

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра Машинознавства та обладнання промислових підприємств

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
до магістерської роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

спеціальності *131 прикладна механіка*

спеціалізації - *технології машинобудування*

на тему «Оптимізація технології виготовлення тонколистових конструкцій зі сталі Х18Н10Т з використанням електродугового зварювання у середовищі аргону »

Виконав: студент групи ТМ-16дм

Похильченко К.В.  
(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник Шевченко О.В.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Завідувач кафедри Архипов О.Г.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Рецензент Сергієнко О.В.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: сторінок – 121, ілюстрацій – 15, таблиць – 12, посилань – 39, графічного матеріалу – 41 аркушів формату А4.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення тонколистових конструкцій зі сталі Х18Н10Т з використанням електродугового зварювання у середовищі аргону.

Метою даної магістерської роботи є підвищення техніко-економічних показників технологічних процесів виготовлення тонколистових конструкцій зі сталі Х18Н10Т з використанням електродугового зварювання на основі розвитку математичних моделей для їх багатоваріантного автоматизованого проектування.

У першому розділі обґрунтовано вибір напрямку та методів дослідження.

У другому розділі отримано кількісні взаємозв'язки параметрів режиму зварювання стикових з'єднань на мідній підкладці з шириною зварного шва на лицьовій і зворотній стороні (зварювання тонколистової корозійностійкої сталі аустенітного класу).

У третьому розділі виконано співставлення результатів теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень зусиль, деформацій та механічних властивостей виробів, що підтвердило достовірність отриманих математичних моделей.

В останньому розділі розглянуто вимоги охорони праці та техніки безпеки при проведенні науково-дослідних робіт процесів зварювання.

**Ключові слова:** аргодугове зварювання, режим зварювання стикових з'єднань, математичне моделювання, апроксимація, експериментальне дослідження.

## ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАНЬ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ОТРИМАННЯМ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ АРГОНОДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ	9
1.1 Експериментальні дані та рекомендації щодо вибору основних параметрів режиму автоматичного зварювання	9
1.2 Математичні моделі, побудовані на основі експериментальних даних про розміри зварного шва	11
1.2.1 Нейромережеве моделювання аргонодугового зварювання	14
1.2.2 Моделі аналітичного розрахунку температурних полів, засновані на теорії теплових полів Н.Н. Рикаліна	21
1.2.3 Моделювання геометрії зварного шва за допомогою чисельних методів	26
1.2.3.1 Полуеліпсоїдальна модель Голдака	27
1.2.3.2 Модель подвійного еліпсоїда Голдака	28
1.2.3.3 Модель кінцевого джерела нагріву	29
1.2.3.4 Моделювання геометрії зварного шва при зварюванні з наскрізним проплавленням методами кінцевих елементів (МКЕ) та методом кінцевих різниць (МКР)	31
1.3 Комп'ютерні технології прогнозування формування шва при дуговому зварюванні	36
1.4 Основні методи розрахунку залишкових деформацій після зварювання	42
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДІАПАЗОНІВ РЕЖИМІВ АРГОНОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ НА	54

## ПІДКЛАДЦІ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ФОРМУВАННЯ ЗВАРНОГО ШВА З РОЗМІРАМИ, ЯКІ ВІДПОВІДАЮТЬ ГОСТ 14771-76

2.1 Устаткування для проведення досліджень	54
2.2 Зварювальне оснащення, інструмент та вимірювальна техніка	56
2.3 Витратні матеріали	58
2.4 Методика визначення діапазонів режимів аргонодугового зварювання стикових з'єднань на підкладці	59
2.5 Обробка експериментальних даних	67
2.6 Визначення ефективного ККД нагріву	69
2.7 Оцінка впливу розташування притискних пристроїв відносно вісі зварного шва	72
2.8 Оцінка впливу ширини канавки в мідній підкладці на ширину зворотнього валика	74
2.9 Оцінка впливу шорсткості сталевого зразка на ширину зворотнього валика	75
3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ СТИКОВОГО ШВА ПРИ АРГОНОДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ТОНКОЛИСТОВИХ КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ НА МІДНІЙ ПІДКЛАДЦІ	78
3.1 Опис чисельної моделі теплопередачі при аргонодуговому зварюванні на мідній підкладці	78
3.2 Граничні умови контакту зварного зразка з підкладкою та притискними пристроями	82
3.3 Верифікація граничних умов контакту зварного зразка з підкладкою і з притискними пристроями	84
3.4 Вибір типу кінцевих елементів і кінцевоелементне розбиття 3D-моделі	88
3.5 Обробка результатів моделювання	94
3.6 Чисельна оцінка впливу розташування притискних пристроїв відносно вісі шва на ширину шва	98

3.7 Чисельна оцінка впливу ширини канавки в мідній підкладці на ширину зворотнього валика	99
3.8 Чисельна оцінка впливу шорсткості поверхонь в зоні контакту на ширину зворотнього валика зварного шва	101
3.9 Визначення коефіцієнта тепловіддачі у мідну підкладку в процесі зварювання	103
3.10 Чисельна оцінка впливу ширини канавки в підкладці і шорсткості сталевого зразка на величину тепловіддачі в мідну підкладку при зварюванні	100
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	108
ВИСНОВКИ	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	115
ДОДАТКИ	120

## ВСТУП

Автоматичне аргонодугове зварювання неплавким електродом (далі АрДЗ) отримало широке застосування в авіаційному двигунобудуванні для зварювання вузлів та агрегатів турбореактивних двигунів (ТРД) з тонколистових корозійностійких матеріалів товщиною від 1,5 до 3 мм. Зварювання значної частини конструкцій виконується без присадного дроту. В авіаційному двигунобудуванні переважають стикові зварні з'єднання, які в основному виконуються на мідній підкладці. При цьому основними вимогами до таких зварних конструкцій є висока якість зварного шва і сталість його геометричних розмірів.

Розміри зварного шва при стиковому зварюванні тонколистового матеріалу на мідній підкладці регламентовані ГОСТ 14771-76 [141]. Для стикового з'єднання тонколистових конструкцій типу С4 регламентовані наступні геометричні розміри:  $e$  - ширина шва;  $g$  - посилення зварного шва;  $e_1$  - ширина зворотного валика;  $g_1$  - висота зворотного валика. Розміри канавки в мідній підкладці для формування шва зі стабільним проплавленням по ГОСТ 14771-76 [141] не регламентуються. Оскільки при зварюванні тонколистових конструкцій має місце значна тепловіддача в мідну підкладку, розміри канавки в підкладці істотно впливають на ширину шва і розміри зворотного валика шва.

Незважаючи на великий обсяг опублікованих даних по АрДЗ, отриманих в результаті наукових досліджень і виробничого досвіду, вони в більшості випадків не дозволяють вибрати поєднання параметрів режиму зварювання стикових з'єднань на мідній підкладці, що задовольняють одному із заданих виробничих вимог: максимальна продуктивність, мінімальна ширина зварного шва, мінімальне посилення зварного шва, мінімальне відношення ширини шва до ширини зворотного валика.

З огляду на те, що в авіаційному двигунобудуванні остаточне відпрацювання режиму зварювання в багатьох випадках виконується вже на

готових вузлах ТРД, а не на технологічних зразках, актуальним питанням є отримання математичної моделі, яка забезпечить розрахунок (вибір) режимів зварювання, що виключають необхідність їхнього експериментального коригування. Це знизить витрати часу і коштів на технологічну підготовку виробництва.

Для вдосконалення технології АрДЗ і більш ефективного застосування на виробництві даних, отриманих за результатами експериментальних досліджень і чисельного моделювання зварювання стикових з'єднань на мідній підкладці, виникає необхідність їх узагальнення у вигляді закономірностей, які могли б служити довідковим матеріалом для широкого кола фахівців і використовуватися в зварювальних комп'ютеризованих автоматах, роботизованих системах, мікропроцесорних джерелах живлення для зварювання.

Запропонована робота присвячена удосконаленню технології АрДЗ стикових з'єднань на мідній підкладці з корозійностійких сталей аустенітного класу товщиною від 1,5 до 3 мм із застосуванням експериментальних і теоретичних методів дослідження.

# **1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАНЬ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ОТРИМАННЯМ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ АРГОНОДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ**

## **1.1 Експериментальні дані та рекомендації щодо вибору основних параметрів в режимі автоматичного зварювання**

У нормативних матеріалах, довідниках і навчальних посібниках досить широко представлені рекомендовані режими автоматичного зварювання неплавким електродом, проте в більшості джерел невідомий тип з'єднання - на вазі або на підкладці. Використання такої інформації вельми складно і тією обставиною, що для конкретного виду матеріалу заданої товщини рекомендованому значенню швидкості зварювання відповідає вузький діапазон зварювального струму, який обмежується неприпустимою по ГОСТ 14771-76 [1-4] геометрією зварного шва, прозогом або неприпустимою величиною подрізу шва.

Рекомендовані режими АрДЗ для струму прямої полярності представлені у табл. 1.1. Аналіз даних, наведених в табл. 1.1 показує, що при зварюванні листових конструкцій з товщиною 0,8 - 1,5 мм при швидкості зварювання 10-21 м / год. відмінності в значеннях зварювального струму досягають 150 %. Така відмінність між рекомендованими даними по зварювальному струмі 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.

Оскільки стикові з'єднання тонколистових матеріалів зазвичай виконуються на мідній підкладці, то, найімовірніше, це пов'язано з впливом тепловіддачі в мідну підкладку, а також з впливом на тепловіддачу розмірів канавки в мідній підкладці і конструкції притискачів. Це припущення підтверджується тим, що зі збільшенням товщини зварювальних пластин



відмінності в значеннях рекомендованих режимів зменшуються і не перевищують 40-50 %.

Таблиця 1.1 – Рекомендовані режими АрДЗ на мідній підкладці

Джерело інформації	Тип з'єднання	Матеріал	Товщина, мм	Сила струму, А	Швидкість зварювання, м/год
Рекомендації ВАТ«УМПО»	На мідній підкладці	12X18H10T	0,5	30-60	25-40
			0,8	40-80	20-35
			1,0	50-90	20-35
			1,5	60-100	15-30
			2,0	90-140	15-25
[2]	На мідній підкладці, що охолоджується водою	12X18H10T	2,0	80-124	-
			4,0	139-210	
[3]	-	Високолегована сталь	1,0	60-120	35-60
			2,5	110-200	25-30
			4,0	130-250	25-30
[17]	-	12X18H10T	1,0	30	16
			1,5	50	16
			2,0	50-100	10,5-21
[66, 81]	На мідній підкладці	12X18H10T	0,8	75	15
			1,5	110	13
			2,0	150	12
			4,0	145-200	7,5-15
[138]	На підкладці	SUS 304 (аналог сталі 08X18H10T)	1,0	35-60	7-11

У заводській практиці, як притискачів при зварюванні тонколистових матеріалів в основному використовують пневмошлангові пристосування клавішного типу з притисненням зварювальних кромek до підкладці. Тиск клавіш на зварюваний матеріал, відповідно до даних [2], має бути не менше 0,3 МПа. Згідно з нормативними документами на ВАТ «Уфимське моторобудівне виробниче об'єднання» (ВАТ «УМПО») відстань між притисками і зварюються стиком при товщині металу, що зварюється 1,5; 2,0 і 3,0 мм і більше має бути відповідно 8 - 10; 10 - 12; 15 - 30 мм.

Для отримання рівномірного і стабільного провару поздовжніх швів в зварювальних пристосуваннях застосовують підтримуючі і формують підкладки, припасовані до зварювальних кромки. Кільцеві шви також слід зварювати на розтискних кільцях з формують підкладками. У відповідність з нормативною документацією ВАТ «УМПО» мідні підкладки мають подовжню канавку під зварюються стиком з розмірами, представленими в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Розміри поздовжньої канавки в підкладці в залежності від товщини матеріалу

Товщина листа, мм	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-3,0 та більше
Ширина канавки, мм	7,0-8,0	8,0-10,0	10,0-12,0
Глибина канавки, мм	0,3-1,0	0,5-1,0	0,5-1,2

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 здійснюють на готових деталях, що збільшує частку шлюбу 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 ГОСТ 14771-76 [141] 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 АрДЗ.

## 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 АрДЗ представлені в роботах [9, 10, 15, 112]. 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 у статті [9]. Дані аналізу апріорної 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 27. 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 [10] була зроблена спроба узагальнити дані, накопичені в науковій літературі в області зварювального виробництва про основні параметри режиму АрДЗ різних матеріалів в захисних газах. В результаті статистичної обробки залежність  $I_{CB} = f(V_{CB})$  для зварювання алюмінію з

присадним дротом мала вигляд:  $I_{св} = 36,97\delta^{0,78}(V_{св})^{0,29}$ , а для зварювання титану без присадного дроту -  $I_{св} = 19,2\delta(V_{св})^{0,408}$ , де  $\delta$  – товщина матеріалу, мм. Авторами не було зазначено варіант отримання зварного з'єднання на мідній підкладці.

У статті [17] на основі статистичних методів були розроблені регресійні моделі АрДЗ 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  $g$ ). Як значущих чинників використовували зварювальний струм  $I_{св}$  і функцію  $(1/V_{св})^{1/2}$ . Для труб розмірами 33x1,5 і 33x3,5 мм зі сталі 12X18Н10Т на рис. 1.1 показані відрізки М1 і М2 обраних оптимальних режимів зварювання:  $I_1 = 43\text{А}$ ,  $V_{св} = 8,6$  м/год та  $I_2 = 98\text{А}$ ,  $V_{св} = 8,6$  м/год.

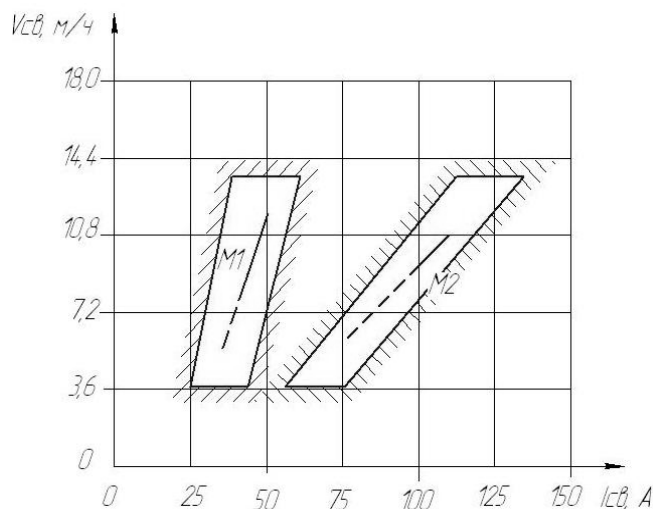


Рисунок 1.1 – Залежність сили струму від швидкості зварювання для сталі 12X18Н10Т товщиною 1,5 мм (відрізок М1) і 3,5 мм (відрізок М2)

Авторами статті не були представлені кількісні взаємозв'язку геометрії зварного шва з параметрами режиму АрДЗ.

Відомо, що кількість експериментів при збільшенні вхідних параметрів зростає. Для вирішення цієї проблеми Тагучі [3, 4] запропонував метод використання спеціальної конструкції ортогональних рядів для дослідження всієї області параметрів з малим числом експериментів. Результати експерименту потім перетворювались за схемою signal-to-noise (S/N). Таким чином, оптимальний рівень параметрів процесу відповідав найбільшим співвідношенням (S/N). Як джерело живлення використовувався 250 GTSW Thermalarc змінного струму. Матеріал - пластини з алюмінію 1100 товщиною 1,6 мм,  $I_d = 2,4-3,2$  мм,  $V_{св} = 24-46$  см / хв,  $V_{п.п.} = 15-25$  см / хв,  $I_{св} = 80-110$  А. Після чого результати були піддані 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 аргонодугового 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;
- 4) проведення додаткових експериментів для врахування особливостей контакту зразка і підкладки.

### **1.2.1 Нейромережеве моделювання аргонодугового зварювання**

Останнім часом широкого поширення набули нейромережеві моделі, які можуть бути використані як в обладнанні для управління процесом зварювання,

так і для прогнозування якості зварного з'єднання. Однією з особливостей нейромережових моделей є достовірність використовуваних даних для навчання. На відміну від методик побудови регресійних залежностей нейромережові моделі при навчанні не верифікують використовувані експериментальні дані на предмет виявлення випадкових помилок, що виникли в результаті експериментальних вимірювань [12, 13, 14].

