нелінійної теплопередачі. Для вирішення теплових задач, у відповідність з роботами [49] рекомендується використовувати тип SOLID 70. Різновиди вживаних типів кінцевих елементів представлені на рис. 2.1.

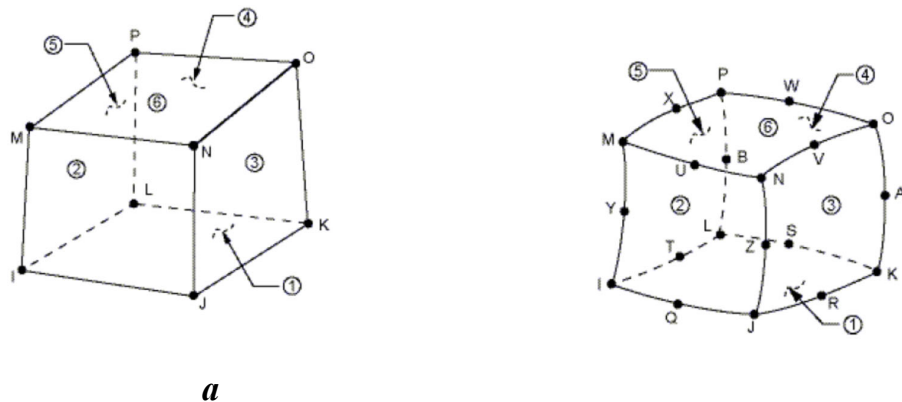


Рисунок 2.1. Типи скінченних елементів для вирішення 3D теплових задач:
SOLID 70 (a) і б) SOLID 90 (б)

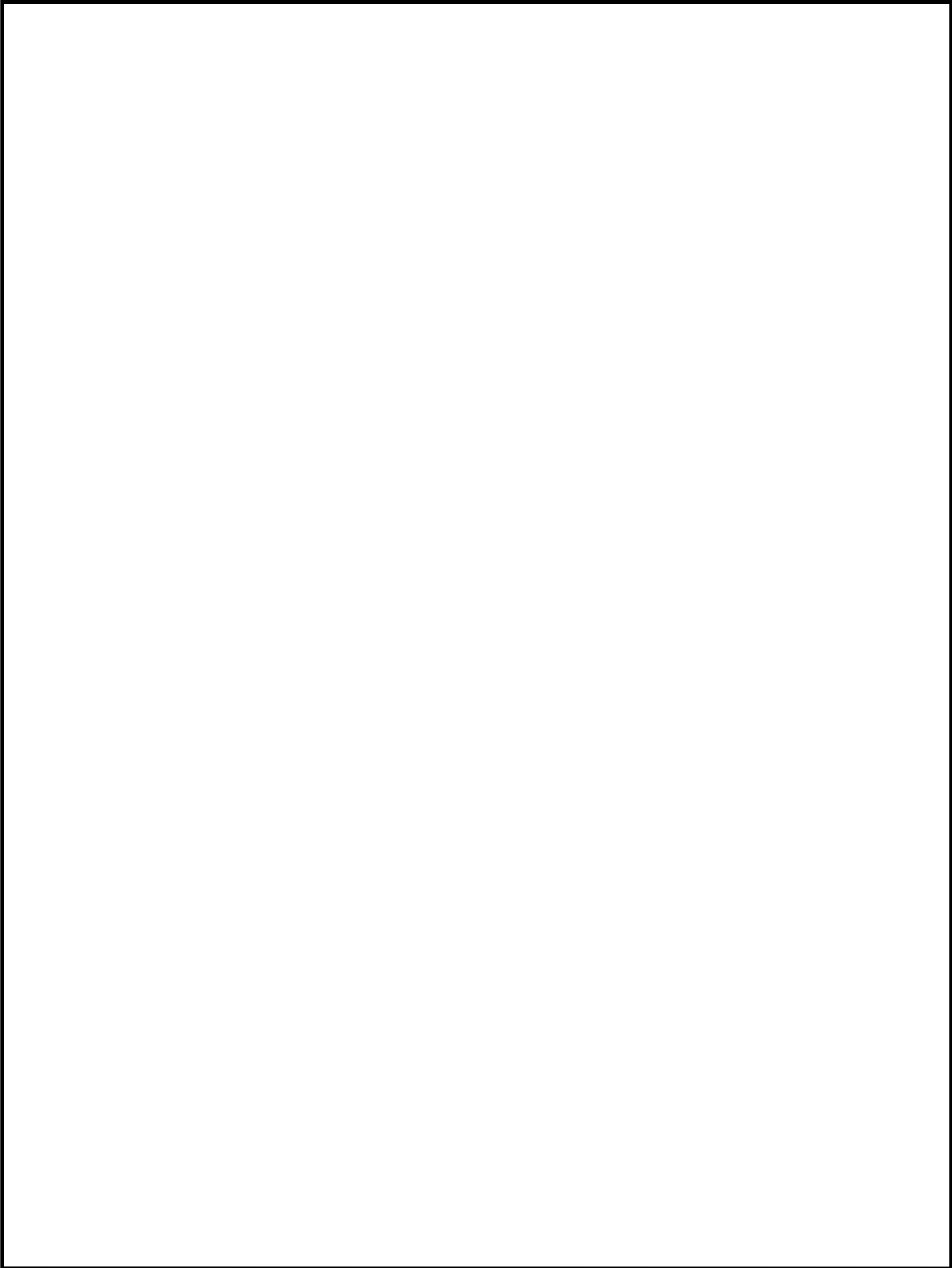
Елемент SOLID 70 підтримує можливість тривимірної теплопровідності. Він має 8 вузлів з одним ступенем свободи (температура) в кожному. В основному його застосовують для вирішення тривимірної теплової стаціонарної задачі (Steady-state) або нестаціонарного (Transient) аналізу. Цифрами на рис. 2.1,а показані межі, на які можна поставити навантаження. Головним недоліком цього елемента є неможливість використання його для розв'язання контактних теплових задач. Таку властивість має елемент SOLID 90, представлений на рис. 2.1, 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. Скінчено-елементним методом можна вирішувати практично будь-які інженерні задачі за короткий час. Для автоматизації вирішення використовуються програмні комплекси. Повноцінний програмний комплекс повинен надавати можливість препроцесінгу (геометричне моделювання, задача граничних та початкових умов), власне розв'язку та постпроцесінгу (обробка результатів). Всі потрібні можливості має програмний комплекс ANSYS.

2. Елементи SOLID 90 застосовуються для моделювання контактних теплових задач і мають можливість завдання теплового контакту, як функції від температури. Внаслідок чого, вибір цього типу є найбільш раціональним для вирішення поставленого завдання.



					MP 8.132.6121зм.01.05.03 ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка скінчено-елементної моделі				Літ.		Арк.	Аркуші	
Розробив	Гарковенко В.С.											43	
Перевірів	Матвієнко М.В.												
Рецензент												ХННІ НУК	
Н. Контр.	Матвієнко М.В.												
Зав. каф.	Єрмолаєв Г.В.												

3. Розробка скінчено-елементної моделі дугового зварювання

3.1. Скінчено -елементна модель

Даний аналіз проводився для визначення розподілу температурних полів при зварюванні неплавким електродом (TIG), імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності (MIG) і плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом з присадним дротом (PAW). Для моделювання процесів зварювання розроблена тривимірна скінчено-елементна модель з використанням мови APDL-команд комплексу ANSYS. Габаритні розміри зразка 200x200x5 мм. Скінчено-елементна модель розроблялася з урахуванням симетрії зразка. В області впливу дуги розмір елемента дорівнював 0,5 мм. Зовнішній вигляд зразка і скінчено-елементна модель показані на рис.3.1.

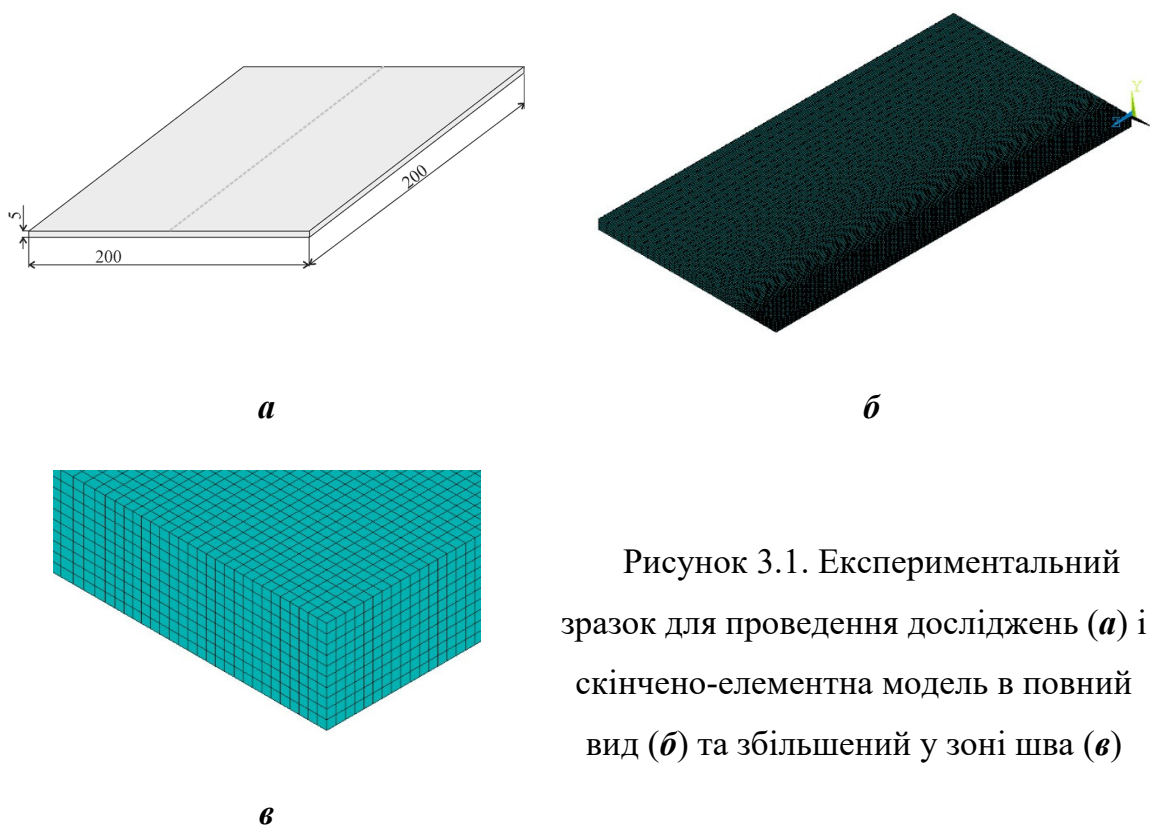


Рисунок 3.1. Експериментальний зразок для проведення досліджень (а) і скінчено-елементна модель в повний вид (б) та збільшений у зоні шва (в)

Для визначення оптимальної кількості скінченних елементів, особливо в області зварного шва, було проведено безліч випробувань. Були проведені різні випробування геометрії з 5, 10 і 20 елементами по товщині зразка. Встановлено, що

10 елементів (11 вузлових значень) по товщині листа 5 мм дають хорошу збіжність і менший час вирішення з достатньою точністю. При моделюванні термічного аналізу в ANSYS використовувався 20-вузловий тривимірний твердотільний елемент SOLID 90 (див. п. 2.3)

При зварюванні тепло концентрується в круговій області порівняно невеликого радіусу. При стандартному розрахунку, максимальна температура буде перевищувати температуру випаровування матеріалу. Для більш точного аналізу необхідно враховувати фазові зміни при виконанні моделювання методом скінченних елементів. Для цього необхідно, розглядати ентальпію як функцію температури і враховувати приховану теплоту плавлення матеріалу.

При моделюванні приймалися такі припущення:

- температура навколишнього середовища і початкова температура приймається 20°C;
- властивості матеріалу, такі як густина, теплопровідність, питома теплоємність і коефіцієнт випромінювання, є функцією від температури;
- втрати за рахунок конвекції і випромінювання враховуються з усіх поверхонь (крім площині симетрії зразка).

В роботі розглядаються наступні основні припущення та особливості теплової моделі:

- зміщення під час зварювання не впливають на розподіл тепла;
- враховані конвекційні і радіаційні ефекти.

Термічний аналіз - це аналіз на якому розраховуються і зберігаються розподілення температур для кожного етапу навантаження. Передбачається, що тепловий розрахунок в даний момент часу не залежить від структурних результатів на попередньому етапі.

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 АМг61. Хімічний склад алюмінієвого сплаву показаний в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Хімічний склад алюмінієвого сплаву АМг61 згідно ГОСТ 4784-97

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

Враховувалося, що термомеханічні властивості сплаву залежать від температури (рис. 3.2).

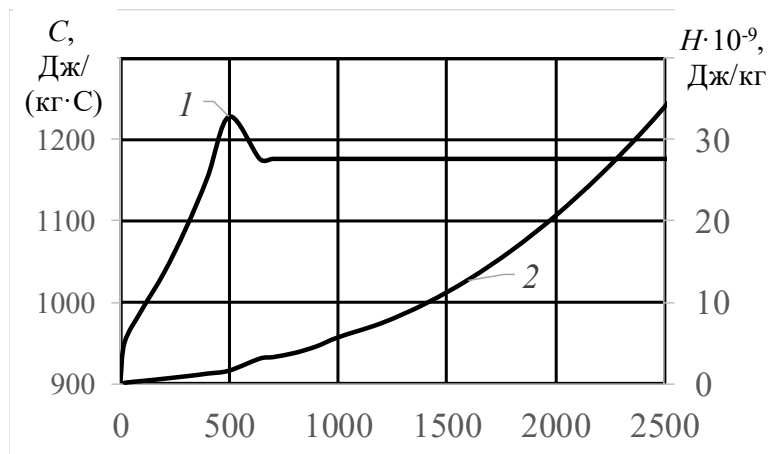


Рисунок 3.2. Теплофізичні властивості алюмінієвого сплаву АМг61:

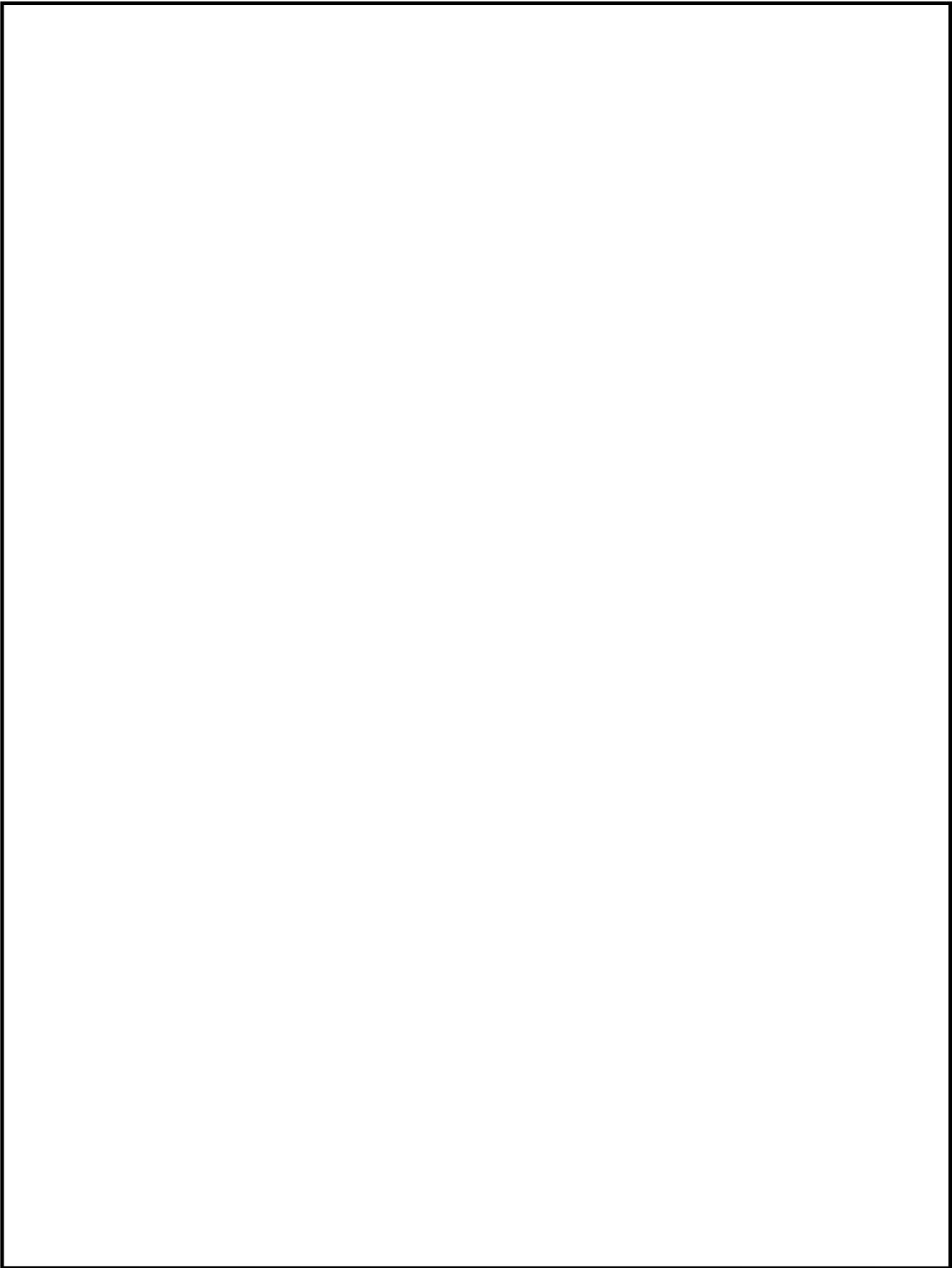
1 – питома теплоємність, 2 – ентальпія

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.

Висновки

1. Розроблено скінчено-елементну математичну модель для моделювання температурних полів при зварюванні неплавким електродом, імпульсно-дуговому зварюванні електродом, що плавиться, на зворотній полярності і плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом з присадним дротом.

2. Модель розроблена з урахуванням симетрії зразка і термомеханічних властивостей матеріалу. Для більш точного аналізу ентальпію розглядали як функцію температури і враховували приховану теплоту плавлення матеріалу.



					MP 8.132.6121зм.01.05.04 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Гарковенко В.С.				Моделювання температурної задачі при дуговому зварюванні	Літ.	Арк.	Аркушіів
Перевірів	Матвієнко М.В.						48	
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.	Матвієнко М.В.							
Зав. каф.	Єрмолаєв Г.В.							

4. Моделювання температурної задачі при дуговому зварюванні

4.1. Вихідні дані

Для моделювання зварювального джерела застосовувалася модель J. Goldak [50]. Геометричні моделі стикового зварного з'єднання, отриманого досліджуваними способами, створювалися на основі розмірів, знятих з виду зварювальної ванни (рис.1) [51]. Параметри режимів процесів зварювання неплавким електродом, імпульсно-дугового зварювання електродом, що плавиться, на зворотній полярності і плазмового автоматичного зварювання з присадним дротом пластин сплаву АМг61 наведені в таблиці 4.1.