Поява даного типу моделей пов'язане із завданням моделювання поведінки складних фізичних об'єктів з багатопараметричним входом і виходом [8, 12]. Рішення даного завдання знайдено при формальному аналізі роботи нейрона людини, який представлений на рис. 1.2, а у вигляді інформаційного вузла з декількома входними каналами  $X_i$  і одним вихідним  $Y$ . Інформація на кожному вході має свій ваговий коефіцієнт  $W_i$ , а який вона множиться в нейроні і далі підсумовується з інформацією, що надходить з інших інформаційних каналів, також помноженої на свої вагові коефіцієнти, формуючи інформаційний сигнал  $\sum W_i X_i$ .

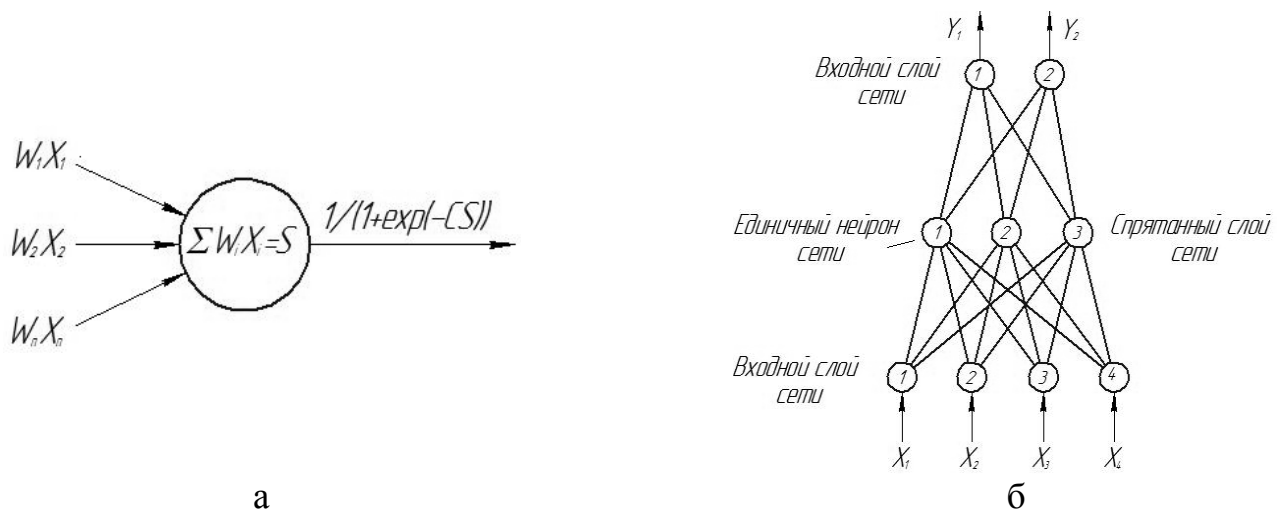


Рисунок 1.2 – Модель одиночного нейрона (а) і нейронної мережі (б)

Далі інформаційний сигнал  $S$  перетворюється у вихідний сигнал  $Y$  за допомогою розділової передавальної функції, наприклад, сигмоїдальної функції [22, 25]:

$$Y=1/(1+\exp^{-CS}),$$

де  $C$  – коефіцієнт передавальної функції, в якості якої може бути використана будь-яка нормована функція зі зміною рішення від 0 до 1.

Для ефективної роботи нейрона його вхідна інформація теж нормується:

$$X_i=(X_r - X_{rmin})/(X_{rmax} - X_{rmin}) - 0,1,$$

де  $X_r$  – реальне фізичне значення вхідного параметра;

$X_{rmax}$  – мінімальне і максимальне значення даного параметра;

0,1 – обмеження з довірчого інтервалу його зміни.

Побудований таким чином нейрон при заданих значеннях  $W_i$  і  $C$  здатний виробляти вихідний сигнал  $Y$  при різних значеннях і поєднаннях вхідних сигналів. Для розширення даних можливостей нейрони можуть бути об'єднані в системи або мережі - нейромережі, багат шарові: один вхідний, один вихідний і кілька захованих (прихованих) шарів. В середньому кожен нейрон, що знаходиться в нейромережі, в якості своїх вхідних сигналів має вихідні сигнали всіх нейронів з попереднього шару, як показано на рис. 1.2, б (неповна схема зв'язків), або з усіх попередніх шарів (повна схема зв'язків) [22].

Для початку функціонування нейромережевої моделі необхідно визначити  $W$  і  $C$  для кожного нейрона. Для цього використовують принцип нервової діяльності людини - принцип навченості [16, 17], згідно з яким  $W$  і  $C$  при заданому наборі вхідних сигналів змінюються до тих пір, поки не буде отримано бажаний вихідний сигнал. Далі процес повторюється для нового набору вхідних - вихідних сигналів. За рахунок великого числа нейронів в мережі і їх параметрів кожен процес навчання зберігає в мережі один або групу параметрів, які при подальшому навчанні або не змінюються, або усереднюються в деякому діапазоні зміни [5].

В роботі [12] за допомогою нейромережевої моделі приведено прогнозування якості АрДЗ без присадного дроту аустенітної сталі товщиною

1,5 мм у висячому положенні. Отримана навчена нейромережева система розглядалася як компактна база даних, що містить «know-how» оператора, яка в комбінації з реляційною базою даних використовувалася в якості інформаційного забезпечення при проектуванні АСУ ТП зварювання. Управління по еталонній моделі було реалізоване в двох варіантах. За першим варіантом розглядалась розімкнута система управління з еталонною моделлю в структурі системи. За другим варіантом модель була побудована в замкнутій контур і формувалася замкнута система з еталонною моделлю. В цьому випадку еталонна нейромережева модель являла собою нейроконтролер з базою даних, в якій реалізовані запрограмовані зв'язки між входом і виходом. Вхідними параметрами моделі були поточні значення керуючих змінних за силою струму  $I_{св}$  і швидкості зварювання  $V_{св}$ . Прогнозуюча і керуюча моделі були навчені при Чотирьохкомпонентна векторі входу (зазор, зміщення стику, зміщення кромки і довжина дуги). В якості вихідних критеріїв оцінки якості зварювання були прийняті форма шва без прожога, непроплавлення і підрізу. На жаль, авторами роботи не були представлені кількісні взаємозв'язки параметрів зварного шва і режимів зварювання.

В даний час існує три основних алгоритму навчання нейромережевої моделі: супервизорний, полусупервизорний і детермінований [12]. Для моделювання зварювальних процесів в основному застосовують детермінований як найбільш об'єктивний метод. Серед них особливо виділяється метод «back-propagation» або метод зворотного поширення помилки в нейромережі [10], суть якого полягає в тому, що на вхід мережі заданої структури з довільними ваговим коефіцієнтом  $W$  і коефіцієнтом передавальної функції  $S$  подають параметри процесу, що моделюється, виміряні експериментально, і порівнюють результати обчислень по нейромережевої моделі з результатами експерименту. Далі формують реальну і фіктивну помилки обчислення, з допомогою яких можна скорегувати коефіцієнти у всіх шарах нейромережі і розрахувати вихідні параметри з



певною точністю.

Згідно з літературними даними середня точність по нейромеревим моделям становить 10-15 % [2, 9, 21]. Точність моделювання значно залежить також від експериментальних даних, використаних для навчання нейромережі на останньому кроці. Саме вони найбільшою мірою відбиваються на значеннях вагових коефіцієнтів. Встановлено, що в якості таких експериментальних даних необхідно використовувати по можливості дані зі значеннями параметрів зварного шва, що лежать в середині інтервалу їх зміни в проведених дослідах, або з найбільш часто зустрічаються значеннями параметрів з наявних [9]. Подібний підхід реалізований для навчання нейромережевої моделі в роботі [7], де на основі імітаційного моделювання проводилася оцінка впливу відхилення струму  $I_{св}$  від заданого технологією значення на появу дефектів, не пов'язаних з геометрією зварного з'єднання (тріщин, несплавлення, пор), тобто якість зварного з'єднання прогнозувалося на основі представлених в літературі рекомендованих режимів зварювання ( $I_{св}$ ,  $U$ ,  $V_{св}$ ) і геометричних параметрів при підготовці виробу до зварювання  $\delta$ ,  $\sigma$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda$ , представлених на рис. 1.3).

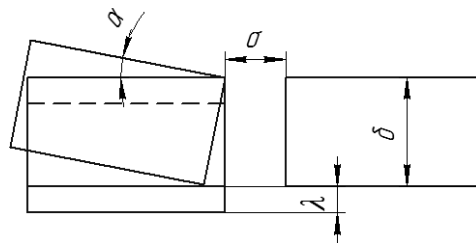


Рисунок 1.3 – Похибки складання під зварювання стикового з'єднання [29]

АрДЗ з наскрізним проплавленням стикових з'єднань проводилась на феритної сталі Fe 360 (AlSi 1008) товщиною 2 і 4 мм. Параметри режиму зварювання були наступними:  $I_{св} = 70-220A$ ,  $U = 10-15B$ ,  $V_{св} = 0,9-4,6$  мм/с, витрата захисного газу 12 л / хв. В якості методу навчання нейромереж використовували метод «back-propagation». Побудовані моделі були випробувані і показали високу ефективність застосування - наприклад,

відмінність в формі і розмірах параметрів реального і розрахункового швів не перевищило 8% [29].

В МДТУ імені Н.Е. Баумана розроблена система оцінки якості стикових односторонніх зварних з'єднань без оброблення крайок з наскрізним проплавленням при АрДЗ [13]. Система базувалася на використанні інформаційних сигналів, що отримуються за допомогою датчиків, встановлених в зварювальному обладнанні з боку джерела нагріву - це зварювальний струм  $I_{св}$ , швидкість зварювання  $V_{св}$ , температура точки поверхні  $T$  зі зворотного боку шва в ОШЗ, сумарний світловий потік  $L$  від зварювальної дуги в інфрачервоному і видимому діапазонах. Для визначення зв'язку між сигналами  $I_{св}$ ,  $V_{св}$ ,  $T$ ,  $L$ ,  $e$  (ширина шва) використовували нейромережеву модель на основі 12 проведених зварювальних експериментів. Зварні шви отримували на пластинах товщиною 2 мм із сталі 12Х18Н10Т на експериментальному зварювальному стенді з використанням керованого джерела живлення Керррі. Накладаючи штучні обурення на основні параметри режиму зварювання (зварювального струму, швидкості зварювання і витрати захисного газу 10, 15 і 20 % відповідно), отримували зварний шов з шириною, яка вимірюється за допомогою експериментального лазерного профілометра. Навчання нейромережі проводилося в 80-200 ітерацій, причому вибір початкових значень вагових коефіцієнтів визначав як швидкість збіжності алгоритму, так і якість нейромережевої моделі. За результатами тестування, модель показала високу точність у визначенні ширини зворотного валика шва (похибка не перевищувала 10 %).

Відносини між вхідними та вихідними даними визначалися за допомогою радіальної базисної функції нейромережі в роботі [22]. Пакетний режим підготовки був окремо прийнятий для реалізації принципу зворотного поширення помилки ВР («back-propagation») і генетичного алгоритму ГА («genetic algorithm»), що представляє собою метод випадкового пошуку і дозволяє ідентифікувати оптимальні значення змінних з великого обсягу

дискретних наборів даних за допомогою створення цільової функції, чутливої до значення невідомих змінних (параметрів) [8]. На рис. 1.4 наведено схематичну діаграму, що визначає вхідні та вихідні дані нейромережі - параметри режиму зварювання і параметри геометрії зварного шва при АрДЗ стикових з'єднань. Діапазон зміни вхідних параметрів А, В, С, D і Е становив (24-46 см / хв); (1,5-2,5 см / хв); (30-70%); (2,4-3,2 мм) і (80-110А) відповідно.

Авторами не було зазначено матеріал зварюються зразків. Похибка нейромережевої моделі за даними авторів не перевищувала 16 %.

Для моделювання зварювальних процесів знайшли застосування нейромережі, побудовані на радіальних базисних функціях RBF («radial basis functions»), що мають проміжний шар з радіальних елементів, кожен з яких відтворює гауссову поверхню відгуку [9, 10, 11].



Рисунок 1.4 – Вхідні і вихідні параметри нейромережі [122]: (А) - швидкість зварювання, (В) - швидкість подачі дроту, (С) - % зміст елементів в дроті, (D) - зазор між деталями, (Е) - зварювальний струм, (FH) - посилення зварного шва, (FW) - ширина зварного шва, (BH) - висота зворотного валика, (BW) - ширина зворотного валика

В роботі [9] запропонована поєднана математична модель, заснована на визначенні взаємозв'язку між вхідними та вихідними даними радіальної базисної функції нейромережі RBF з використанням генетичного алгоритму GA. Вхідними даними базисної функції були коефіцієнти чисельної моделі нелінійної теплопровідності при АрДЗ аустенітної нержавіючої сталі SS316L товщиною 1,5 мм у висячому положенні. Зварювання проводили на прямий полярності вольфрамовим електродом WL-20 з кутом заточування 45° і постійній довжині дуги 3 мм. Вхідними даними базисної функції були  $\eta_{и}$ ,  $r_{ef}$

(Ефективний радіус джерела нагріву) і  $q_1/q_2$  (розподіл потужності між нормально-круговим джерелом нагрівання і подвійним еліпсоїдом Голдака). Вихідними даними нейромережевої моделі були розміри геометрії зварного шва - ширина зварного шва і ширина зворотного валика. Авторами роботи була представлена лише методика побудови нейромережевої моделі.

RBF-мережі мають як ряд переваг (компактність, здатність швидко навчатися), так і недоліків. Наприклад, з «груповим» поданням простору моделі мережі RBF не можуть екстраполювати свої висновки за область відомих даних: при видаленні від навчальної множини значення функції відгуку швидко падає до нуля. Ще одним істотним недоліком нейромережевих моделей є кількість експериментальних даних, достатніх для навчання нейромережевих моделей. Встановлено, що кількість даних для навчання не повинно бути менше числа зв'язків між нейронами в мережі. В іншому випадку ймовірність збереження корисної інформації про моделююваний процес різко знижується [11, 19]. Використання випадкового вибору експериментальних даних для останньої стадії навчання нейромережі не дало позитивного результату [20], при цьому середня помилка розрахунків по нейромережевої моделі досягла 28 %.

У зв'язку з тим, що в розглянутих вище нейромережевих моделях для врахування особливостей умов контакту зварного з'єднання з мідною підкладкою необхідно провести дуже великий обсяг експериментів в широкому діапазоні досліджуваних режимів зварювання для навчання нейромережі, вони також були виключені з подальшого розгляду.

### **1.2.2 Моделі аналітичного розрахунку температурних полів, засновані на теорії теплових полів Н.Н. Рикаліна**

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

тепла від реальних зварювальних джерел [4, 11, 14].

Перші моделі геометрії проплавлення, запропоновані в роботі [4], були засновані на використанні принципу місцевого впливу. Теплове джерело моделювався в просторі як точковий, лінійний або поверхневий. Кожен з них міг бути нерухомим, рухомим або що швидко [6].

Для однопрохідної зварювання листів з наскрізним проплавленням, використовуючи розрахункову схему швидкого руху лінійного джерела нагріву в пластині без тепловіддачі, М.М. Рикалін для розрахунку ширини зварного шва запропоновано такий вираз [8, 14]:

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

де  $q_n$  – погонна енергія, Дж / см;

$\delta$  – товщина пластини, см;

$c\rho$  – об'ємна теплоємність, Дж/(см<sup>3</sup>·К);

$T_n$  та  $T_{пл}$  – початкова температура 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 [5]. 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 АрДЗ сталі Х18Н10Т з наскрізним проплавленням у всякому положенні. На жаль, авторами роботи не були зазначені діапазони зміни параметрів режимів зварювання.