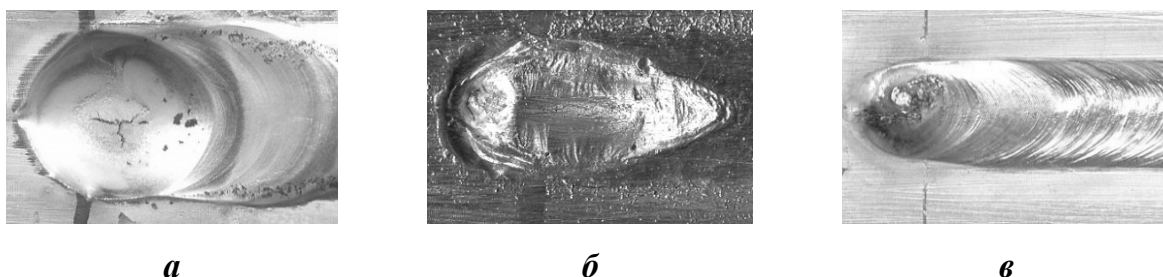


Рисунок. 4.1 Вид зварювальної ванни зварного з'єднання пластин з алюмінієвого сплаву АМг61 розмірами $200 \times 200 \times 5$ мм для способів: *а* – зварювання неплавким електродом; *б* – імпульсно-дугове зварювання; *в* – плазмове автоматичне зварювання

Геометричні параметри зварювальних ванн для цих процесів дугового зварювання наведені в таблиці 4.2.

В пункті 1.4. для моделювання процесів зварювання при TIG, MIG и PAW було обрано комбіноване джерело нагріву, що складається з двох полуеліпсоїдів, представлених на рис. 1.6. 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.

Таблиця 4.1 Параметри режимів процесів зварювання неплавким електродом, імпульсно-дугового зварювання електродом, що плавиться, на зворотній полярності і плазмового автоматичного зварювання пластин сплаву [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 дугового зварювання

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

4.2. Скінчено-елементне моделювання температурної задачі при зварюванні неплавким електродом

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 АМг61

Параметри моделі	Величина
Розмір еліпсоїду а, 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, f_f	1,5
Частина теплового потоку у задній частині ванни, f_r	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 АМг61.

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

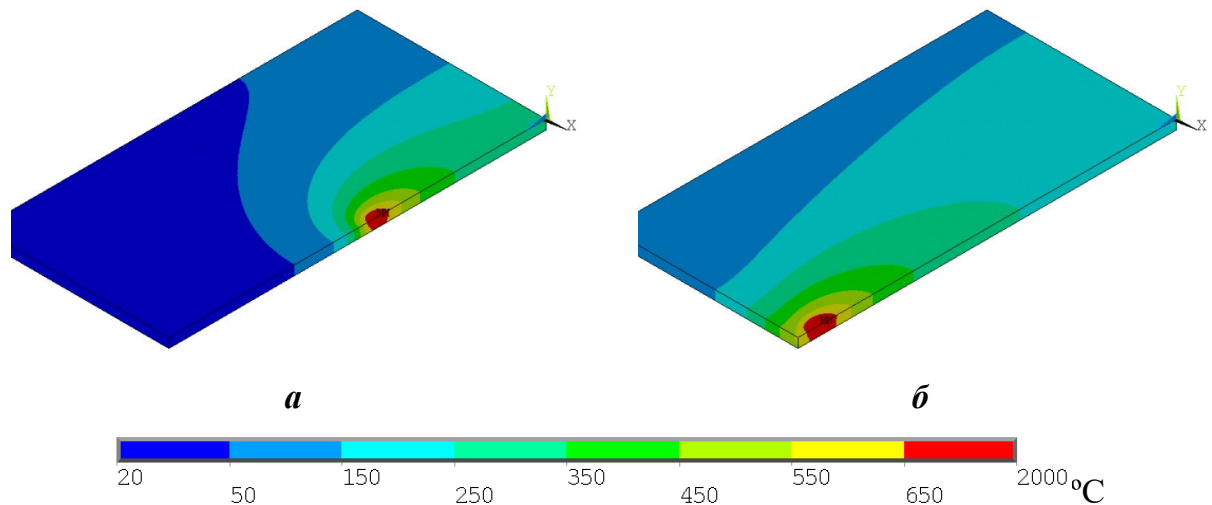


Рисунок 4.2. Розподіл температурних полів при зварюванні неплавким електродом: *a* - 30 с (посеред зразка), *б* - 60 с (кінець зразка)

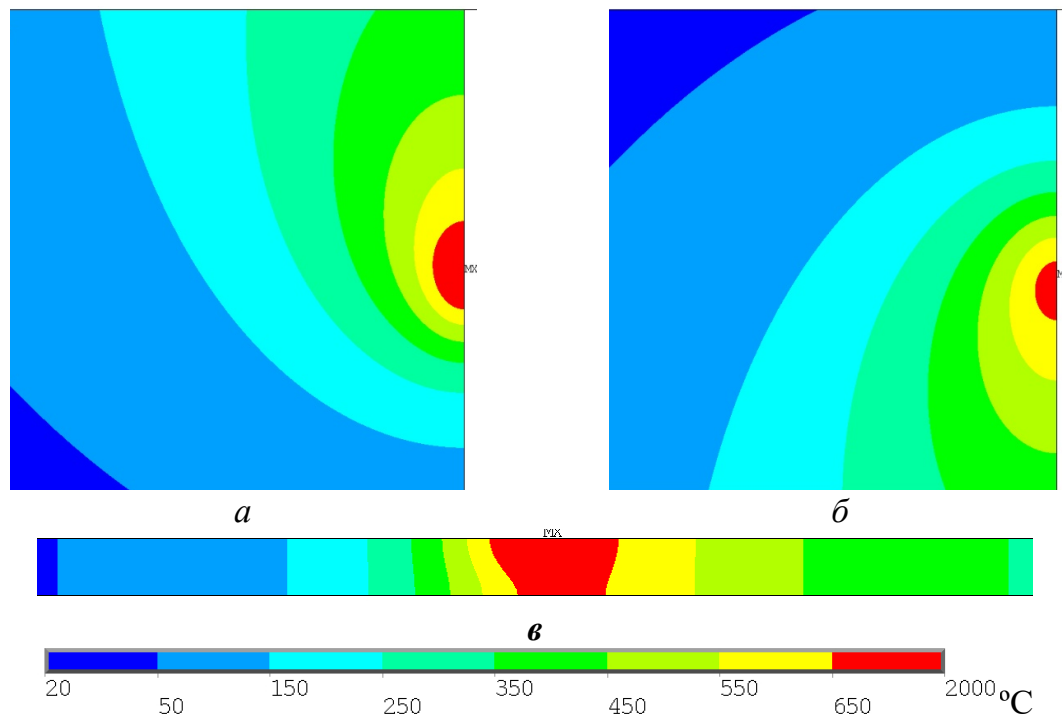


Рисунок 4.3. Розподіл температурних полів при зварюванні неплавким електродом: *a*-вид зверху, *б* - вид знизу, *в* - вид з боку симетричної площі (час зварювання 30 с)



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 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 температурної задачі при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності

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 пластин сплаву АМг61.

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 пластин сплаву АМг61

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

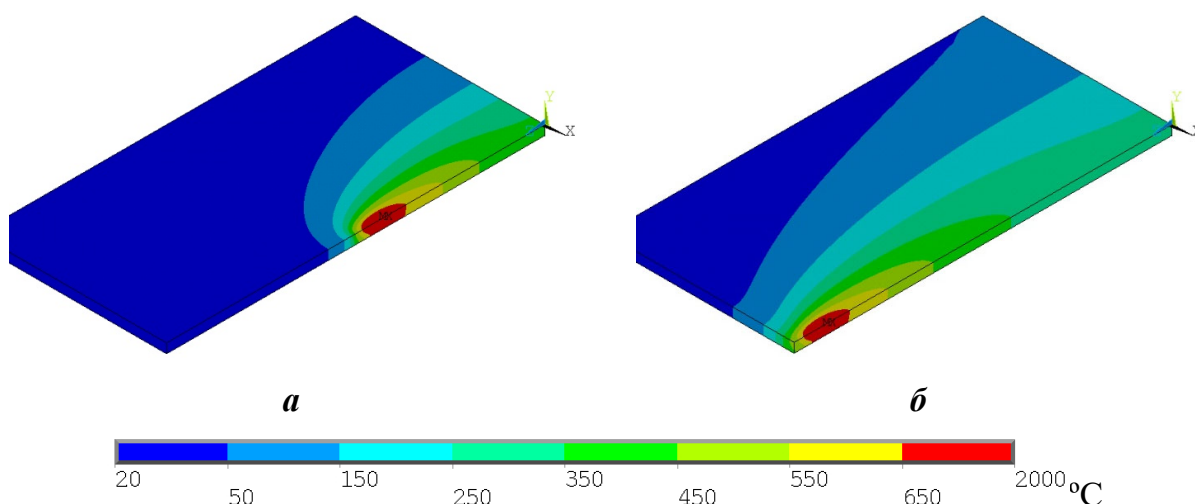


Рисунок 4.5. Розподіл температурних полів при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності: ***a*** - 10 с (посеред зразка), ***б*** - 20 с (кінець зразка)

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 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.