При дослідженні розмірів ванни авторами [32, 33] були використані залежності розмірів зварювальної ванни від параметрів режиму зварювання у

вигляді зв'язку між безрозмірними критеріями, такими ж як і в роботі [6]:

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

та критерієм режиму:

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

де  $F$  – площа проплавлення,  $\text{см}^2$ ;

$\lambda$  – 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 АрДЗ в нижньому положенні на вазі 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 ( $I_{\text{св}} = 210 \text{ А}$ ,  $V_{\text{св}} = 0,239 \text{ см/с}$ ). Помилка при аналітичному визначенні параметрів проплавлення не перевищувала в середньому 10%. Для лицьового боку шва залежність ширини шва від параметрів режиму зварювання мала вигляд [32, 33]:

$$e_1 = \frac{0,348\sqrt{a}}{\lambda T_n} \cdot \frac{q_n}{\sqrt{v\delta}}, \quad (1.4)$$

Для зворотного боку шва:

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

Зазначені в роботах [4, 6] розбіжності між експериментальними і розрахунковими даними пояснюється прийнятою схемою ідеалізації процесу, а також відсутністю обліку енергій фазових переходів в перерахованих математичних моделях.

Авторами роботи [11] 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 у висячому положенні вольфрамовим електродом корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т товщиною 2 мм на наступних режимах –  $I_{св}=180\text{А}$ ,  $U=13\text{В}$  и  $V_{св}=1,26\text{ см/с}$ , ри якому було визначено коефіцієнт  $k$ , що дорівнює  $6,7\text{ см}^2$ . Експериментальні та розрахункові дані цієї роботи збігалися з задовільною точністю при  $\eta_{и}=0,7-0,75$ , але кількісні взаємозв'язку параметрів геометрії зварного шва з параметрами режимів зварювання в роботі наведені не були.

У статті [1] вивчали вплив режимів АрДЗ на процес формування кореневого шва на підкладці. Дослідження проводили на пластинах зі сталі Х18Н10Т товщиною 3 мм, з параметрами режиму зварювання:  $I_{св} = 100-240\text{А}$ ,  $V_{св} = 3-37\text{ м/год}$ ,  $I_{д} = 0,8-3,0\text{ мм}$ . При зварюванні застосовували вольфрамовий електрод діаметром 4 мм з постійним кутом загострення. В роботі визначали характер зміни ширини зварного шва, посилення і висоту зворотного валика від

значених 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:

$$e = \frac{0,484q_{\text{п}}}{V_{\text{св}} c \gamma^1 \delta}, \quad (1.6)$$

де  $\gamma^1$  – питома вага металу ванни;

$q_{\text{п}}$  – повна потужність дуги, Вт.

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

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

де  $k$  – поправочний коефіцієнт.

Для аргонодугового зварювання  $k = 1,33 - 1,84$  [1].

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 [31, 34, 60] розрахунок ширини зварного шва здійснювався за формулою (1.6), що і в роботі [1], але з використанням поправочних емпіричних коефіцієнтів. Зварювання вольфрамовим електродом здійснювалася в нижньому положенні без оброблення крайок. Такі коефіцієнти отримані для маловуглецевої і неіржавіючої сталі, титану та міді. Досліди проводилися на пластинах зі сталі Ст.3 ( $\delta = 4$  мм), 12Х18Н10Т ( $\delta = 2,5; 4$  і 6 мм), сплаву ВТ-1 ( $\delta = 3$  мм). Авторами роботи не були представлені кількісні взаємозв'язку геометрії зварного шва з параметрами режимів АрДЗ.

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 зварювальної дуги ККД і коефіцієнта зосередженості для розподіленого джерела нагріву. Ці додаткові параметри ускладнюють модель і для їх визначення необхідно проведення експериментів для конкретних умов зварювання.

Таблиця 1.3 – Значення величини тепловіддачі в залежності від умов закріплення [9]

Характеристика ефективності тепловіддачі	Тепловідвідні притискачі						Сталева не охолоджувана плита	Тепловіддача в повітря
	мідні		алюмінієві		сталеві			
	Відстань між віссю шва і притиском Z, відповідає $(1,5-1,8) \times \delta$							
	Z=10 мм	Z=30 мм	Z=10 мм	Z=30 мм	Z=10 мм	Z=30 мм		
$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ×°С)	4,6-5,4×10 <sup>3</sup>	3,5-4,0×10 <sup>3</sup>	3,3-4,0×10 <sup>3</sup>	3,0-4,0×10 <sup>3</sup>	1,6-2,0×10 <sup>3</sup>	300-400	80-170	10-25

Істотним недоліком аналітичних моделей є усереднення теплофізичних параметрів нагріваються металів і умовний облік тепловіддачі в мідну підкладку при зварюванні. У деяких роботах [31, 33] він приймається середнім по товщині. Орієнтовні значення тепловіддачі в підкладку і притиски представлені в табл. 1.3.

У зв'язку з тим, що в розглянутих вище аналітичних моделях не можливо врахувати реальні умови контакту зварного з'єднання з мідною підкладкою вони також були виключені з подальшого розгляду.

### 1.2.3 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 виконань 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 [3, 5, 10].

При моделюванні теплового джерела з використанням чисельних методів для визначення температурного поля найбільш широко застосовують методи кінцевих елементів (МКЕ) і методи кінцевих різниць (МКР). 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 кінцево-елементної сітки моделі.

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

### **1.2.3.1 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 поверхневий джерело нагріву не враховує утворився кратер зварювальної ванни, що виникає навіть при малих величинах погонної енергії. Для вирішення цієї проблеми Голдак [15, 16] спочатку була запропонована модель полуелліпсоїдального 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:

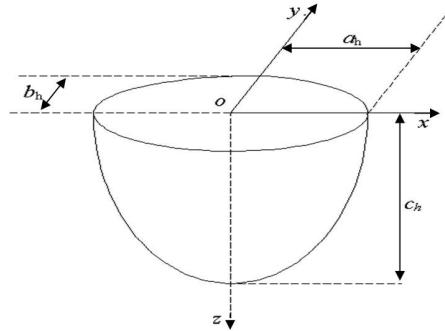


Рисунок 1.5 – Полуеліпсоїдальний розподіл тепла в джерелі нагрівання

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

де  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – коефіцієнти розподілу теплового потоку.

Оскільки тепловий потік розподілений всередині обсягу джерела, то його щільність може бути виражена таким чином:

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

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

Припускаючи, що 95 % енергії вводиться всередину полуеліпсоїда, тепловий потік можна обчислити наступним чином:

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

Приймаючи  $A = 3/a_h^2$ ,  $B = 3/b_h^2$ ,  $C = 3/c_h^2$  і підставляючи їх у вирази (1.9,

1.10), отримаємо:

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

### 1.2.3.2 Модель подвійного еліпсоїда Голдака

Для зменшення похибки, що виникає при описі форми зварювальної ванни для концентрованих джерел нагріву, Голдак був запропонований комбінований джерело нагріву [6, 7, 9, 10, 13], що складається з двох полуелліпсоїдов, представлених на рис. 1.6. У зарубіжній науковій літературі і у пакеті програм SYSWELD це джерело має назву подвійний еліпсоїд Голдака.

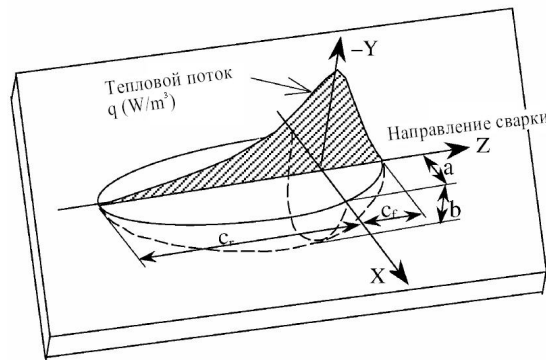


Рисунок 1.6 – Розподіл теплового потоку в моделі подвійного еліпсоїда Голдака

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

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

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:

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

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 Малюнком 1.7, а. Для моделювання зварних швів більш складної форми, як на рис. 1.7, б, використовується поєднання чотирьох і більше еліпсоїдів для точного моделювання [11, 13].

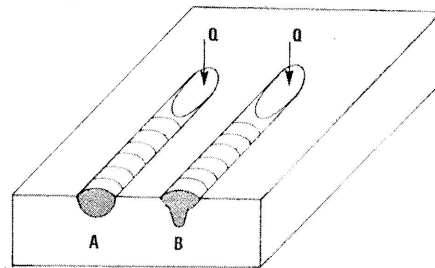


Рисунок 1.7 – Опис використання подвійного еліпсоїда (А) і більш точна форма опису чотирма еліпсоїдами (В)

### 1.2.3.3 Модель конічного джерела нагріву

Модель конічного джерела нагрівання використовується для визначення параметрів геометрії наскрізного проплавлення при електронно-променевому та плазмовому зварюванні [12, 23, 24]. Вона являє собою комбінацію нормально-кругових джерел нагрівання, введених з лицьової та зворотної сторони зварного шва. Вид джерела нагрівання і схема розподілу теплових потоків представлені на рис. 1.8.

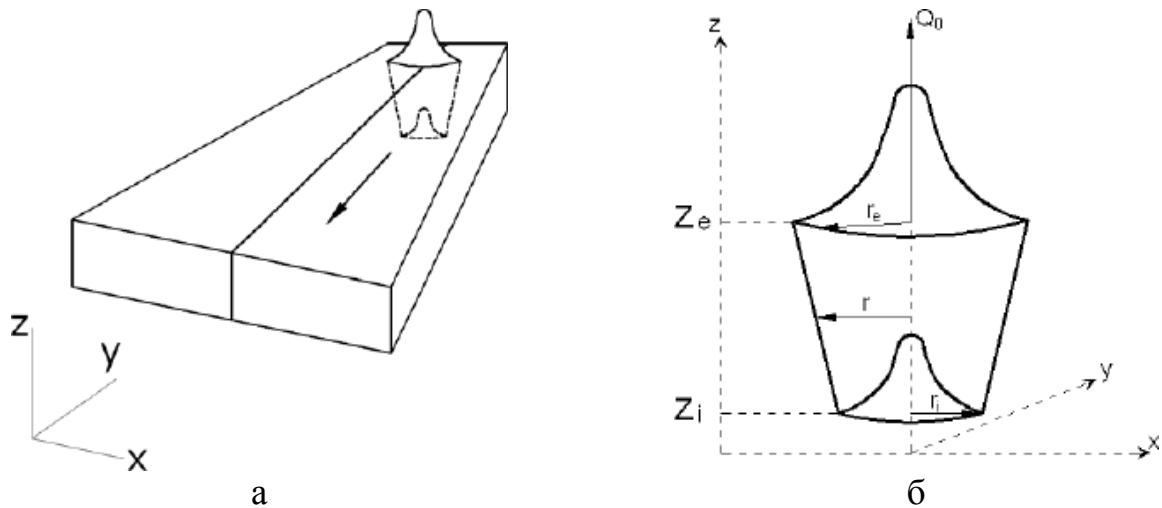


Рисунок 1.8 – Рухоме кінцеве джерело нагрівання (а) і його параметри (б)

Введений у виріб тепловий потік виражається формулою:

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

де  $r$  та  $r_0$  відповідно дорівнюють:

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

$$r_0 = r_e - (r_e - r_i) \cdot \frac{(z_e - z)}{(z_e - z_i)}, \quad (1.17)$$

де  $q$  – питомий тепловий потік;

$r_e$  – радіус плями нагріву у верхній площині  $z = z_e$ ;

$r_0$  – радіус плями нагріву у верхній площині  $z = z_i$ .

#### 1.2.3.4 Моделювання геометрії зварного шва при зварюванні з наскрізним проплавленням методами кінцевих елементів (МКЕ) та методом кінцевих різниць (МКР)

Рішення рівняння теплопровідності чисельними методами дозволяє

моделювати форму проплавлення, що виникає від впливу електронного пучка, лазерної та плазмової зварювання і високоамперних зварювальних дуг. Для подібних випадків Голдак [2, 7] запропонував комплексну модель розподілу потужностей у вигляді двох полуеліпсоїдів. В роботі [9] для оцінки величини залишкових зварювальних напружень у стиковому з'єднанні з аустенітної сталі ALSI 304 товщиною 1,6 мм геометрія зварного шва стикового з'єднання описувалась подвійним еліпсоїдом Голдака. Авторами роботи не було вказано похибка розробленої чисельної моделі.

У статті [14] розглядали розподіл залишкових напружень, що виникають при АрДЗ у вертикальному положенні з наскрізним проплавленням жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718 з використанням термодформаційного аналізу. Верифікація розподілу залишкових напружень за результатами чисельного моделювання проводилась з використанням техніки нейтронної дифракції. Зразки представляли собою тонкі пластини розміром 200x100x2 мм. Зварювання проводили на наступному режимі:  $I_{св} = 80\text{А}$ ,  $U = 19\text{ В}$ ,  $V_{св} = 1,59\text{ мм/с}$ . Для визначення розподілу температури від реального джерела нагріву використовували термопари К-типу, розташовані поперек зварного шва. Для суміщеного термодформаційного аналізу використовували програмний комплекс ABAQUS. Геометрія наскрізного проплавлення визначалась по ізолінії плавлення від рухомого джерела, питомий тепловий потік якого задавався за формулою:

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

де  $a$  – розмір кінцевого елемента, м.

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

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

де  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$T_0$  – початкова температура ( $T = 20^\circ\text{C}$ ).

Для аналізу залишкових напруг після зварювання використовували тип лінійної упругопластической завдання 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 упругопластической завдання доцільно використання кінцевих елементів «високого» порядку (гексаедріческій тип з 20 вузлами) і в якості методу вирішення було необхідно застосовувати або 3D лагранжевого метод, або 2D метод Ейлера [6].

Робота [4] присвячена визначенню залишкових напруг і деформацій при впливі поверхневого гауссова джерела нагріву при зварюванні сталі 25 (GB / T 699-1988) товщиною 2 мм з наскрізним проплавленням. АрДЗ проводилася на наступних режимах:  $I_{\text{св}} = 180 \text{ А}$ ,  $U = 10 \text{ В}$ ,  $V_{\text{св}} = 10 \text{ мм / с}$ ,  $\eta_{\text{и}} = 0,75$ ,  $r_{\text{н}} = 6 \text{ мм}$ . Початкова температура становила  $25^\circ\text{C}$ . 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 напруги і деформації виробу. Однак, авторами статті не були вказані діапазони варіювання параметрів режиму зварювання.

В роботі [24] для отримання картини розподілу залишкових напружень по товщині при електронно-променевого зварювання титанового сплаву TA15 товщиною 50 мм форма геометрія наскрізного проплавлення описувалася комбінацією 2D-конічного об'ємного джерела тепла з комбінацією гауссова і



лінійного джерел нагріву. Про точність отриманих результатів авторами зазначено не було.

Рішення рівняння теплопровідності для пластини зі сталі 12Х18Н10Т розмірами 200х100х10 мм методом функції Гріна приведено в роботі [7, 17].

За допомогою комбінованого джерела нагріву була розрахована геометрія зварного шва з наскрізним проплавленням при електронно-променевого зварювання, 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 АрДЗ в роботі [13, 18] описувалася ізотермами 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 виробу і діапазонах режимів зварювання.

У статті [3] наведені математичні методи аналізу імпульсного впливу концентрованого джерела (зварювальної дуги) на перебіг процесів теплопереносу, плавлення, кристалізації і утворення супутніх їм деформаційних процесів при АрДЗ пластин 80х40х8 мм з низьколегованої сталі 10Г2С на вазі. Для вирішення завдання методом кінцевих різниць тривимірну задачу розбивали на 2 двовимірні. Авторами були визначені режими зварювання, що забезпечують зварного з'єднання 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 [5, 8] 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 [9, 15].

В роботі [19] за допомогою методу скінченних елементів моделювали тривимірну теплову задачу і рух розплавленого металу в зварювальній ванні для визначення геометричних розмірів ванни, термічних циклів, температурних градієнтів у ванні і швидкості охолодження при АрДЗ нержавіючої сталі 304 на мідній підкладці. В результаті комп'ютерного моделювання було встановлено, що при використанні мідної підкладки змінюється процес кристалізації і швидкість охолодження, що призводить до зменшення відносини градієнта температури до величини зерна  $G/R$  з 15 до 6 ( $Kc/mm^2$ ). Авторами роботи не було розглянуто вплив умов контакту на тепловіддачу в мідну підкладку і її величина лишалася незмінною незалежно від зміни конструкції підкладки в процесі експериментів.

В роботі [16] розроблено методику, що базується на припущенні про наявність тісного кореляційного зв'язку між формою хвостовій частині зварювальної ванни і характером кристалізації. Для опису форми зварювальної ванни використовували модель подвійного еліпсоїда Голдак 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 хромомарганцевістий сталі 12X15Г9НД товщиною 2,0 і 2,5 мм і аустенітної хромонікелевої сталі 12X18Н10Т 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 макрошліфов 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 АрДЗ, крім величини ефективної потужності, є:

- 1) для поєднання нормально-кругового розподіленого і зосередженого лінійного джерел [4, 5, 13, 17] - величина розподілу ефективної потужності між джерелами і коефіцієнт зосередженості розподіленого джерела;
- 2) для для полуелліпсоїдального джерела Голдак [92, 106] - коефіцієнти  $a_h$ ,  $b_h$  і  $c_h$ , що описують геометрію зварного шва (див. рис. 1.5);
- 3) для подвійного еліпсоїда Голдака [6, 7, 14] - коефіцієнти  $a_1$ ,  $b_1$  і  $c_1$ , що описують геометрію зварного шва, і величина розподілу ефективної потужності між полуелліпсоїдами (див. рис. 1.5);
- 4) для кінцевого джерела [12, 16, 20, 22, 24] - розподіл ефективної потужності між джерелами і коефіцієнти зосередженості кожного джерела;
- 5) для поєднання трьох і більше джерел [11, 13, 21, 23] - розподіл ефективної потужності між джерелами нагріву і коефіцієнти, що описують геометрію зварного шва.

Очевидно, 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 і подвійного еліпсоїда Голдака описує геометрію зварного шва з наскрізним проплавленням з великою похибкою, при цьому маємо велику кількість варійованих параметрів в моделі - більше чотирьох. Отже, застосування подібних моделей для опису геометрії зварного шва при АрДЗ тонколистового матеріалу не доцільно. Найбільш універсальним поєднанням джерел нагріву для АрДЗ тонколистових матеріалів на підкладці є комбінація нормально-

кругового розподіленого і лінійного джерела, як це зроблено в роботах [4, 13, 17], 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, оскільки складова лінійного джерела зумовлює наявність кратера зварювальної ванни, який присутній внаслідок тиску дуги навіть при малих значеннях погонної енергії при зварюванні тонколистових матеріалів.

### **1.3 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 [14].

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 совершенствование технології різних видів зварювання, широко застосовують комерційні комп'ютерні програмні продукти і програмні комплекси.

Усі зарубіжні програмні продукти можна класифікувати по функціям, які вони виконують, наступним чином [14]:

1. Підготовка технологічної документації за допомогою систем CAPP / PDM / PLM.
2. Бази даних: основні матеріали, зварювальні матеріали, нормативні документи і т.д.
3. Конструювання і проектування зварних конструкцій за допомогою систем CAD.

4. Розрахунок міцності, довговічності, жорсткості зварних конструкцій за допомогою систем CAE.
5. Моделювання теплових і металургійних процесів з допомогою систем CAE.
6. Конструювання обладнання за допомогою систем CAD / CAE.
7. Числове управління зварювальними роботами за допомогою систем CAM.
8. Системи управління.

Для імітації процесу зварювання і прогнозування якості зварного шва призначені системи CAE (Computer Aided Engineering), які можна розділити на 2 класи в залежності від складності виконуваних завдань і кваліфікації користувача [14].

Великий клас CAD-програм орієнтований на рядового технолога і дозволяє вирішувати окремі прикладні завдання для обраного виду зварювання – розрахунок параметрів режиму зварювання, визначення витрати зварювальних матеріалів, прогнозування розмірів і очікуваних механічних властивостей зварного з'єднання і т.д. Алгоритми таких програм засновані як на простих аналітичних залежностях [1, 2], так і на коефіцієнтах розрахункових моделей, виконаних на основі методів чисельного моделювання в програмних пакетах для конкретного виду зварювання і в певних діапазонах параметрів режиму [1, 8, 15].

Інший клас CAD-програм орієнтований на висококваліфікованих користувачів-аналітиків, дозволяє вирішувати на кінцево-елементних сітках комплексні завдання (чисельне моделювання процесів тепло - і масопереносу, аналіз електричних полів, аналіз напружено-деформованого стану виробу і т.п.). Такі програми можуть бути побудовані за модульним принципом, виділяючи певні види зварювання або моделі процесів. Наприклад, комплекс програм ComHighTech (SPOTSIM, BUTTSIM, MAGSIM, LASIM, CUTSIM) міжнародного науково освітнього центру «Комп'ютерні високі технології в

поєднанні металів» (м.Тула, Росія); SYSWELD (ESI Group, Франція); SOAR (Sandia Optimization and Analysis Routines for automated welding - національна лабораторія Міністерства енергетики США); SORPAS (Swantec, Данія); Virtualarc (ABB, Швеція) [14].

Продукт ComHighTech [14] складається з декількох пакетів програм, що дозволяють виконувати певні функції: MAGSIM – імітація напівавтоматичного зварювання в вуглекислому газі; SPOTSIM – моделювання контактної точкової зварювання, ARMSW – створення технологічної документації, MEXSW – аналіз механічних властивостей зони термічного впливу, FLUX 2.1 – розрахунок параметрів режиму зварювання під флюсом.

Якість зварних швів в програмах MAGSIM [7] і EWI WeldPredictor [5] регламентовано ГОСТ 14771-76 [11] і Європейської нормою EN25817 [19]. Її основна відмінність від ГОСТ 14771-76 [14] полягає в тому, що останній регламентує відхилення розмірів зварного шва від заданих і дає оцінку їх придатності за альтернативною ознакою «придатний - не придатний», а EN25817 [143] здійснює оцінку придатності зварних швів по одному з трьох рівнів якості: «Д» - низький, «С» - середній і «В» - високий.

Для прогнозування властивостей зварного з'єднання для напівавтоматичного зварювання плавиться в вуглекислому газі (МАГ) розроблено програмне забезпечення MAGSIM [1], структура якого заснована на розробленій авторами концепції вирішення завдань аналізу, оптимізації та діагностики параметрів режиму, що відповідають вимогам якості МАГ-зварювання стикових швів тонколистових з'єднань в нижньому положенні і послідовно включає в себе опис: зварювальної операції (теплофізичних властивостей матеріалу, товщини листів, необхідного класу якості зварного шва); джерела живлення (опір джерела живлення і зварювальних кабелів, місця вимірювання напруги, діаметра і вильоту електродного дроту, типу захисного газу); технологічних умов (ширини зазору між зразками, наявності та форми захисту із зворотного боку шва, температура деталі); мети рішення (аналізу,

оптимізації або діагностики процесу). У програмному модулі «Аналіз» здійснюється розрахунок параметрів геометрії зварного шва на основі нелінійного квазістаціонарного рівняння теплопереносу. У модулі «Оптимізація» здійснюється оптимізація параметрів процесу маг-зварювання на основі критеріїв - наприклад, максимальна продуктивність або максимальна ймовірність забезпечення якості, в тому числі з урахуванням розсіювання тих чи інших параметрів. Програмний модуль «Діагностика» видає повну інформацію про розкид розмірів зварного шва через розсіювання параметрів за допомогою статистичних методів обробки даних. Використання пакета MAGSIM дозволило, за заявою розробників, в 20-30 разів знизити витрати на експериментальну відпрацювання технології напівавтоматичного зварювання плавиться [1]. Недоліком розробленої програми є професійна орієнтованість системи, спрямована перш за все для вирішення завдань в області комп'ютерних технологій проектування процесів формування шва при дугового зварювання і не призначена інженерам-технологам для оптимізації процесу виготовлення зварної конструкції.

Програма FLUX 2.1 [14] призначена для розрахунку параметрів режиму зварювання під флюсом для з'єднань з низьковуглецевих і низьколегованих сталей і нормування витрат зварювальних матеріалів. Розрахунок режиму зварювання проводиться на основі формул, наведених в методиці [3]. Нормування витрат зварювальних матеріалів здійснюється на основі довідкових даних.

Межі допустимих значень параметрів швів в системах TSIM [2] і «OrbitWeldSim» [6] регламентовані ГОСТ 14771-76 [11]. До складу програми TSIM [2] для моделювання імпульсної МІГ-тандем-зварювання входять три програмних модуля для моделювання: стаціонарного процесу з присадочною дротом, нестаціонарного процесу з присадочною дротом і низькочастотної модуляцією потужності дуги і нестаціонарного процесу з присадочною дротом і низькочастотної модуляцією потужності дуги на другий присадочною дроті. У

структуру кожного модуля входять програма-менеджер для управління внутрішніми програмними зв'язками, препроцесор для введення вихідних даних, процесор для визначення параметрів джерел теплоти і тиску, процесор для розрахунку освіти шва, постпроцесор для візуалізації результатів. В програму входять алгоритми розрахунку геометричних параметрів зварних швів на основі коефіцієнтів чисельної моделі рішення рівняння теплопереносу та деформацій на основі методу скінченних різниць на рівномірній ортогональній сітці. Порівняння розрахунків виконаних за допомогою програми TSIM з експериментальними показало задовільну збіжність, похибка не перевищувала 20%.

В роботі [24] розроблена комп'ютерна програма на основі математичної моделі формування зварювальної ванни при автоматичної орбітальної зварюванні вольфрамівим електродом трубних конструкцій з товщиною стінки 2,0 - 4,0 мм, що дозволяє оцінювати якість формування зварного шва при заданих параметрах зварювання. Однак вона не враховує просторове положення зварювальної дуги і сил поверхневого натягу. Подібних недоліків позбавлена комп'ютерна модель, запропонована в роботі [23], за результатами використання якої була розроблена комп'ютерна програма «OrbitWeldSim» для визначення параметрів зварювання сталі 08X18H10T товщиною 4,0 - 6,0 мм з присадковим дротом. Рішення зворотної задачі при імітації умов формування шва в різних просторових положеннях дозволило отримати програму оптимальної зміни параметрів процесу зварювання для отримання зварного шва із заданими параметрами з похибкою 15%. Програма не призначена для визначення параметрів геометрії зварного шва для АрДЗ тонколистових стикових з'єднань без присадного дроту.

Програмний комплекс «ЗВАРЮВАННЯ» (далі ПК «ЗВАРЮВАННЯ»), розробку якого було розпочато на кафедрі зварювання і діагностики МДТУ ім. Н.Е. Баумана у 1974 році, призначений для вирішення широкого кола завдань моделювання зварювальних процесів, і, за даними розробників, дозволяє



змодельовати такі процеси [4]: 1) протікання електричного струму в металі, виділення тепла; 2) електричні та світлові явища в дузі, плазмі, електронному і лазерному промені; 3) електромагнітні явища; 4) гідродинамічні явища у зварювальній ванні; 5) теплові процеси в металі, плавлення і кристалізація; 6) фізико-хімічні перетворення в металі шва і в НШЗ; 7) зварювальні деформації і напруги від нерівномірного нагрівання і структурних перетворень; 8) пружність та пластичність металу в умовах зварювання; 9) розвиток процесів руйнування в умовах неоднорідності властивостей матеріалу і наявності дефектів під дією зварювальних процесів і різних видів експлуатаційних навантажень.

У ПК «ЗВАРЮВАННЯ» входять 4 основних програмних компоненти [4]:

1) Основна програма «Процес» для введення даних, моделювання процесу експлуатації конструкції з використанням методу скінченних елементів і отримання результатів розрахунку;

2) Допоміжна програма «Геометрія» для розробки параметризованих геометричних моделей зварних вузлів і включення їх в бібліотеку моделей;

3) Допоміжна програма «Матеріал» для редагування властивостей і поповнення бібліотеки матеріалів;

4) Допоміжна програма «Екран» для докладного аналізу розрахунків і оформлення звітів.

Основною позитивною рисою ПК «ЗВАРЮВАННЯ» є орієнтування на користувачів з різним інженерним рівнем математичної та комп'ютерної підготовки. Це дозволяє застосовувати комплекс не тільки в науково-дослідних і проектних розробках, а й у виробничих умовах. Істотним недоліком даного програмного комплексу є обмеженість в комерційному використанні і неможливість її реалізації на даному етапі розробки. Ще одним істотним недоліком є відсутність можливості врахування граничних умов контакту двох матеріалів [4]. Внаслідок цього ПК «ЗВАРЮВАННЯ» був виключений з подальшого розгляду.

У мережі інтернет в обмеженому доступі компанією EWI запропоновано

протягом 30-денного терміну скористатися програмою EWI WeldPredictor [5], заснованої на використанні коефіцієнтів чисельної кінцево елементної моделі і алгоритмів оптимізації експериментальних параметрів процесу, для оцінки міцнісних властивостей конструкцій, виконаних за допомогою МАГ / МІГ-зварювання і АрДЗ імпульсної і безперервної дугами. Меню введення параметрів має великий базу даних матеріалів, після призначення яких користувачеві пропонується самому намалювати зварений шов або вибрати тип зварного з'єднання з представлених, вибрати умови закріплення і тип джерела нагріву. Після завдання всіх необхідних даних програма формує звіт, в якому відображається розподіл деформацій і напружень в звареної конструкції і наводяться рекомендації до їх зниження. На жаль, розробниками програми не була вказана точність виконаних результатів.

В результаті літературного огляду систем прогнозування формування зварного шва не було знайдено у відкритому доступі такої комп'ютеризованої системи вибору режимів АрДЗ стикових з'єднань, що дозволяє використовувати її для отримання кількісних взаємозв'язків параметрів режимів АрДЗ і параметрів зварного шва на мідній підкладці без проведення попередніх експериментів.

#### **1.4 Основні методи розрахунку залишкових деформацій після зварювання**

Зварювання викликає спотворення розмірів і форми елементів зварних конструкцій, їх вкорочення, вигин, втрату стійкості, закручування. Ці спотворення виражаються в переміщеннях, які залежать від форми зварної конструкції, розташування швів в ній, товщини металу. Різноманітні види переміщень зварних конструкцій породжуються відносно невеликим числом видів деформацій і переміщень, що виникають в зоні зварних з'єднань. Для попередньо взятих виробів найважливішими деформаціями, при великій величині яких може статися розкриття стику, є [4]:

1) Поздовжні залишкові пластичні деформації  $\varepsilon_{\text{пл.ост.}}$ , що утворюють усадкову силу  $P_{\text{yc}}$  і поздовжню усадку  $\Delta_{\text{пр}}$ ;

2) Поперечні деформації  $\beta$ , які утворюють у зварному з'єднанні поперечну усадку  $\Delta_{\text{поп}}$ .

Відповідно до даних роботи [5] усадкова сила  $P_{\text{yc}}$  визначається за формулою:

$$P_{\text{yc}} = \int_{-b_{\text{п}}}^{+b_{\text{п}}} \varepsilon_{\text{ост}} E s dy, \quad (1.20)$$

де  $s$  – товщина пластини, см;

$E$  – модуль Юнга матеріалу, ГПа;

$b$  – половина ширини зони пластичної деформації, см.

Поздовжня усадка від сили  $P_{\text{yc}}$  для легованих сталей виражається величиною [5]:

$$\Delta_{\text{пр}} = P_{\text{yc}} L_0 / (2b_{\text{п}} s E), \quad (1.21)$$

де  $L_0$  – довжина зварюваної пластини, см.

Фактично чинна сила усадкової сили визначається за формулою [5]:

$$P_{\text{yc}} = P_{\text{yc.ж}} / [1 - P_{\text{yc.ж}} (e_1^2 / I_1 + e_2^2 / I_2 + 1 / F) / \sigma_{\text{T}}], \quad (1.22)$$

де  $\sigma_{\text{m}}$  – межа текучості зварюваного матеріалу, МПа;

$I_1, I_2, F$  – головні центральні моменти інерції і площа поперечного перерізу пластини;  $I_1 = sB^3/12$ ;  $F = Bs$ ;

$e_1, e_2$  – ексцентриситети додатки усадочною сили щодо головних центральних осей;  $e_1 = B/2$ ;  $e_2 = 0$  (для стикового з'єднання).