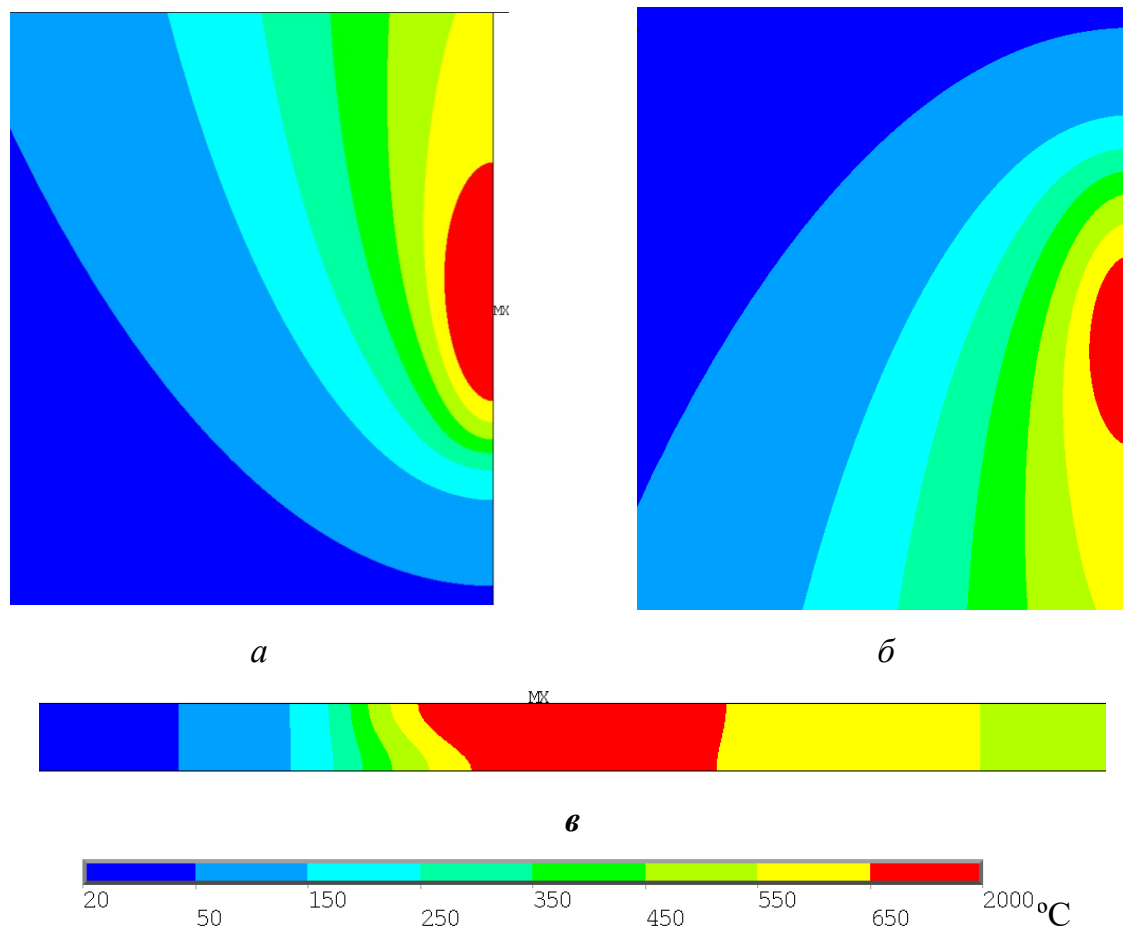


Рисунок 4.6. Розподіл температурних полів при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності: *а*-вид зверху, *б* - вид знизу, *в* - вид з боку симетричної площі (час зварювання 10 с)

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

4.3. Скінчено-елементне моделювання теплової задачі при плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом

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 пластин сплаву АМг61

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, ff	1,42
Частина теплового потоку у задній частині ванни, fr	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 пластин сплаву АМг61.

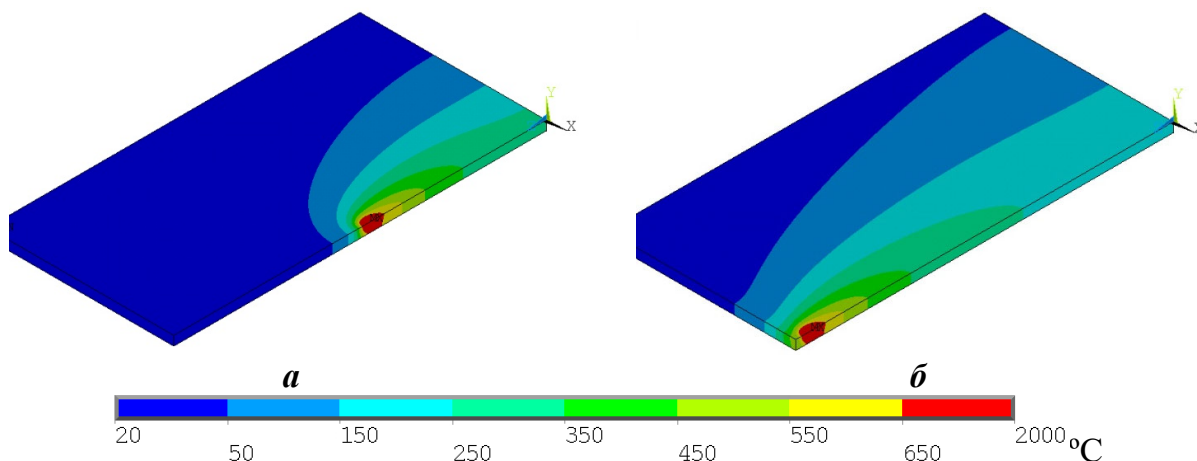


Рисунок 4.8. Розподіл температурних полів при плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом: **а** - 10 с (посеред зразка), **б** - 20 с (кінець зразка)

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.

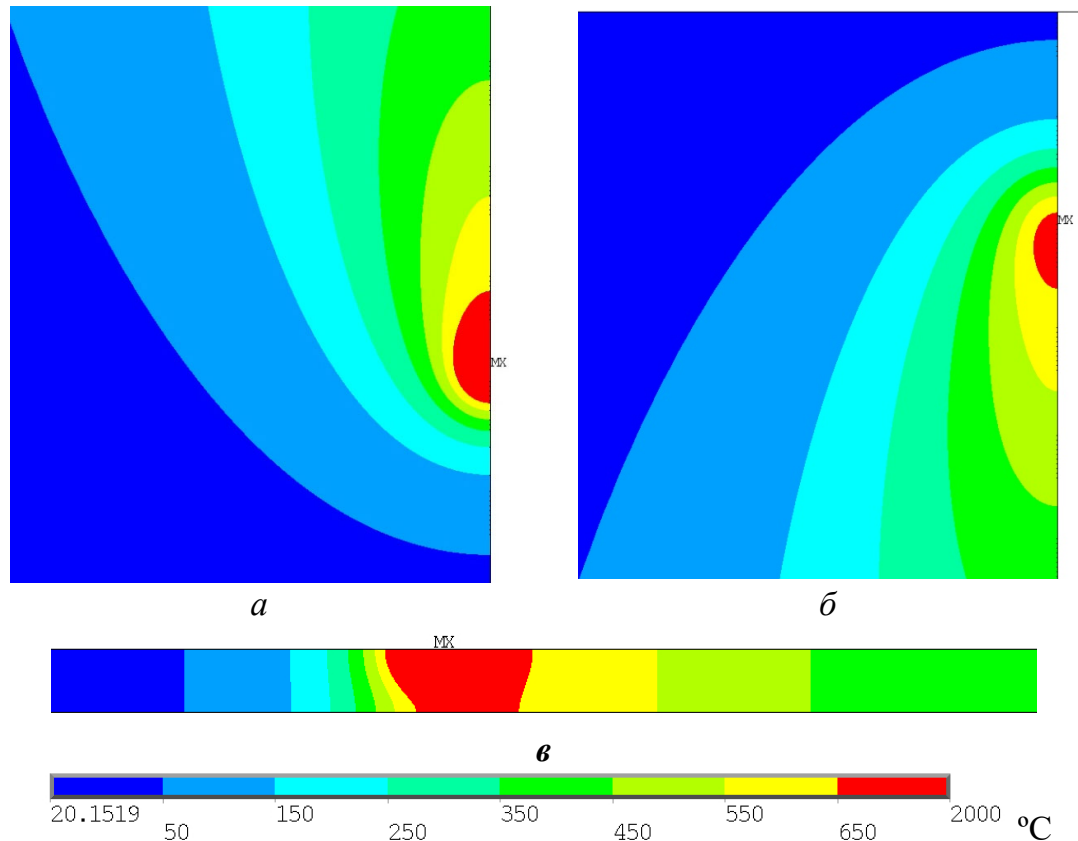


Рисунок 4.9 Розподіл температурних полів при плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом: *а*-вид зверху, *б* - вид знизу, *в* - вид з боку симетричної площі (час зварювання 10 с)

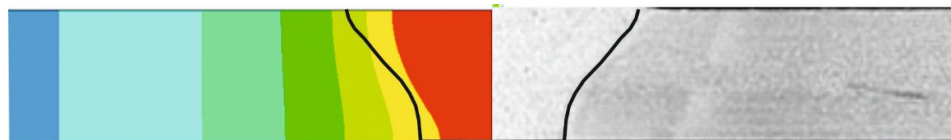


Рисунок 4.10. Порівняння експериментальних і розрахункових перетинів шву

Результати, представлені на рис.4.10 показують, що чисельна модель плазмового автоматичного зварювання різнополярним асиметричним струмом

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.

Висновки

1. Здійснено термічний аналіз із застосуванням комбінованого джерела нагріву, що складається з двох полуеліпсоїдів (подвійний еліпсоїд Голдака).