Для низьколегованих вуглецевих сталей з межею текучості до 300 МПа отримана емпірична формула для розрахунку  $P_{\text{yc.ж}}$  [5]:

$$P_{\text{ус.ж}} = -[230000/(q_0 + 12600) + 3,58]q/V_{\text{св}}, \quad (1.23)$$

де  $q$  – ефективна потужність, Вт;

$q_0$  – питома погонна енергія зварювання, Дж/см<sup>2</sup>;

$S_{\text{розрах}}$  – розрахункова товщина зварюваного елемента, мм;  $S_{\text{розрах}} = 0,5(s_1 + s_2)$ ;

$s_1$  та  $s_2$  – товщина зразків, см;

$q = q_{\text{п}}/(V_{\text{св}}S_{\text{розрах}})$ .

Формула (1.23) дійсна в діапазоні  $q_0$  от 4000 до 38000 Дж/см<sup>2</sup>.

При нагріванні пластини рухомим джерелом нагрівання, величина поперечного укорочення виражається формулою [5]:

$$P_{\text{ус}} = \int_{-bn}^{+bn} \varepsilon_{y(\text{ост})} dy \quad (1.24)$$

При АрДЗ стикових з'єднань поперечна усадка обчислюється за формулою [5]:

$$\Delta_{\text{поп}} = A \frac{a}{c_p} \cdot \frac{q}{V_{\text{св}}s} \quad (1.25)$$

де  $A$  – емпіричний коефіцієнт.

Для аргонодугового зварювання з наскрізним проплавленням  $A = 1,0 - 1,2$  [5].

Абсолютне значення  $\Delta_{\text{поп}}$  змінюється в широких межах залежно від введеної при зварюванні погонної енергії. Внаслідок чого, навіть невелика зміна погонної енергії спричинить за собою зміну міцнісних властивостей зварного шва і зміна форми конструкції.

Всі види деформацій, характерних для стикових з'єднань, мають місце і при зварюванні оболонок. В результаті деформацій в оболонках виникають тимчасові і залишкові переміщення. Від тимчасових переміщень при

зварюванні кільцевих швів частково залежать конструкції, пристосування і оснащення.

Нерівномірне нагрівання по товщині викликає вигин листа в процесі зварювання. Якщо один лист з цієї причини переміщається, а інший – ні, то також виникає зміщення  $\Delta z$ . Найбільш закономірний характер мають переміщення  $w$  при зварюванні кільцевих швів оболонок. Внаслідок розширення при нагріванні значна зона поблизу кромки оболонки подовжується в напрямку окружності, виникають радіальні переміщення зварювальних кромки. Радіальні переміщення крайок  $w$  будуть різними, якщо оболонки мають різну жорсткість (див. рис. 1.9, б), коли одна з оболонок є фланець, а інша не має додаткової жорсткості [5].

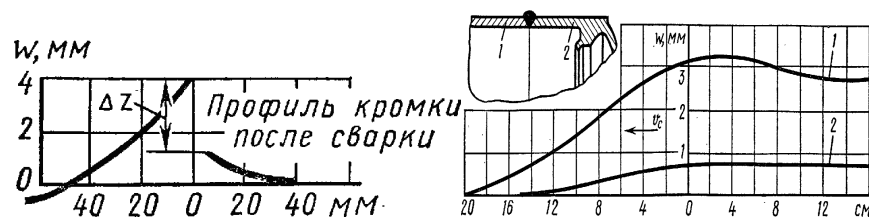


Рисунок 1.9 – Переміщення в зоні кільцевого шва циліндричної оболонки

У кільцевих швах тонкостінних циліндричних оболонок після зварювання виникає окружна усадочная сила, яка діє на оболонку аналогічно розподіленої навантаженні  $P$ , повторює характер епюри поздовжніх залишкових пластичних деформацій  $\epsilon_{\text{пл.зал}}$  [5]:

$$P_{\text{ус}} = \epsilon_{\text{пл.зал}} E s / r, \quad (1.26)$$

де  $s$  – товщина стінки оболонки, см;

$r$  – радіус циліндричної оболонки, см.

В результаті утворюється місцевий вигин і зменшення діаметра в зоні кільцевого шва (рис. 1.9, а), яке поширюється приблизно на довжину  $l$  [27]:

$$l = \frac{3}{4} \pi^4 \sqrt{\frac{r^2 s^2}{3(1-\mu^2)}} \quad (1.27)$$

Залишкові переміщення від поздовжніх швів в довгих циліндричних оболонках діаметром  $D$  представляють собою прогин  $f$  (див. рис. 1.10, б), який обчислюється за усадковою силою  $P_{yc}$  і моментом інерції кільцевого перерізу оболонки за формулою [4]:

$$f = P_{yc} e_1 l^2 / (8EI_1) = M l^2 / (8EI_1), \quad (1.28)$$

де  $M$  – момент усадочної сили відносно центра ваги поперечного перерізу:

$$M = P_{yc} e_1.$$

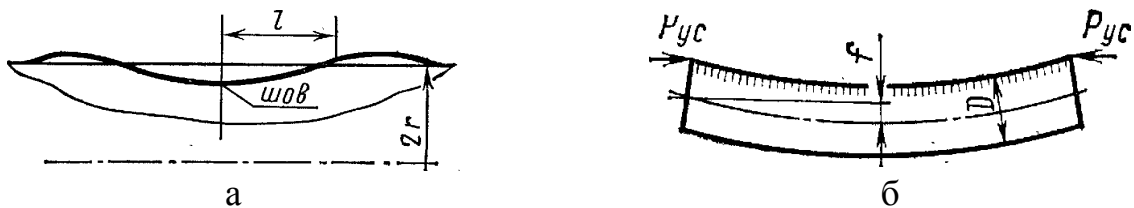


Рисунок 1.10 – Переміщення в зоні кільцевого шва тонкостінної циліндричної оболонки від розрахункового навантаження  $P$ , що викликані залишковими пластичними деформаціями (а), і переміщення від поздовжнього шва (б)

Вочевидь, що аналітичні формули (1.20) - (1.28) дозволяють розрахувати деформації виробу після зварювання дуже наближено і не можуть враховувати вплив схеми закріплення виробу в зварювальному пристосуванні і величину тепловіддачі в підкладку при зварюванні тонколистових конструкцій без проведення додаткових експериментів.

Оскільки аналітичні формули для розрахунку залишкових деформацій після зварювання не дозволяють врахувати всіх цих факторів, розглянемо чисельні методи рішення термодформаційних завдання для оцінки залишкових деформацій виробу після зварювання.

Для чисельної оцінки впливу термодформаційного циклу зварювання на

розподіл залишкових деформацій у виробі використовують кінцево-разностную (МКР) або кінцево-елементну (МКЕ) схему.

Використовуючи МКЕ, 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 кордонах елементів (в вузлах) є рішенням задачі і заздалегідь невідомі. Коефіцієнти апроксимуючих функцій зазвичай визначаються з умови рівності значення сусідніх функцій на кордонах між елементами (в вузлах). Потім ці коефіцієнти виражаються через значення функцій у вузлах елементів і складається система лінійних алгебраїчних рівнянь [26, 28].

При використанні МКР на розрахунковій області будується сітка, потім вибирається різницева схема і для кожного вузла сітки записується різницеve рівняння (аналог вихідного рівняння, але з використання різницевої схеми), потім проводиться облік крайових умов (для крайових умов другого і третього роду також будується деяка разностная схема).

Виходить система лінійних алгебраїчних рівнянь, вирішуючи яку у відповіді отримують наближені значення рішення у вузлах [15, 16, 18, 24, 27]. У світі існують десятки комерційних програмних комплексів МКЕ і МКР (ANSYS, ABAQUS, MSC MARC), в тому числі спеціалізованих для вирішення задач в області зварювального виробництва (SYSWELD, Weld Planner). Розглянемо чисельні методи рішення термодформаційних завдання для оцінки залишкових деформацій виробу після зварювання, знайдені в науковій літературі [3].

В роботі [10] для визначення поперечної усадки використовували пакет ANSYS / Multiphysics. Автоматичну АрДЗ проводили на пластині 300·260·6 мм з сталі 25. Як джерело нагріву використовували нормально-кругової розподілений з параметрами: вводиться потужність  $q=6550$  Вт, ефективний радіус джерела нагріву  $r_n=7$  мм, швидкість зварювання  $V_{св}=6$  мм/с. Початкова

температура становила  $32^{\circ}\text{C}$ . В результаті верифікації чисельної моделі з експериментальними величина похибки в середньому не перевищувала 25%. За подібною схемою поверхневого джерела нагріву визначали величину залишкової деформації при трьохпроходних зварюванні сталі 316L в роботі [11], відхилення між експериментальними даними та результатами чисельного моделювання в якій не перевищили 5%.

Авторами статті [17] було розглянуто процес формування залишкових напружень і деформацій при електронно-променевого зварювання титанового сплаву TA15 товщиною 49 мм. В якості джерела нагрівання використовували модель кінцевого об'ємного теплового джерела. Для обліку пластичних деформацій в пакеті ANSYS розрахунок проводили по билинейній кінематичної ізотропної моделі (BKIN) з урахуванням ефекту Баушінгера [26]. Розбіжність між результатами моделювання та експериментами не перевищило 10%. Подібна модель поведінки пластичності використовувалася і в роботі [44], в якій розглядалося складально-зварювальний цикл виробництва труб великого діаметру аргонодугового зварюванням. Для побудови KE-моделі використовувався 8-ми вузловий твердотільний тривимірний «тепловий» елемент SOLID 70 ANSYS / Thermal. Чисельний аналіз тривимірного температурного поля в стінці труби здійснювався в результаті рішення нестационарного рівняння теплопровідності для твердого тіла з однорідними властивостями. Одночасно з розрахунком температурної задачі здійснювався чисельний розрахунок ПДВ виробу, що виникає при нагріванні нестационарним неоднорідним тривимірним полем температур. Модель трубної заготовки при цьому сприймала реакції опори від трьох роликів, на які спиралася контактено, і піддавалася впливу сили тяжіння. Авторами не були приведені ні режими зварювання, ні точність результатів чисельного моделювання.

Аналітичним шляхом встановлено, що для вирішення термодформацийних завдань підходить комплекс програм MARC / MSC. В роботі [30] розроблено метод отримання параметрів лінійного- еквівалентного



джерела теплоти за профілем поперечного перерізу шва при електронно-променевого зварювання, заснований на чисельному рішенні зворотної задачі теплопровідності шляхом регулювання потужності безлічі точкових джерел теплоти, розташованих в зварюваній алюмінієвому сплаві AA70X товщиною 20 мм на осі променя, для отримання збіги розрахункового і досвідченого профілів поперечного перерізу шва. При завданні навантаження і визначенні швидкостей деформацій використовували ізотропний закон зміцнення. Положення поверхні плинності визначали за критерієм Мізеса. Про точність чисельних результатів розподілу залишкових напруг і деформацій авторами зазначено не було.

У ряді досліджень [26, 28, 29] внаслідок жорсткості розглянутої конструкції і великої товщини (більше 10 мм) в чисельній моделі не враховували пластичні деформації.

Як інструмент для прогнозування розподілу залишкових напруг і деформацій широко використовують програмний пакет ABAQUS. У статті [19] була розглянута можливість використання пакета ABAQUS для прогнозування величини залишкових деформацій при АрДЗ пластини 200x200x2 мм з нікелевого сплаву IN718. Згідно з отриманими результатами чисельної моделі, похибка чисельного розрахунку поздовжньої усадки зразка при зіставленні з експериментальними даними склала не більше 10%. У ряді робіт [4, 7, 8, 18] запропонована чисельна термдеформаційна модель для оцінки залишкових деформацій зварної конструкції з урахуванням еволюції мікроструктури у НШЗ. Розбіжності між експериментальними даними та результатами чисельної моделі не перевищили 15%.

Методика проведення моделювання термомеханічних завдань у пакетів ANSYS і ABAQUS кілька різна, що в підсумку може призвести до різниці і в отриманих результатах. В роботі [20] проводилося співставлення результатів моделювання в цих пакетах на прикладі АрДЗ вуглецевої сталі S15C товщиною 6 мм. Режим зварювання:  $I_{cb}=300$  А,  $U=15$  В,  $V_{cb}=10$  мм/с, коефіцієнт конвективного тепловіддачі з поверхні  $k = 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), ефективний ККД - 0,7.

Порівняння температурних полів shell / 3D елементів в ABAQUS і ANSYS показало, що ANSYS дає дещо вищу температуру в корені зварного шва. Ця різниця істотно зменшується при переході від кореня зварного шва до крайок основного матеріалу. Максимальні значення залишкових напружень розраховували з використанням і ABAQUS і ANSYS. В результаті отримали поблизу зварного шва приблизно однакові значення напруженій (різниця не більше 7%). Однак залишкові напруги на кінцях пластин значно відрізнялися (різниця досягала 34%).

За схемою кінчного розподіленого джерела нагріву в роботі [93] була вирішена термічна завдання опису геометрії наскрізного проплавлення при лазерної зварюванні стикового з'єднання зі сталі ALSI304. В результаті порівняння результатів розподілу залишкових деформацій після зварювання з експериментальними даними, виявили величину розбіжності - для ширини шва і глибини проплавлення вона склала відповідно 2,8 % і 1,9 %.

Для оцінки залишкових напруг в стикових з'єднаннях за методом еквівалентних початкових температур в роботі [8] проведено моделювання зварювання кільцевих стиків трубопроводу діаметром 1420 мм з товщиною стінки 32 мм зі сталі класу міцності X70 і високоміцної сталі класу K60, стики яких виконані автоматичною зваркою в середовищі вуглекислого газу без підігріву за 15 проходів. Для скорочення обчислювальних витрат при моделюванні автором використаний ряд припущень: 1) осесиметрична модель зварного з'єднання після зварювання чергового валика відразу заповнювалася наступним; 2) модель матеріалу представляла собою суміш декількох структурних компонентів (ферритно-перлітного, аустенітного і бейнітно-мартенситного), процентний вміст яких вимірювався в процесі структурних перетворень; 3) модель ідеального пружно матеріалу не враховувала зміцнення і повзучість при розрахунку залишкових деформацій і напружень. Аналіз розподілу найважливіших компонент головних нормальних залишкових напружень в трубі (окружних напружень, спрямованих вздовж вісі шва, і

поздовжніх напружень) показав, що вони досить точно відтворюються методом еквівалентних початкових температур на основі МКЕ (похибка при цьому не перевищувала 15 %).

Розглянуті чисельні моделі, в яких за результатами термічного аналізу у вигляді розподілу ізотерм плавлення від рухомих джерел нагріву оцінюється напружено-деформований стан виробу, що зварюється, можуть бути використані для призначення припусків на механічну обробку деталей і дозволять знизити витрату металу і час обробки. Оскільки величина тепловіддачі в підкладку чинить істотний вплив не тільки на розміри зварного шва, а і на залишкові деформації тонколистових конструкцій, вочевидь, є необхідною кількісна оцінка її впливу на деформацію конструкцій. При цьому на розподіл залишкових напружень і деформацій у зварному виробі впливає конструкція зварювального пристосування і умови закріплення виробу. Чисельні моделі, в яких була зроблена оцінка впливу перерахованих вище факторів на залишкові деформації виробу при АрДЗ на підкладці в науковій літературі знайдено не було.

Однією з проблем, що виникають в процесі освоєння кінцево-елементних програмних пакетів, є висока складність і необхідність адаптації до вирішення завдань, що виникають в процесі моделювання процесу зварювання для нових виробів. У зв'язку з цим розробниками цих програмних комплексів введено 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'ємний джерело нагріву типу подвійного еліпсоїда Голдак, 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 залишкових деформацій 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 комбінацію об'ємних і розподілених джерел нагріву. Крім того, для отримання більш точного результату моделювання найдоцільніше використовувати кінцево-елементний програмний комплекс з відкритою можливістю настройки параметрів розв'язуваної задачі.

В якості джерела нагрівання при АрДЗ тонколистових матеріалів з метою мінімізації кількості розрахункових параметрів доцільно використовувати комбінацію лінійного та нормально-кругового розподіленого джерел нагрівання, як це запропоновано в роботах [10, 14, 19, 28, 29]. Для обліку конструкції зварювального пристосування і умов закріплення виробу з метою зниження залишкових деформацій після зварювання авторами даної роботи була розроблена чисельна термодформаційних модель на основі кінцево-елементної моделі теплопередачі при автоматичній АрДЗ на мідній підкладці.

В результаті літературного огляду систем прогнозування формування зварного шва не було знайдено у відкритому доступі такої комп'ютеризованої системи вибору режимів АрДЗ стикових з'єднань, що дозволяє використовувати її для отримання кількісних взаємозв'язків параметрів режимів АрДЗ і параметрів зварного шва на мідній підкладці без проведення попередніх експериментів.

**Мета роботи** – вдосконалення технології АрДЗ без присадного дроту

стикових з'єднань на мідній підкладці корозійно-стійких сталей аустенітного класу товщиною від 1,5 до 3 мм шляхом створення комп'ютеризованої системи, що дозволяє знизити трудомісткість технологічної підготовки виробництва при проведенні робіт з експериментальної коригуванні режимів зварювання нових виробів у виробничих умовах.

У відповідності з цією метою необхідно вирішити наступні основні завдання:

1. Визначення кількісних залежностей, що зв'язують основні параметри геометрії зварного шва для стикових з'єднань з корозійно стійких сталей аустенітного класу товщиною від 1,5 до 3 мм з режимами АрДЗ без присадного дроту на мідній підкладці.

2. Розробка математичної моделі, яка описує основні параметри геометрії зварного шва стикового з'єднання при автоматичній АрДЗ корозійно-стійких сталей аустенітного класу товщиною від 1,5 до 3 мм з урахуванням тепловіддачі в мідну підкладку.

3. Розробка комп'ютеризованої системи вибору режимів зварювання на основі експериментальних даних і результатів математичного моделювання, що дозволяє сформулювати для АрДЗ без присадного дроту найкраще поєднання параметрів режиму зварювання стикових з'єднань на мідній підкладці.

4. Розробка методики оцінки впливу термодформаційного циклу АрДЗ стикових з'єднань на величину залишкових деформацій зварної конструкції на основі розробленої моделі зварювання стикових з'єднань тонколистових матеріалів і рекомендацій щодо зменшення залишкових деформацій при зварюванні на складально-зварювальних пристроях з мідною підкладкою.

Рішення поставлених завдань визначає наукову новизну роботи і її практичну значимість.

## **2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДІАПАЗОНІВ РЕЖИМІВ АРГОНОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ НА ПІДКЛАДЦІ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ФОРМУВАННЯ ЗВАРНОГО ШВА З РОЗМІРАМИ, ЯКІ ВІДПОВІДАЮТЬ ГОСТ 14771-76**

У другому розділі наведені результати визначити режим зварювання, що забезпечують отримання зварного шва з розмірами, відповідними ГОСТ 14771-76 [21] тип з'єднання С4 для корозійностійкої сталі аустенітного класу 12Х18Н10Т товщиною 1,5; 2,0 і 3,0 мм, а також експериментально визначені значення ефективного ККД зварювальної дуги у всіх діапазонах досліджуваних режимів АрДЗ на мідній підкладці.

### **2.1 Устаткування для проведення досліджень**

Дослідження проводилися на спеціалізованому стенді для зварювання плоских зразків на мідній підкладці з притискним пневмошланговим пристосуванням клавішного типу. Стенд для зварювання плоских зразків дозволяє здійснити поздовжнє переміщення зварювальної головки із заданою швидкістю і притиснення плоских зразків клавішними притискачами до підкладки під час зварювання (рис. 2.1).

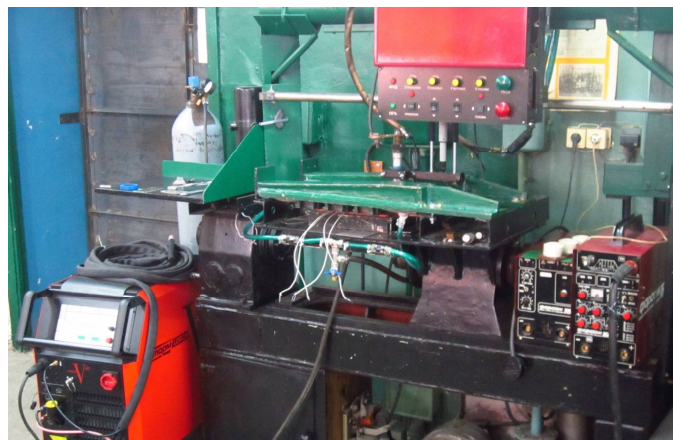


Рисунок 2.1 – Стенд для зварювання плоских зразків

Технічні характеристики зварювальної головки представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики головки для АрДЗ

Номінальний зварювальний струм при ПВ = 60%, А	400
Номінальна напруга мережі живлення, В	380/220
Діаметр вольфрамового електрода, мм	1- 5
Діаметр присадного дроту, мм	0,8-1,6
Діапазон регулювання швидкості зварювання, м/год	8-80
Діапазон регулювання стабілізованою швидкості подачі присадного дроту, м/год	8-80
Вертикальне переміщення головки: механізоване, мм	200
Поперечне переміщення головки: механізоване, мм	± 10
Кут нахилу головки в площині зварювання, град.	± 90

В якості джерела живлення використовувався промисловий інвертор Lorch 400 DC, технічні характеристики якого вказані в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики джерела живлення Lorch 400 DC

Діапазон регулювання струму для TIG зварювання, А	3-400
Діапазон регулювання струму для зварювання покритими електродами, А	20-250
Зварювальні електроди Ø TIG, мм	1,0-4,0
Зварювальні електроди покриті Ø, мм	1,5-6,0
Струм (DC) при 100% ПВ, А (25°C/40 °C)	400/360
ПВ при максимальному струмі, % (25°C/40 °C)	100/60
Коефіцієнт потужності $I_{2max}$	0,99
Напруга, В	380±15%
Ступінь захисту	IP23
Клас ізоляційного матеріалу	F
Вид охолодження	F
Стандарт	EN 60974-1
Розміри, мм (Д х Ш х В)	1130x450x815

Для забезпечення широкого діапазону зварювальних струмів і тривалої роботи без перегріву застосовувалася зварювальна головка з водяним охолодженням.

## 2.2. Зварювальне оснащення, інструмент та вимірювальна техніка

Для закріплення плоских зразків використовувалося типове затискні пристрої пневмошлангового типу з площинним притисненням клавішами зварювальних кромки, що застосовується для АрДЗ стикових з'єднань з тонколистових матеріалів на більшості виробничих підприємств. Затискання кожного зразка здійснювалося чотирма клавішами (далі притискачами), зовнішній вигляд яких представлений на рис. 2.2, б.



а



б

Рисунок 2.2 – Схема затиснення сталевих зразків (а) і притискач (б)

Тиск притискачів на зварюваний матеріал становив 0,6 МПа. Як тепловідводної підкладки використовували мідні пластини з канавкою шириною 6 і 8 мм і глибиною 0,5 мм. Відстань між клавішними зажимами і їх форма на зварювальній оснастки (див. рис. 2.2, б), а також розміри канавки в мідній підкладці підбиралися відповідно до рекомендацій ГОСТ 14771-76 [11].

Сила струму встановлювалася регулятором на зварювальному джерелі живлення Lorch 400 DC. Вимірювання напруги на дузі здійснювалося за допомогою цифрового мультиметра M830. Схема закріплення зварного зразка показана на рис. 2.3.



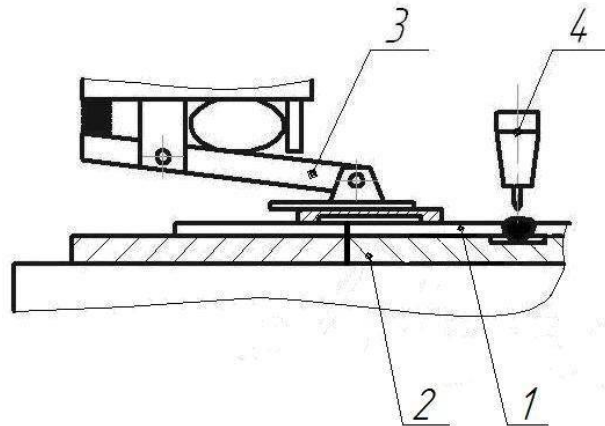


Рисунок 2.3 – Схема закріплення зразків при зварюванні: 1 – стиковий шов; 2 – мідна підкладка з канавкою; 3 – притискний пристрій; 4 – зварювальна головка

Встановлення зазору між кінцем електрода і зварної пластиною проводилася універсальним шаблоном зварника УШС-3 моделі 00314 ТУ 3936-050-00221190-99. Відхилення положень штрихів використаної виміральної шкали від дійсних значень товщини  $\pm 0,25$  мм. В ході проведення експериментів використовувався один і той же універсальний шаблон зварювальника.

Фотографування зразків здійснювалося за допомогою цифрової фотокамери Canon A560. Висота зворотного валика і величина посилення зварного шва визначалися індикатором переміщення годинного типу НЧ-4. Для вимірювання температури при термометруванні використовувався прилад ТС4S, технічні характеристики якого наведені в табл. 2.63.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики терморегулятора ТС4S

Живлення	100...240В (50/60Гц)
Допустимий діапазон напруги	90-110% від номінальної напруги
Похибка вимірювання температури	Поточне значення $\pm 0,5\%$ або $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , залежно від того, що більше
Метод управління	Дискретне регулювання (ВКЛ/ВИКЛ)
Межі індикації	0,1...999,9 $^{\circ}\text{C}$
Час вимірювання	100 мс
Діелектрична міцність	2000В змінного струму протягом 1 хвилини, 50/60Гц

### 2.3 Витратні матеріали для експериментів

В експериментах в якості електродів використовувалися вольфрамові стрижні WL-20 Ø 3,0 мм марки FoxWeld ISO6848-2004. Підготовка електродів полягала в заточенню робочого торця на конус  $30^\circ$  з точністю  $\pm 1,5^\circ$  без притуплення конуса, оскільки у відповідність з роботами [5, 6,] в максимальна стабільність форми проплавлення металу досягалася на кутах заточення  $30^\circ$ .

Заточування електродів проводилось на токарному верстаті за допомогою спеціального оснащення із застосуванням алмазного круга, який встановлювався на шпинделі токарного верстата (див. рис. 2.4). Оснащення для обертання і закріплення електрода встановлювалася в резцедержатель верстата.

Електрод закріплювався в оснащенні і підводився до робочої частини абразивного інструменту за допомогою органів управління верстата.



Рисунок 2.4 – Пристосування для заточування електродів

Після заточування електрод фотографувався під мікроскопом МБС-10 цифрою фотокамерою Canon A560. Робоча поверхня електрода мала форму конуса, при цьому на робочій поверхні електрода не допускалися задираки, тріщини та інші дефекти.

Вимірювання кута електрода проводилося шляхом обробки цифрових фотографій в системі КОМПАС 3D (див.Рисунок2.5). Електроди з відхиленням кута понад  $1,5^\circ$  від  $30^\circ$  відбраковувалися і переточували.

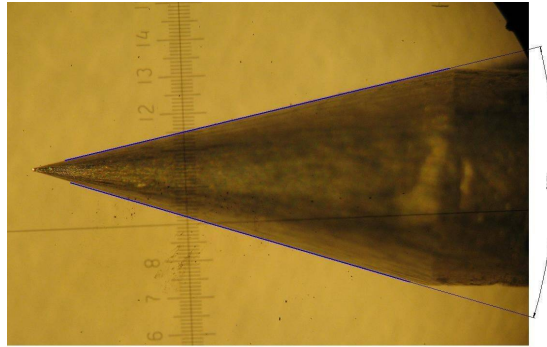


Рисунок 2.5 – Схема вимірювання кута заточування електрода

При АрДЗ в якості захисного газу використовувався аргон вищого гатунку по ГОСТ 10157-79 [30].

В якості основного матеріалу для АрДЗ використовували пластини з корозійностійкої сталі аустенітного класу 12X18H10T розмірами 100x50 мм товщиною 1,5; 2,0 і 3,0 мм в стані поставки [28].

#### **2.4.Методика визначення діапазонів режимів аргонодугового зварювання стикових з'єднань на підкладці**

Перед зварюванням електрод з заточеною на конус поверхнею встановлювався в цангу зварювальної головки. Виліт електродів з цанги головки у всіх випадках становив 25 мм. Діаметр сопла головки становив 18 мм, виліт кінчика електрода з сопла – 5 мм і залишалися незмінними для всіх експериментів. Витрата води в системі охолодження головки становив 2-3 л / хв. Міжелектродний проміжок дорівнював 2-3 мм.

При зварюванні анодом слугувала мідна підкладка з канавкою глибиною 0,5 мм і шириною 8 мм. Перед зварюванням зразки і мідна підкладка ретельно зачищають, після чого визначалося їх середнє значення величини мікронерівностей поверхні приладом TR 100. Потім зразки встановлювали в пристосування пневмошлангового типу з розташуванням стику по осі канавки в підкладці і включали компресор, що нагнітає повітря в пневмосистему, що здійснює поджатие притискачів. Після цього регулятором переміщення зварювальної головки виставлявся міжелектродний проміжок  $l_{мп}$  і витрата захисного газу. Далі зварні зразки знежирюємо і проводилася зварювання.

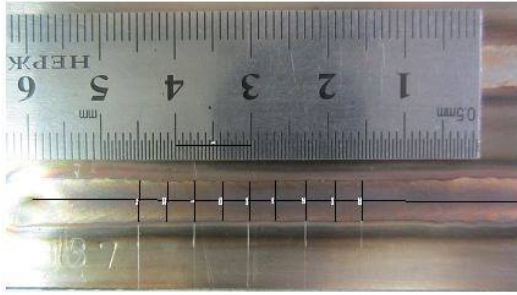
Для кожної товщини матеріалу за довідковими матеріалами було вибрано 4 значення сили струму (табл. 2.4). Для кожної величини сили струму підбиралися кілька швидкостей, в діапазоні між якими перебувала допустима величина ширини зворотного валика. На кожному режимі було виконано по 3 ідентичні зварювальні операції.

Таблиця 2.4 – Експериментальні досліджені діапазони режимів зварювання

Товщина металу, мм	Сила струму $I_{св}$ , А	Діапазон швидкостей зварювання $V_{св}$ , м/год	Витрата аргону, л/мин
1,5	90	12-21	5-7
	105	15-24	
	115	18-27	
	125	21-30	
2,0	90	10-12	5-7
	115	10-18	
	140	16-25	
	160	18-26	
3,0	170	10-16	7-9
	190	12-18	
	210	14-20	
	225	18-25	

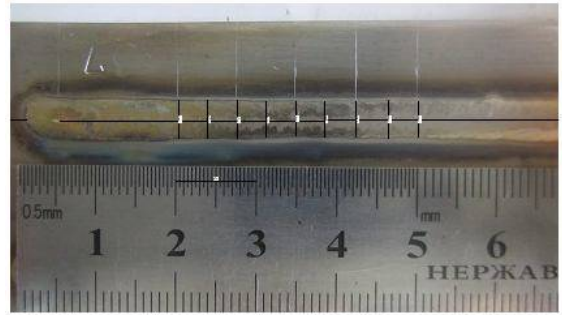
В якості неприпустимих дефектів приймалися пропали і подрізи, глибина яких перевищувала 10% від товщини зварюваного зразка.

Розміри зварних швів вимірювалися по фотографіях в програмі КОМПАС 3D по 9 точках з інтервалом 4 мм. Кількість вимірювань визначено оцінкою параметрів зварного шва орієнтуючись на їх експериментальну точність в межах 3-5%. Лицьова сторона зварного шва представлена на рис. 2.6 (а, в і д), а зворотна поверхня шва - на рис. 2.6 (б, г і е).