2. Встановлено, що застосування подвійного еліпсоїду Голдака не дозволяє адекватно описати геометрію зварного шва при зварюванні неплавким електродом. Форма проплавлення має значну відмінність. Поперечний переріз шва, отриманий експериментальним шляхом, має більшу ширину лицевого шва (вид зверху) на 30%.

3. Встановлено, що застосування подвійного еліпсоїду Голдака при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом на зворотній полярності дозволяє отримати розподіл температур в поперечному перерізі з досить високою точністю. Форма проплавлення в зоні кореня шва й на половині товщини пластини повністю збігається. На верхній половині товщини присутня розбіжність за формою проплавлення.

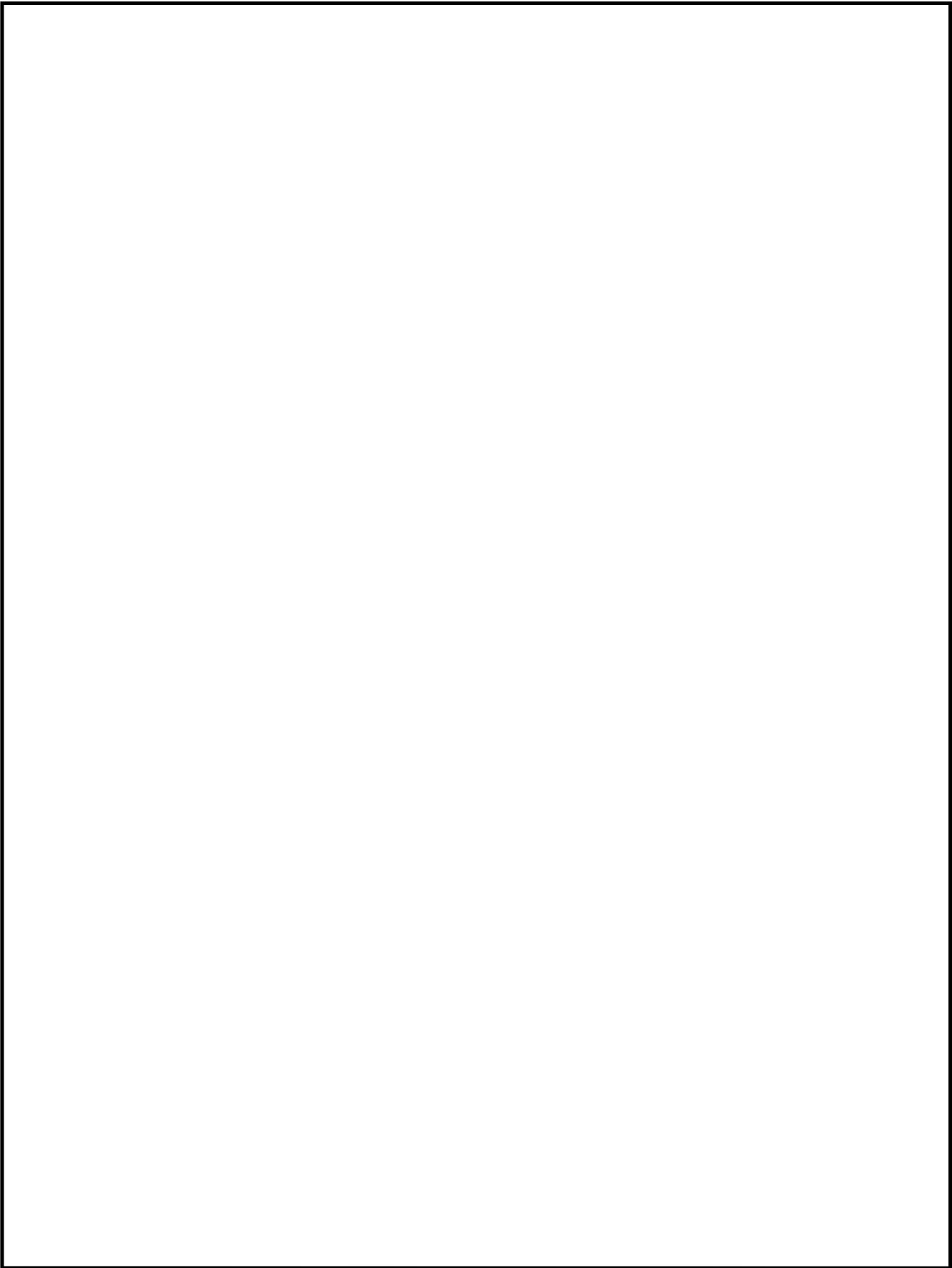
4. Встановлено, що застосування подвійного еліпсоїду Голдака дозволяє досить адекватно описати геометрію зварного шва при плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом. Поперечний переріз шва, отриманий експериментальним шляхом якісно збігається з розрахунковим. Однак, кількісно відмінність розмірів розплавленого металу при чисельному моделюванні, менше на 25...28 % у порівнянні з експериментальними даними

5. Найбільша точність розробленої моделі досягається при моделюванні плазмового автоматичного зварювання різнополярним асиметричним струмом, найменша при зварюванні неплавким електродом.

6. Чисельна модель, розроблена для вивчення теплопередачі, при дугових способах зварювання потребує подальшої доробки за рахунок вивчення впливу

розподілу теплового потоку в передній (ff) та задній частині зварної ванни (fr), зміна яких сильно впливає на форму проплавлення.

7. Розроблена модель джерела тепла, може бути використана як основа для прогнозування форми проплавлення і подальшого розрахунку залишкових напружень в зварному з'єднанні.



					MP 8.132.6121зм.01.05.05 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Гарковенко В.С.			Охорона праці	Літ.	Арк.	Аркуші
Перевірів		Матвієнко М.В.					59	
Рецензент						ХННІ НУК		
Н. Контр.		Матвієнко М.В.						
Зав. каф.		Єрмолаєв Г.В.						

5. Охорона праці

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці [53].

Основоположним законодавчим документом в галузі охорони праці є Закон України „Про охорону праці”, дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

В статті 43 Конституції України записано: „Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає, або на яку вільно погоджується”, „Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом, використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я місцях забороняється” [54].

Кожен, хто працює, має право на відпочинок .

У тексті статті 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист, що включає право на забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття з незалежних від них обставин, а також у старості і в інших випадках, передбачених законом.

Суднобудування характеризується несприятливими умовами праці, наявністю небезпечних і шкідливих факторів, що приводять до виробничих травм, загальної і професійної захворюваності.

Поліпшення умов праці, підвищення його безпеки має велике економічне значення. Воно впливає на результати виробництва: продуктивність праці, якість і собівартість продукції, що випускається.

Економічний зміст умов праці нерозривно зв'язано із соціальною обстановкою. Поліпшення умов праці приводить до таких соціальних результатів як поліпшення здоров'я трудящих, підвищення ступеня задоволеності

працею, зміцнення трудової дисципліни, підвищення престижу ряду професій, ріст виробничої активності і поліпшення ряду інших показ-ників, що характеризують більш високу ступінь соціального розвитку працівників.

Охорона праці зв'язана також із загальною задачею охорони природи, тому що очищення і знешкодження стічних вод і викидів в атмосферу, боротьба із шумом і вібрацією, захист від електромагнітних полів та іонізуючих випромінювань служить не тільки цілям охорони праці, але й одночасно сприяють охороні середовища мешкання людини в районі виробництва [53].

Велика роль у поліпшенні умов праці належить професійним союзам, що здійснюють державний нагляд і розпоряджаються фондами соціального страхування.

5.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних факторів при проведенні складально - зварювальних робіт

Специфіка робіт при проведенні складально-зварювальних робіт характеризується наступними шкідливостями:

- промисловий пил;
- шкідливі речовини;
- неправильна освітленість;
- вібрація;
- ультразвук і шум;
- електромагнітні поля.

Усі зазначені шкідливості впливають на організм людини.

Небезпечними факторами можуть бути:

- не обгороджені частини механізмів лінії, що рухаються;
- гострі елементи і грані виготовлених деталей, що ріжуть, корпусних конструкцій і устаткування;
- незахищені елементи і комунікації, що знаходяться під напругою;
- пара, нагріті гази, рідини або деталі;
- поразка струмом від струмопровідних елементів устаткування лінії;

- тіснота, захаращеність робочого місця, вузькі проходи безпосередньо біля працюючого зварювального і підйомно-транспортного устаткування;
- перебування в безпосередній близькості підйомно-транспортного устаткування при навантаженні і розвантаженні важких корпусних конструкцій;
- падаючі предмети, осколки, зруйновані конструкції із суміжних складальних ліній.

Шкідливі і небезпечні фактори повітряного середовища на виробництві виникають при відхиленні від нормованих параметрів мікроклімату, а також при перевищенні припустимих значень запиленості і загазованості повітря.

Захист від промислового пилу. Промисловий пил – це сукупність часток, що мають діаметр до 100 мкм і знаходяться в повітрі в зваженому стані. Одним з основних процесів, зв'язаних із забрудненням повітря, є процес зварювання [4].

Ступінь небезпеки пилового впливу залежить від фізико-хімічних властивостей пилу: токсичності, дисперсності, конфігурації часток і так далі (ГОСТ 12.0.003-74). Гранично припустимі норми запиленості обумовлені санітарними нормами.

Існує багато різних способів та заходів, призначених для підтримання чистоти повітря виробничих приміщень у відповідності до вимог санітарних норм СН 245-71. Всі вони зводяться до конкретних заходів:

1) запобігання проникненню шкідливих речовин у повітря робочої зони за рахунок герметизації обладнання, ущільнення з'єднань, люків та отворів, удосконалення технологічного процесу.