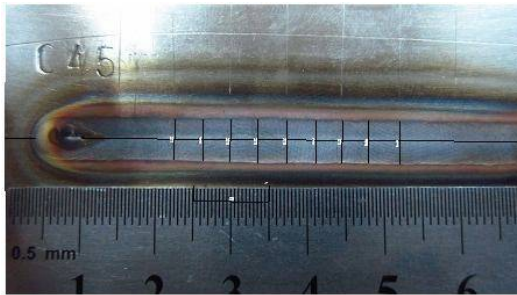
а

$I_{CB} = 105A, V_{CB} = 15M/ГОД, l_{МП} = 3 \text{ мм}$



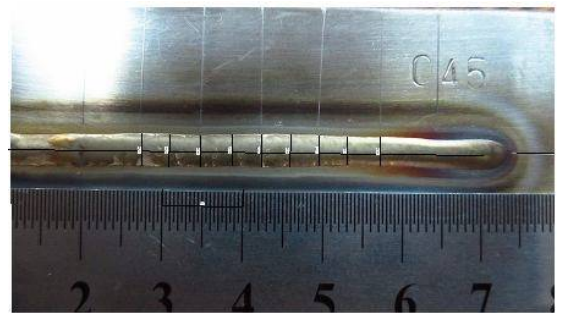
б

$I_{CB} = 105A, V_{CB} = 15M/ГОД, l_{МП} = 3 \text{ мм}$



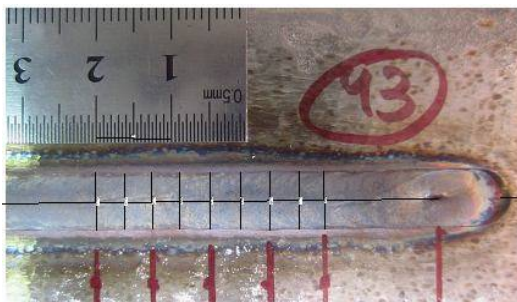
в

$I_{CB} = 115A, V_{CB} = 15M/ГОД, l_{МП} = 3 \text{ мм}$



г

$I_{CB} = 115A, V_{CB} = 15M/ГОД, l_{МП} = 3 \text{ мм}$



д

$I_{CB} = 210A, V_{CB} = 18M/ГОД, l_{МП} = 3 \text{ мм}$



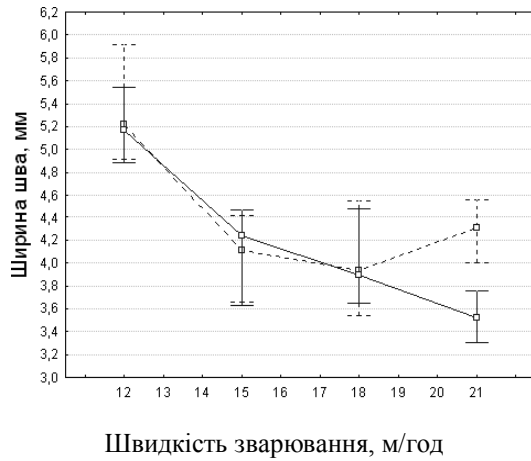
е

$I_{CB} = 210A, V_{CB} = 18M/ГОД, l_{МП} = 3 \text{ мм}$

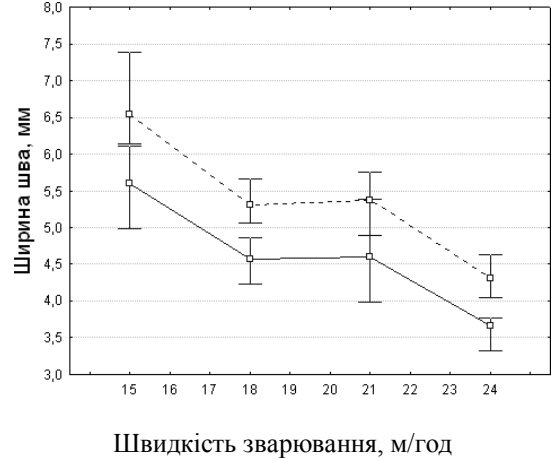
Рисунок 2.6 – Визначення розмірів шви і ширини зворотного валика для зразків товщиною: 1,5 мм (а, б); 2,0 мм (в, г) і 3,0 мм (д, е)

Вимірні значення параметрів зварного шва оброблялися в програмі STATISTICA [80]. В якості середнього положення вибірки використовувалася медіана з квантиль 25% (Q25) і 75% (Q75). Довірчий інтервал експериментальних даних - 0,95. Залежності параметрів зварних швів від швидкості зварювання представлені на рис. 2.7 - 2.12. Суцільними лініями

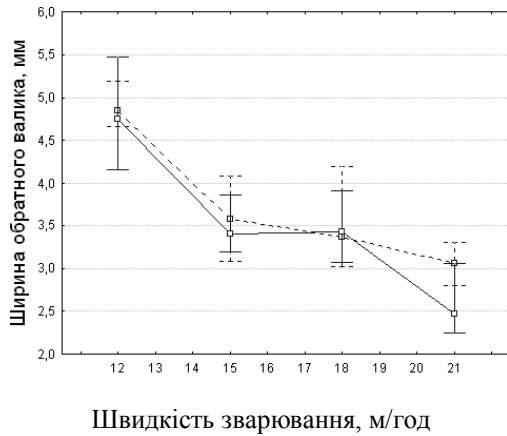
показані режими зварювання при довжині міжелектродного проміжку  $l_{МП} = 3$  мм, пунктирними – 2 мм.



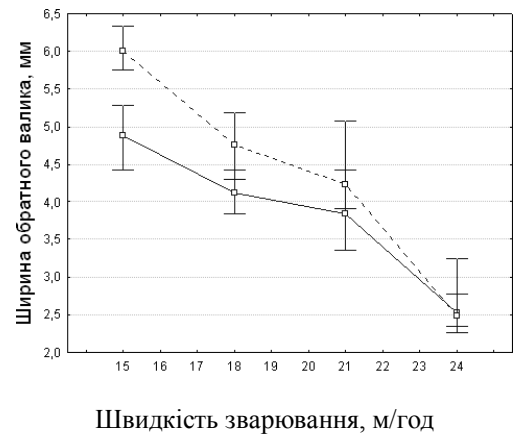
а



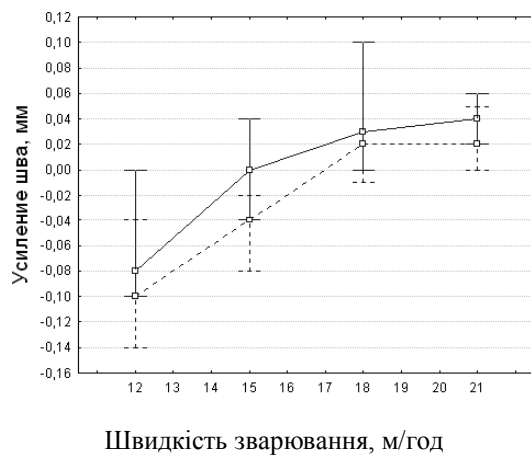
б



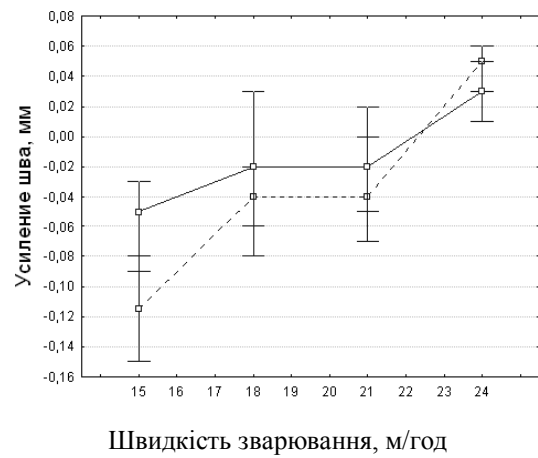
в



г

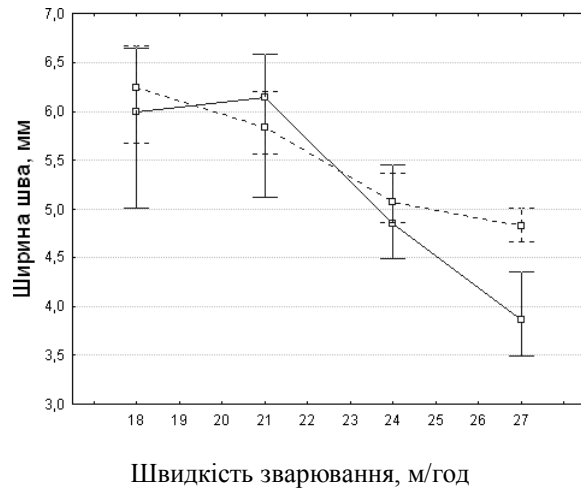


д

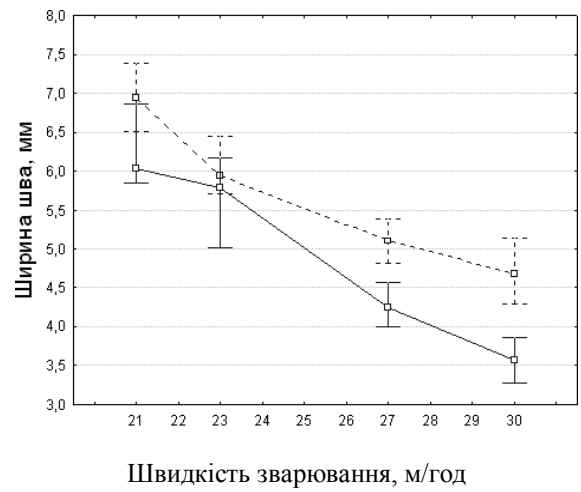


е

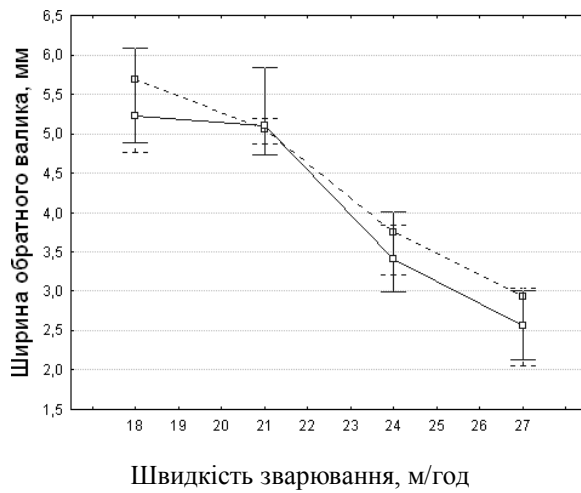
Рисунок 2.7 – Залежність параметрів зварного шва від швидкості зварювання для товщини металу 1,5 мм і сили струму 90А (а, в, д) і 105А (б, г, е)



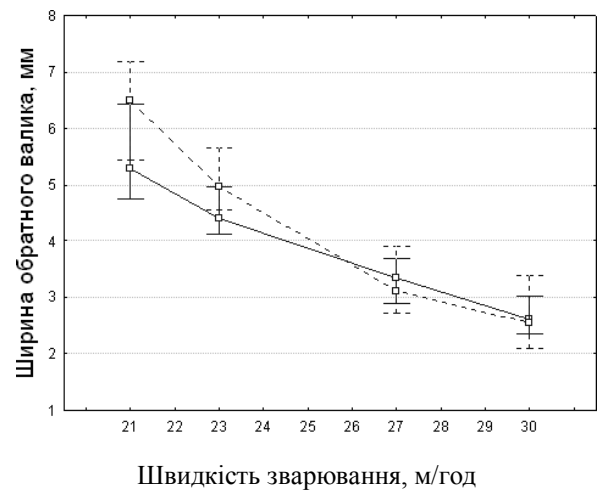
а



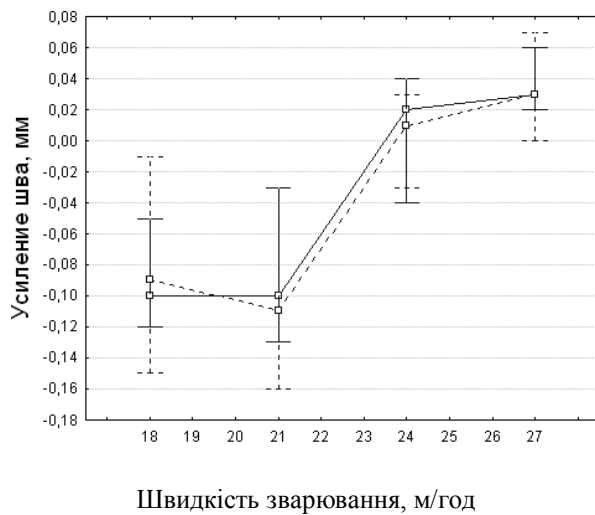
б



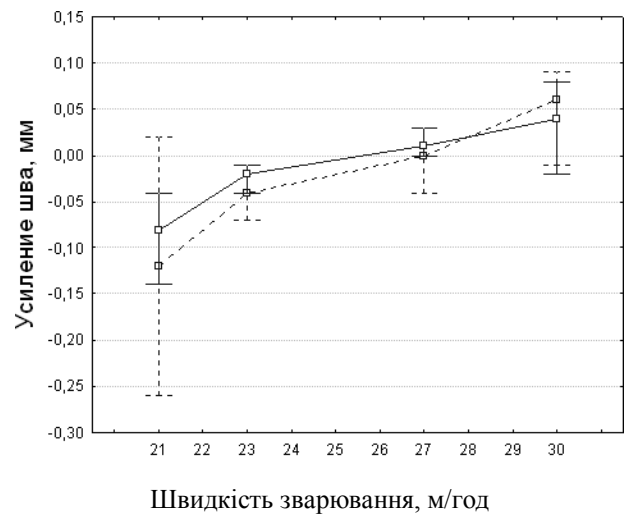
в



г



д



е

Рисунок 2.8 – Залежність параметрів зварного шва від швидкості зварювання для товщини металу 1,5 мм і сили струму 115А (а, в, д) і 125А (б, г, е)

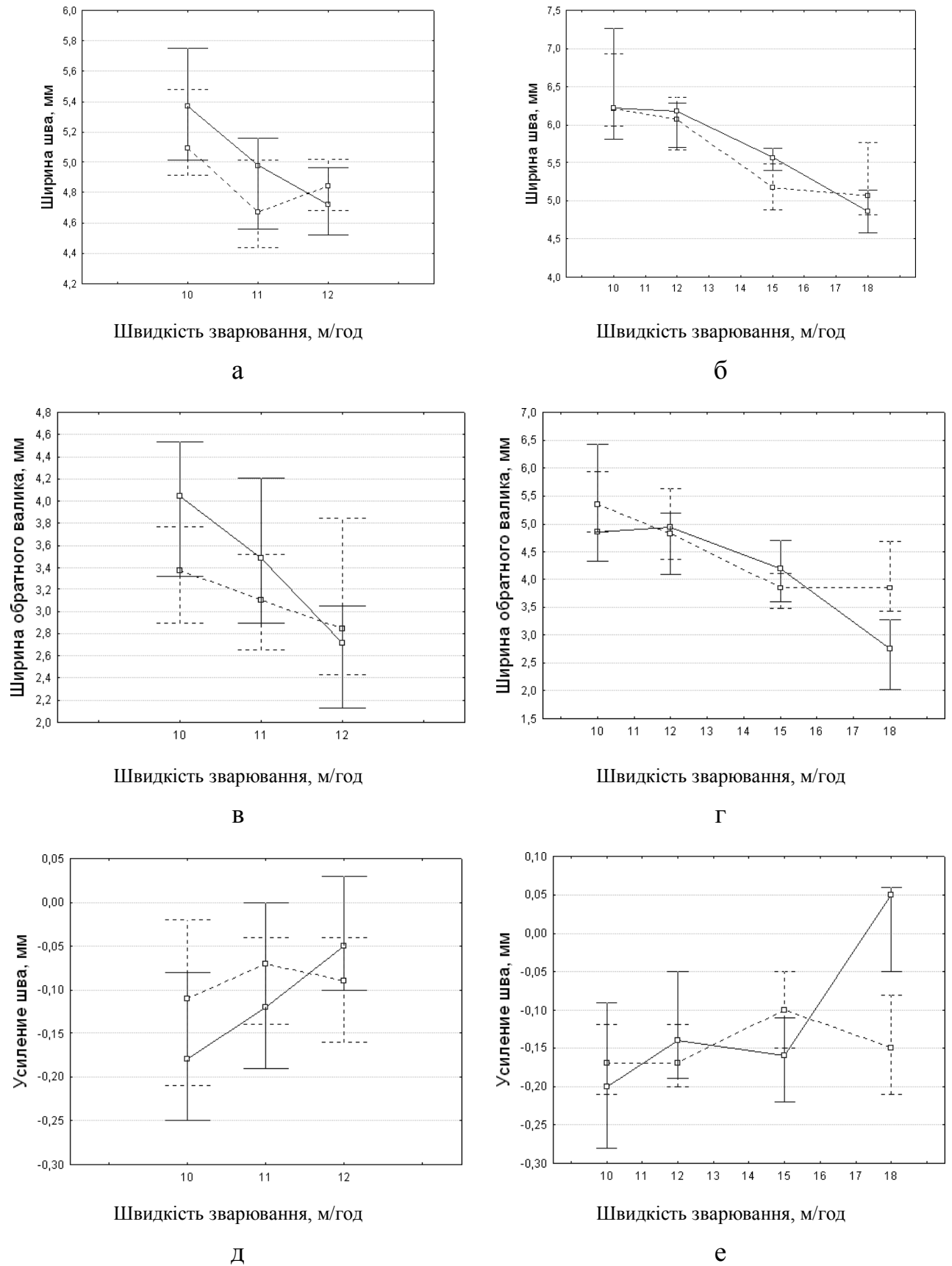


Рисунок 2.9 – Залежність параметрів зварного шва від швидкості зварювання для товщини металу 2,0 мм і сили струму 90А (а, в, д) і 115А (б, г, е)