2) видалення шкідливих речовин, що потрапляють у повітря робочої зони, за рахунок вентиляції, аспірації або очищення і нормалізації повітря за допомогою кондиціонерів.

3) застосування засобів захисту людини.

Для відокремлення пилу від повітря застосовуються різні фільтри, які затримують пилові частинки розміром до 0,1 мкм і більше, залежно від розміру пор фільтра. Такі фільтри випускаються в багатьох країнах. Матеріал фільтрів може бути різним в залежності від його призначення: целюлоза, синтетичні матеріали, азбест (для визначення горючих частинок пилу). Також застосовуються комбіновані

фільтри. Випускаються спеціальні фільтри, просичені імерсійним мастилом, що робить їх прозорими - це і дозволяє додатково робити мікроскопічні дослідження пилу [55].

Параметри мікроклімату та оздоровлення навколишнього середовища.

Параметри мікроклімату (температура, відносна вологість, швидкість руху повітря) і припустимі концентрації шкідливих речовин (пилу, пару і газів) на постійних робочих місцях і в робочій зоні повинні бути забезпечені відповідно до вимог санітарних норм СН 245-71 і

ГОСТ 12.1.005-76 “Воздух рабочей зоны”. Контроль за мікрокліматом і за складом повітря повинен здійснюватися постійно у терміни, встановлені санітарною інспекцією. Параметри мікроклімату визначають: температуру – за допомогою термометрів, вологість – психрометрами, рух повітря – анемометрами.

У цеху, де виконуються роботи, проявляються місцеві впливи низьких і високих температур, повітряних потоків.

Нижче наведено у таблиці 5.1 параметри, що характеризують метеоумови при виконанні робіт, згідно СН 4088-86 «Санитарные нормы микроклимата производственных помещений».

Для забезпечення необхідних параметрів мікроклімату передбачені наступні методи:

- у зимовий час установлюють калорифери, а на ворота - занавеси;
- у літню пору використовують вентиляцію (природну і штучну).

Освітлення. Гарне освітлення виробничих приміщень і робочих місць – один з головних факторів, що сприяють підвищенню продуктивності праці, зниженню виробничого травматизму і професійних захворювань. Результат закордонних досліджень свідчать про те, що при збільшенні рівня освітленості робочої поверхні від 20 до 60 лк продуктивність праці при різних операціях зростає на 20-25%

В залежності від природи джерела світла розрізняють види освітлення: природне, штучне, змішане.

Таблиця 5.1 – Параметри, що характеризують метеоумови згідно СН 4088-86

Категорія робіт	Температура повітря $t, ^\circ\text{C}$	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с	Температура повітря на робочих місцях $t, ^\circ\text{C}$
1.Легка	19...25	75	0,2	15...26
2.Середньої ваги, I а	17...23	75	0,3	13...24
3.Середньої ваги, II а	15...21	75	0,4	13...24
4. Важка	13...19	75	0,5	12...29

Як кількісну характеристику природної освітленості в будь-якому місці приміщення розрізняють коефіцієнт природної освітленості (КПО), обумовлений за формулою (СНиП 11-4-79 «Параметри естественного и искусственного освещения»):

$$e = \frac{E_{\text{уп}}}{E_3} \times 100\%,$$

де $E_{\text{уп}}$ – освітленість усередині приміщення; E_3 – освітленість зовнішньої горизонтальної поверхні, освітлюваної розсіяним світлом всього небозводу.

Мінімальне значення коефіцієнта природної освітленості для приміщення з роботою середньої точності рівне:

$$e_{\text{min}} = 1.$$

Штучне освітлення застосовують у той час, коли природного освітлення не вистачає:

$$e < 0,8 e_{\text{п}} \text{ – при бічному освітленні;}$$

$$e < 0,6 e_{\text{п}} \text{ – при верхнім освітленні;}$$

і де в приміщеннях природної освітленості взагалі не існує. При виконанні ряду робіт зорова робота складається в спостереженні і керуванні різними зварювальними автоматами і напівавтоматами.

Необхідне значення освітленості на ділянці цеху повинно бути не менш 150 лк.

Разом з освітленням створенню сприятливих умов праці сприяє функціональне фарбування, тому що правильне сполучення світла і кольору знижує стомлюваність очей і зменшує рівень захворюваності очей. Фарбування технологічного устаткування повинне бути по можливості контрастним кольору матеріалу, що оброблюється: для фарбування газорізальних машин рекомендуються оранжево-жовті, жовті кольори, для підйомно-транспортного устаткування – помітні яскраві кольори типу синього або червоного. Контраст (за коефіцієнтом відображення) між елементами робочої зони й оброблюваним матеріалом дорівнює 2-5.

Захист від вібрації. Вібрація, що виникає в результаті роботи електродвигунів підйомно-транспортного устаткування у цеху і машин обробки зварювальних швів, впливає на нервову і серцево-судинну системи, м'язи, опорно-руховий апарат, приводить до порушення зору і розвитку віброхвороби. Заходи щодо боротьби з вібрацією містять у собі: зміну технологічного устаткування й інструмента, виконання правил технічної експлуатації машин і агрегатів, використання засобів індивідуального і колективного захисту. Загальні вимоги до змін параметрів вібрації, що характеризують вібраційну безпеку праці, установлює ГОСТ 12.1.012 – 78. “Вибрация. Общие требования”. Контроль якості ручних машин по рівнях вібрації регламентує ГОСТ 715-77 “Машины ручные. Требования к уровням вибрации”.

Захист від шуму та ультразвуку. Шум – складне гармонійне коливання різної частоти і сили, при їхньому безладному сполученні.

Шум при тривалому впливі шкідливо впливає на здоров'я людини. Він викликає зміни в нервовій системі, серцево-судинних органах, травленні, підвищується кров'яний тиск, учащається пульс і знижується слух. У суднобудуванні на багатьох робочих місцях рівень шуму перевищує норму.

Установлено, що рівні шуму, які не викликають небажані наслідки, не повинні перевищувати 80 дБ. Працюючих у зоні з рівнем шуму вище 80 дБ адміністрація повинна постачати засобами індивідуального захисту (навушники, вкладиші, шоломи). ГОСТ 12.1.003–86. “Шум. Общие требования

безпеки” регламентує гранично припустимі рівні звукового тиску на робочих місцях.

Захист від електромагнітних полів. Вплив на організм людини електромагнітних полів, що діють при роботі електромагнітних пристроїв, у дозах, що перевищують припустимі, може бути причиною професійних захворювань. ГОСТ 12.1.006–88 «Электро-магнитные поля радиочастот» установлює гранично припустимі рівні напруженості полів. Для захисту персоналу, що працює з електромагнітними установками, використовують екранування цих установок.

Захист від іонізуючих випромінювань. Радіоактивне і рентгенівське випромінювання впливають на організм людини. Ступінь ваги поразок залежить від індивідуальних здібностей людини і визначається інтенсивністю впливу і часом опромінення. При дозі опромінення в 600 Р - летальний результат, при дозі в 450 Р - летальний результат до 50% опромінених, а при дозі 100-300 Р виникають захворювання різного ступеня ваги.

У суднобудуванні іонізуючі випромінювання знайшли застосування в дефектоскопії, при якій джерело випромінювання використовують для просвічування зварених швів. Згідно НРБ-76/84 установлені наступні категорії опромінення людей:

- А – опромінення обслуговуючого персоналу;
- Б – опромінення обмеженої частини населення;
- В – опромінення населення області, краю, країни.

Гранично припустимі норми опромінення:

- для осіб категорії А – від 5 до 30 Бер/рік.
- для осіб категорії Б – від 0,5 до 3,0 Бер/рік;
- для осіб категорії В – від 0,05 до 1,0 Бер/рік.

Способи забезпечення радіоактивної безпеки:

- зменшення потужності джерела випромінювання;
- скорочення часу роботи з джерелом;
- збільшення відстані від джерела до працюючих;
- закриття джерела випромінювання поглинаючими матеріалами.

Електробезпека. Багато робіт зв'язані з електричною енергією. Поразка електрострумом найбільш небезпечний і частий фактор, зв'язаний із травматизмом зі смертельним результатом. Це зв'язано зі специфікою дії струму на організм людини: струм уражає життєво важливі органи подиху і кровообігу. При зборці і зварюванні в узлів корпусних конструкцій поразка електричним струмом можлива в результаті аварійного або випадкового замикання ланцюга через тіло людини при експлуатації зварювальних агрегатів. Для дотримання електробезпечності повинна забезпечуватися неприступність до струмоведучих частин і установка захисного заземлення, також повинні застосовуватися індивідуальні засоби захисту.

Основними нормативними актами є “Правила техники безопасности эксплуатации электроустановок” і ГОСТ 12.1.019–79. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты”.

Пожежна безпека. Застосування відкритих дуг, наявність бризгів рідкого металу й шлаків при зварюванні підвищує небезпеку виникнення пожеж.

Також небезпека виникнення пожеж може виникнути через необережне поводження з вогнем при виробничих процесах, порушень правил перевезення легкозаймистих вантажів і зберігання небезпечних матеріалів, несправності електропроводки, самозаймання матеріалів, незадовільного стану вентиляційних систем.

За вибухопожежною та пожежною небезпекою відповідно до основних норм технологічного проектування (ОНТП 24-86) механізована ділянка відноситься до категорії В, тому на механізованій ділянці необхідно встановити вогнегасники ОХП-10 і ящики з піском (кожні 200 м), а також вуглекислотні вогнегасники ОУ-5.

З персоналом повинен проводитися щомісячний інструктаж з пожежної безпеки з оцінкою й розписом, інструктуємих у спеціальному журналі відповідно до ДНАОП 0.00-4.12-99 „Типове положення про навчання з питань охорони праці” [4].

Заходи з охорони праці та виробничої санітарії:

– робітники у цеху повинні користуватися захисними касками;

– роботи, зв’язані з транспортуванням деталей, контейнерів з деталями вузлів, полотнищ, площинних секцій, блоків повинні виконуватися робітниками, які мають дозвіл на проведення стропальних робіт;

– при роботі крана людям заборонено знаходитися під вантажами, які транспортуються ;

– усі ремонтні роботи на ділянці необхідно проводити тільки при вимкненому електроживленні та перекритих пневмо-і гідросистемах; ремонт електрообладнання дозволяється проводити електротехнічному персоналу відповідної кваліфікації;

– у цеху повинні бути вивішені попереджувачі написи, які забороняють вхід на його територію постороннім особам.

5.2 Розрахунок захисного заземлення

При відсутності заземлення у випадку пробоею ізоляції і виникнення на корпусі устаткування напруги, дотик до нього людини буде рівнозначно онофазному включенню.

Величину струму, впливові якого може бути піддана людина, можна визначити за формулою [56]:

$$I_m = \frac{1,73 \cdot U_l}{3(R_m + R_n + R_{об}) + R_{из}}, \mu A;$$

де: U_l - лінійна напруга, $U_l = 380V$; $R_m = 1000 \text{ Ом}$ – опір тіла людини; $R_n = 0,0 \text{ Ом}$ – опір підлоги; $R_{об} = 0,0 \text{ Ом}$ – опір взуття; $R_{из} = 5000 \text{ Ом}$ – опір ізоляції.

$$I_m = \frac{1,73 \cdot 380}{3(1000 + 0 + 0) + 5000} = 0,082 A = 82 \mu A.$$

Струм такого значення становить серйозну небезпеку для життя людини, тому що перевищує граничне значення струму, що може уражати. За таких умов необхідно застосовувати захисне заземлення.

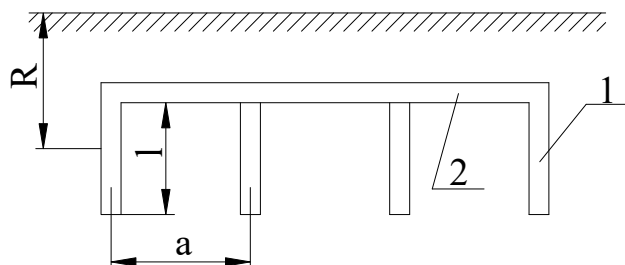


Рисунок 5.1 Схема захисного заземлення: 1 – вертикальний заземлювач, 2 – смуга заземлення.

Визначення опору розтікання струму одиничного вертикального з аземлення виконано за формулою:

$$R_m = [(0,0366\rho/150 \cdot \{\lg((2 \cdot l/d + 1/2 \lg((4 \cdot h + l)/14h - l))\})], \text{ Ом},$$

де $\rho = 1,5 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}^3$ – питомий опір ґрунту; $d = 10 \text{ см}$ – діаметр труби; $h = 150 \text{ см}$ – глибина закладення заземлення.

$$R_m = [(0,0366 \cdot 1,5 \cdot 10^3)/150 \cdot \{\lg((2 \cdot 150)/10 + 1/2 \lg((4 \cdot 150 + 150)/14 \cdot 150 - 150))\}] = 58,0 \text{ Ом}.$$

Визначення орієнтованої кількості вертикальних заземлювачів:

$$n^1 = \frac{R_m}{R_{\text{дон}}},$$

де $R_{\text{дон}} = 4 \text{ Ом}$ – припустимий опір пристроя, що заземлює;

$$n^1 = \frac{58}{4} = 14,5.$$

Уточнення числа вертикальних заземлювачів:

$$n = \frac{n^1}{\eta}, \text{ шт},$$

де: $\eta = 0,7$ – коефіцієнт використання заземлювачів із труб;

$$n = \frac{14,5}{0,7} = 20,7 \text{ шт.}$$

Прийнято 21шт. вертикальних заземлювачів.

Визначення довжини смуги, що з'єднує вертикальні заземлювачі:

$$l = 1,05 \cdot a \cdot n, \text{ см,}$$

де: $a = 150$ см – відстань між електродами; $n = 21$ – число електродів.

$$l = 1,05 \cdot 150 \cdot 21 = 3308 \text{ см.}$$

Визначення опору розтікання струму смугової магістралі, що заземлює:

$$R_n = \frac{0,366 \cdot \zeta}{l \cdot \lg l^{\frac{2}{Bh}}},$$

де: $B = 10$ см – ширина смуги; $h = 150$ см – глибина залягання смуги;
 $\zeta = 1,5 \cdot 10^3$ Ом·см³ – питомий опір ґрунту.

$$R_n = \frac{0,366 \cdot 1,5 \cdot 10^3}{3308 \cdot \lg 3308^{\frac{2}{150}}} = 6,4 \text{ Ом.}$$

Визначення опору розтікання струму всього пристрою, що заземлює:

$$R_z = \frac{1}{\left(\frac{\eta_{cn}}{R_n} + \frac{n \cdot \eta}{R_n} \right)},$$

де: $\eta_{cn} = 0,29$ – коефіцієнт використання сполучної смуги;

$$R_z = \frac{1}{\left(\frac{0,29}{6,40} + 21 \cdot \frac{0,7}{58,0} \right)} = 2,9 \text{ Ом.}$$

Опір розтікання струму всього заземлення не перевищує припустиме (4,0 Ом). При включенні людини в ланцюг він буде підданий впливові струму наступного значення:

$$I = \frac{(1 \cdot 730 \cdot 380)}{(3 \cdot 1000 \cdot 5000) / (1000 \cdot 5000 / 4)} = 0,5 \mu A.$$

Такий струм безпечний для людини (згідно ПВЕ-84).

Висновки

1. Проаналізовані потенційно небезпечні і шкідливі фактори, при проведенні складально-зварювальних робіт;
2. Приведені норми і нормативні документи на небезпечні і шкідливі фактори, розроблені заходи щодо усунення або зниження до відповідних нормативних вимог;
3. У розрахунковій частині розділу зроблений розрахунок захисного заземлення за результатами якого визначено опір та кількість заземлювачів відповідно до вимог ПВЕ.

Загальні висновки

Побудова математичних моделей, що визначають взаємозв'язок параметрів геометрії зварного шва і параметрів режимів зварювання, на основі регресійних залежностей, що не відображають фізику реальних процесів зварювання.

При моделюванні теплового джерела з використанням чисельних методів для визначення температурного поля найбільш широко застосовують методи скінченних елементів (МСЕ) і методи скінченних різниць (МСР).

Найбільш універсальним поєднанням джерел нагріву для ДЗ тонколистових матеріалів є модель подвійного еліпсоїда Голдака.

Для отримання найбільш точного результату моделювання доцільно використовувати скінчено-елементний програмний комплекс з відкритою можливістю настройки параметрів розв'язуваної задачі, наприклад, ANSYS

Елементи SOLID 90 застосовуються для моделювання контактних теплових задач і мають можливість завдання теплового контакту як функції від температури.

Розроблено скінчено-елементну математичну модель для моделювання температурних полів при зварюванні неплавким електродом (TIG), імпульсно-дуговому зварюванні електродом, що плавиться, на зворотній полярності (MIG) і плазмовому автоматичному зварюванні різнополярним асиметричним струмом з присадним дротом (PAW). Модель розроблена з урахуванням симетрії зразка і термомеханічних властивостей матеріалу.

Здійснено термічний аналіз із застосуванням комбінованого джерела нагріву, що складається з двох полуеліпсоїдів (подвійний еліпсоїд Голдака).

Найбільша точність розробленої моделі досягається при моделюванні плазмового автоматичного зварювання різнополярним асиметричним струмом (PAW), найменша при зварюванні неплавким електродом (TIG).

Чисельна модель, розроблена для вивчення теплопередачі, при дугових способах зварювання потребує подальшої доробки за рахунок вивчення впливу розподілу теплового потоку в передній (ff) та задній частині зварної ванни (fr), зміна яких сильно впливає на форму проплавлення, а також уточнення значень ККД.

Розроблена модель джерела тепла, може бути використана як основа для прогнозування форми проплавлення і подальшого розрахунку залишкових напружень в зварному з'єднанні.

У розрахунковій частині розділу зроблений розрахунок захисного заземлення за результатами якого визначено опір та кількість заземлювачів відповідно до вимог ПВЕ.

Література

1. Оптимизация основных факторов при построении статистических моделей процесса сварки плавлением [Текст]/ Б.Н. Бадьянов [и др.] // Сварочное производство. 1982. №6. С. 31-32.
2. Зависимость между током, скоростью сварки и толщиной материала, установленная по литературным данным [Текст]/ Б.Н. Бадьянов [и др.] // Автоматическая сварка. 1982. № 7. С. 72-73.
3. Букаров В.А. Разработка моделей управления дуговой сваркой в защитных газах [Текст] // Сварочное производство. 1997. № 2. С. 13-17.
4. Kim T. W., Park Y. W. Parameter optimization using a regression model and fitness function in laser welding of aluminum alloys for car bodies [Text]// International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2011. Vol.12, Issue 2. P. 313-320.
5. Варламов И.В. Программирование режима аргонодуговой сварки трубок неплавящимся электродом [Текст]// Сварочное производство. 1961. № 6. С. 5-9.
6. Tarng Y. S, Yang W. H. Tungsten Arc Welding by the Taguchi Method [Text] // International Journal of Advanced Manufacturing technology. 1998. Vol.1. P. 549-555.
7. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке: Учебное пособие для машиностр. вузов. [Текст] М.: Машгиз, 1951. 39 с.
8. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов по спец. «Оборудование и технологии сварочного производства» [Текст]/ Волченко В.Н. [и др.]; Под ред. В.В. Фролова. М.: Высшая школа, 1988. 559 с.
9. Рыкалин Н.Н. Расчет термического цикла околошовной зоны по очертанию плоской сварочной ванны // Сварочное производство. 1967. № 9. С. 22-24.
10. Ерохин А.А., Букаров В.А., Ищенко Ю.С. Расчет основных параметров ванны при сварке пластин [Текст]// Сварочное производство. 1970. № 12. С.1-3.
11. Ерохин А.А., Букаров В.А., Ищенко Ю.С. Расчет режимов автоматической сварки стыковых соединений с заданной величиной проплавления [Текст]// Сварочное производство. 1971. № 2. С. 20-23.
12. Оботуров В.И., Кудрявцев М.А. Методика определения веса и геометрических параметров зоны проплавления при сварке легких сплавов [Текст]// Сварочное производство. 1966. № 4. С. 46-47.

13. Антонец Д.П., Псарас Г.Г. Экспериментальное определение веса, формы и размеров сварочной ванны [Текст]// Сварочное производство. 1970. № 5. С. 11-13.
14. Барашков А.С., Шоршоров М.Х. К оценке эффективного радиуса подвижного нормально-кругового источника на поверхности плоского слоя по ширине зоны проплавления [Текст]// Сварочное производство. 1990. № 8. С. 12-14.
15. Акулов А.И., Гусаков Г.Н. О формировании шва при автоматической аргонодуговой сварке на весу неплавящимся электродом [Текст]// Сварочное производство. 1974. № 3. С. 16-18.
16. Ерохин А.А., Ищенко Ю.С. Расчет размеров и веса ванны при сварке со сквозным проплавлением [Текст]// Автоматическая сварка. 1967. № 2. С.6-8.
17. Жандарев А.П., Кудрявцев М.А., Руктешель Ф.С. К расчету размеров обратного валика при сварке на весу [Текст]// Сварочное производство. 1982. № 6. С. 10-12.
18. Петров А.В., Бирман У.И. Метод исследования кристаллизации металла при импульсно-дуговой сварке [Текст]// Сварочное производство. 1967. №10. С. 6-8.
19. Ghosh A., Chattopadhyay H. Mathematical modeling of moving heat source shape for submerged arc welding process [Text]// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol.69, Issue 9-12. P. 2691-2701.
20. Computer modeling of heat flow in welds /[Text] J. Goldak [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions B. 1986. Vol. 17, Issue 3. P. 587-600.
21. Goldak J., Akhlaghi M. Computational welding mechanics [Text]// NY, Inc. USA: Springer Science+Business Media, 2005. 325p.
22. Tanaka M., Kanemaru S. Study for TIG–MIG hybrid welding process [Text]// Weld World. 2014. Vol.58. P. 1-8.
23. Беленький В.Я., Язовских В.М., Трушников Д.Н. Тепловые процессы при электронно-лучевой сварке круговых швов [Текст]// Сварка и диагностика. 2012. № 5. С. 25-30.
24. Численное моделирование процесса лазерной сварки стыковых соединений сталей толщиной 1...12 мм [Текст]/ А. Г. Григорьянц [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2005. №3. С. 67-87.

25. Моделирование оптимального теплового режима лазерной сварки кольцевого соединения малого диаметра [Текст]/ В.В. Мелюков [и др.] // Сварочное производство. 2005. №11. С. 13-17.
26. Bibby M., Chakravarti A., Goldak J. A new finite element model for welding heat source [Text]// Metallurgical transactions. 1994. Vol. 15 B.
27. Balasubramanian G., Bavanashekar K.R., Siva S. N. Numerical and experimental investigation of laser beam welding of alsi 304 stainless steel sheet [Text]// APEM Journal. 2011. Vol. 2. P. 93-105.
27. Modeling of the Mechanical Effects Induced by the Tungsten Inert-Gas Welding of the IN718 Superalloy [Text]/ Dye D. [et al.] // Metallurgical and material transactions A. 2001. Vol. 32, № 7. P. 1713-1725.
28. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. [Текст] М.: Высшая школа, 1990. 367 с.
29. Chakraborty. N. Three-dimensional modeling of turbulent weld pool convection in GTAW processes // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology. 2004. Vol. 45, Issue 4. P. 391-413.
30. Numerical simulation of the welding process distortion and residual stress prediction, heat source model determination [Text]/ V. Divis [et al.] // Numerical simulation of the welding process. 2005. Vol.49, Issue 11-12. P. 15-29.
31. Модели источников теплоты для прогнозирования тепловых полей при сварке плавлением [Текст]/ В.А. Кархин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2008. № 3. С. 55-63.
32. Косяков В.А., Сараев Ю.Н. Математическое моделирование технологических процессов импульсной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом [Текст]// Сварочное производство. 1997. № 4. С. 16-19.
33. Захаренко А.И. Уменьшение влияния сборочных отклонений на качество формирования корневого слоя шва при дуговой сварке: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.10. Тольятти, 2011. 16 с.
34. Труханов К.Ю., Царьков А.В. Кривизна поверхности сварочной ванны как критерий опасности возникновения кристаллизационных трещин. Ч.1. [Текст]// Сварка и диагностика. 2011. № 6. С. 20-15.

35. Maran P., Sornakumar T., Sundararajan T. Modeling of Linear Gas Tungsten Arc Welding of Stainless Steel [Text]// Metallurgical and materials transactions B. 2008. Vol.39. P. 621-628.
36. Сидякин В.А. Компьютерная модель температурного поля в пластине при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом [Текст]// Сварочное производство. 2008. № 10. С. 9-12.
37. Моделирование остаточных сварочных напряжений и деформаций при изготовлении цистерн [Текст]/ С.И. Феклистов [и др.] // Сварка и диагностика. 2009. № 3. С. 28-32.
38. Mathematical modeling for prediction and optimization of TIG welding pool geometry [Text]/ U. Esme [et al.] // Metallurgia. 2009. Vol.2. P. 109-112.
39. Прохоренко Д.В., Яхно Б.О. Численное моделирование остаточного напряженно-деформированного состояния при лазерной сварке безнаборной панели [Текст]// Вестник НТУУ. 2013. № 3. С. 176-184.
40. Математическая модель процесса сварки под флюсом и явлений в дуговой каверне [Текст]/ В.А. Судник [и др.] // Сварочное производство. 2012. № 7. С. 3-12.
41. Огородникова О.М. Использование компьютерных технологий для решения инженерных задач в области сварочного производства [электронный ресурс] // Техноцентр компьютерного инжиниринга. 2008. URL: [http: www. cae.ustu.ru. html](http://www.cae.ustu.ru.html)
42. Колдаев В.Д. Численные методы и программирование [Текст]/ Под ред. Л.Г. Гагариной. – М.: ИД «Форум» - Инфра-М, 2009. 336 с.
43. Муравьев В. И., Бахматов П.В., Дебеляк А.А. Расчет остаточных деформаций по тепловым полям при сварке тонких пластин встык [Текст]// Сварочное производство. 2012. № 2. С. 9-12.
44. Finite element modeling of the effect of heat input on residual stresses in dissimilar joints [Text]/ E. Ranjbarnodeh [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2011. Vol. 55. P. 649-656.
45. Residual stress characteristics of butt-welded flange by finite element analysis / Y.-L. Song [et al.] // Frontiers of Materials Science. 2011. Vol. 5, Issue 2. P. 216-223.

46. Tseng K.-H., Huang J.-M. Arc Efficiency Assisted Finite Element Model for Predicting Residual Stress of TIG Welded Sheet [Text]// Journal of Computers. 2013. Vol.8, №9. P. 2182-2189.
47. Труханов К.Ю., Царьков А.В. Кривизна поверхности сварочной ванны как критерий опасности возникновения кристаллизационных трещин. Ч.2. [Текст]// Сварка и диагностика. 2012. № 2. С. 13-16.
48. Савенко В. О. Застосування програм заснованих на методі скінченних елементів (мсе) для моделювання роботи системи "основа - інженерна споруда" [/ В. О. Савенко, Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении. - 2016. - Вып. 94. - С. 143-148.
49. Ferro P. 3D Computational Welding Mechanics applied to IN625 Nickel-Base Alloy / P. Ferro, G. Edison, H. Vemanaboina, F. Bonollo, F. Berto, K. Tang, Z. Du // Procedia Structural Integrity, Volume 42, 2022, Pages 259-269
50. Goldak J. A. Computational welding mechanics [Text]. – O.: USA, 2005. – 325 p.
51. 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 [Text]// American Scientific Journal. 2017. Vol.2, №17. P. 2182-2189.
52. <https://www.ansys.com/academic/free-student-products>
53. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник [Текст]/ В.Ц. Жидецький. – Львів: Афіша, 2002. – 320 с.
54. Катковський А. В. Основи охорони праці : конспект лекцій / А. В. Катковський, В. А. Полінкевич. – Житомир : ЖНАЕУ, 2015. – 111 с.
55. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: Підручник. 5-е вид. / За ред. М.П. Гандзюка. – К.: Каравела, 2011. – 384 с.
56. Щедролоєв О.В. Основи охорони праці. Лабораторний практикум [Текст]/ О.В. Щедролоєв, Л.Л. Моїсеєнко, Ю.К. Яглицький. – Херсон:Айлант, 2005. – 84.