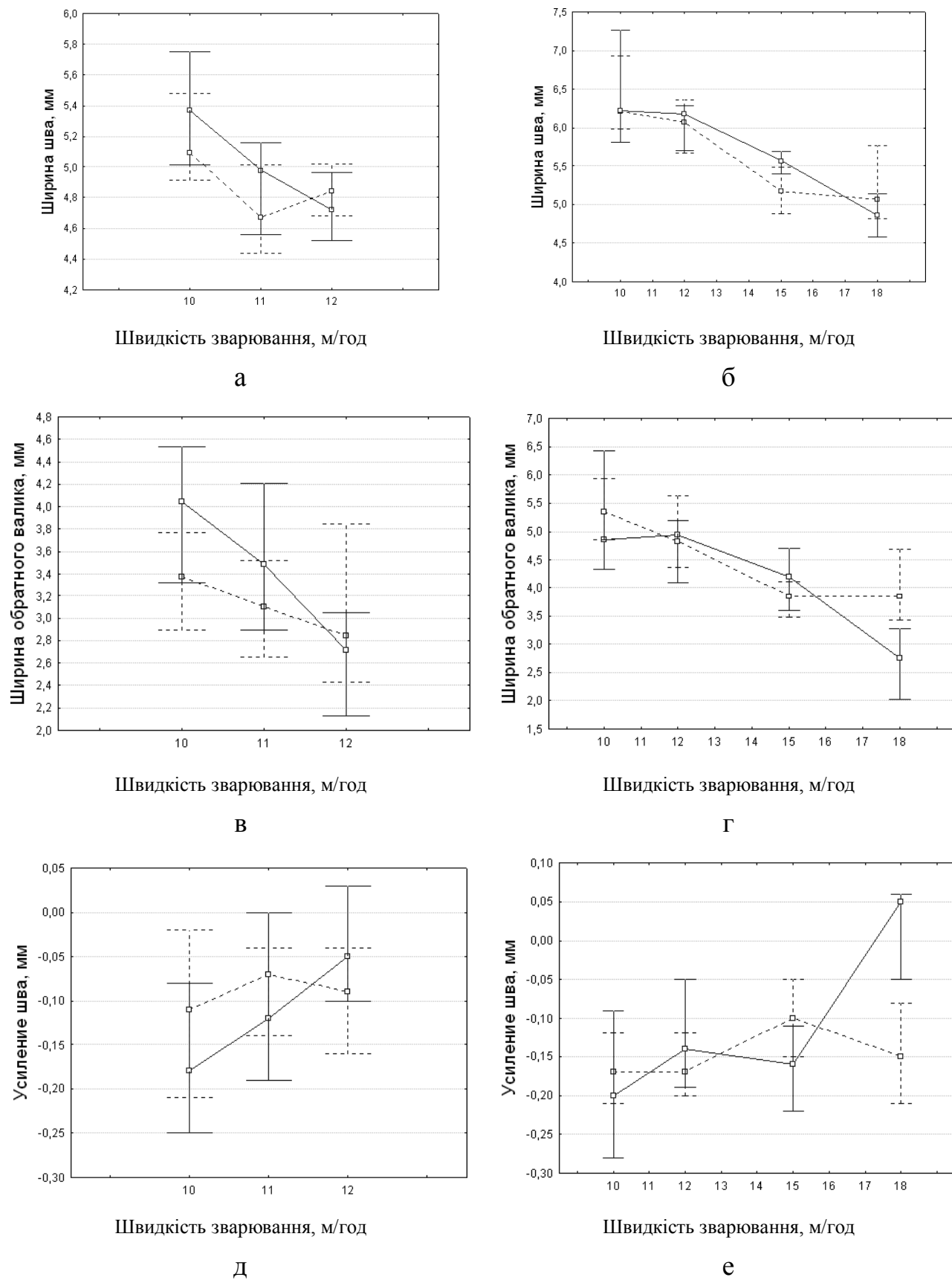
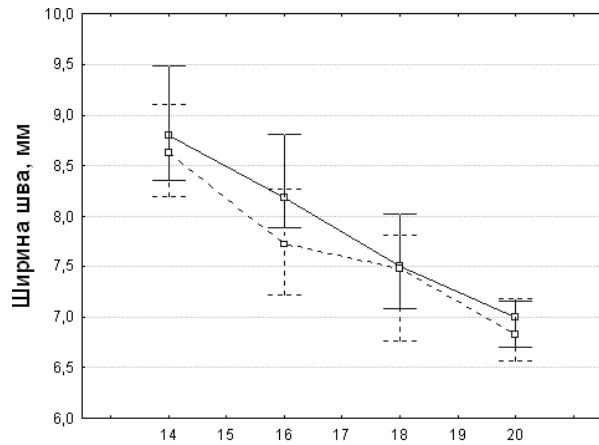
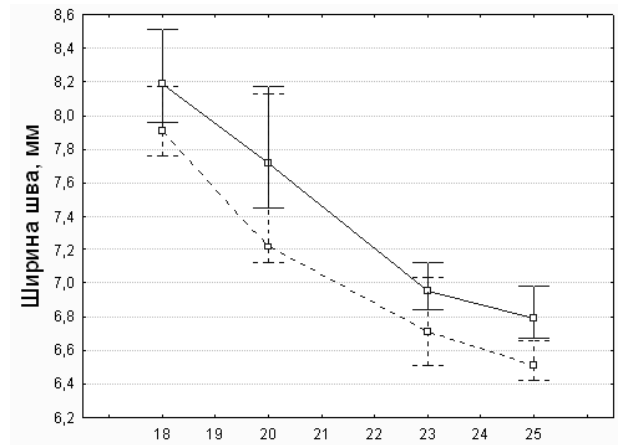


Рисунок 2.10 – Залежність параметрів зварного шва від швидкості зварювання для товщини металу 2,0 мм і сили струму 140А (а, в, д) і 160А (б, г, е)



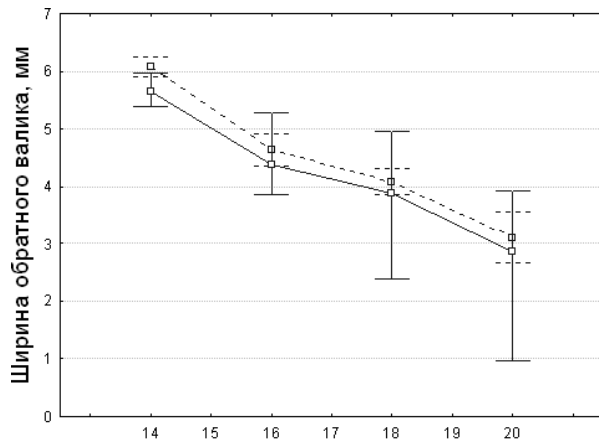
Швидкість зварювання, м/год

а



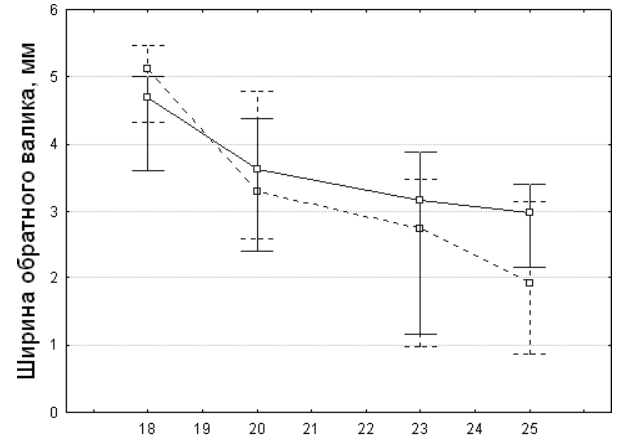
Швидкість зварювання, м/год

б



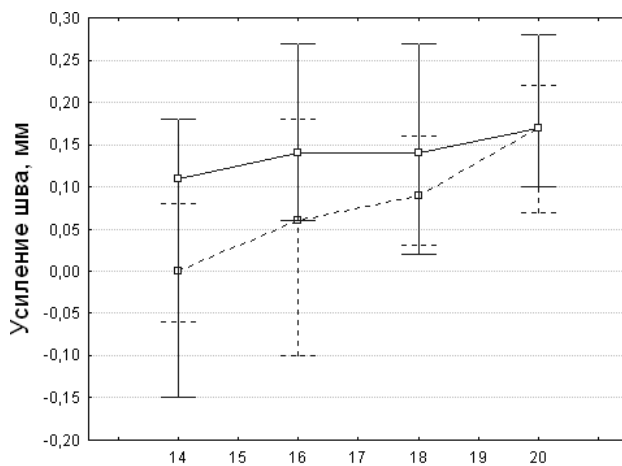
Швидкість зварювання, м/год

в



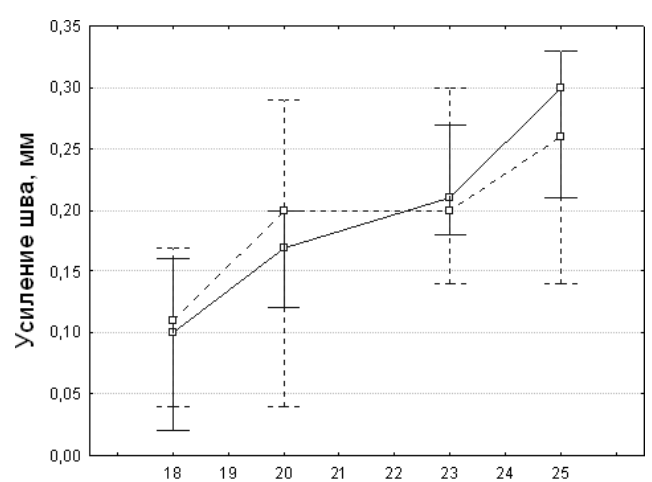
Швидкість зварювання, м/год

г



Швидкість зварювання, м/год

д



Швидкість зварювання, м/год

е

Рисунок 2.11 – Залежність параметрів зварного шва від швидкості зварювання для товщини металу 3,0 мм і сили струму 170А (а, в, д) і 190А (б, г, е)

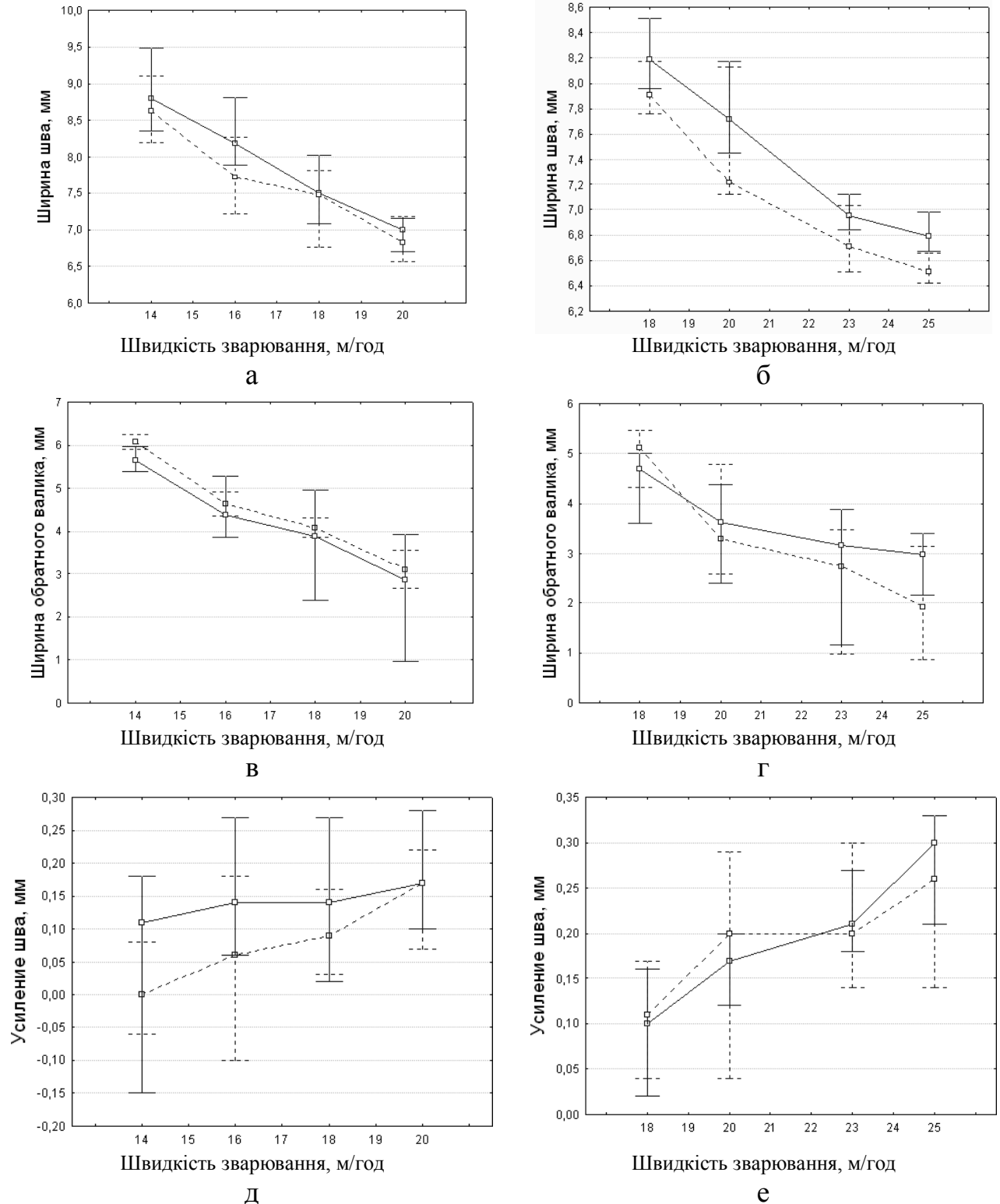


Рисунок 2.12 – Залежність параметрів зварного шва від швидкості зварювання для товщини металу 3,0 мм і сили струму 210А (а, в, д) і 225А (б, г, е)

## 2.5. Обробка експериментальних даних

В результаті проведених експериментів було виявлено, що залежність ширини зворотного валика шва від погонної енергії зварювання має

приблизно лінійний характер. Використовуючи лінійну апроксимацію в середовищі пакету MathCad [9] за методом найменших квадратів, отримали графіки, що ілюструють цю залежність (див. рис. 2.13).

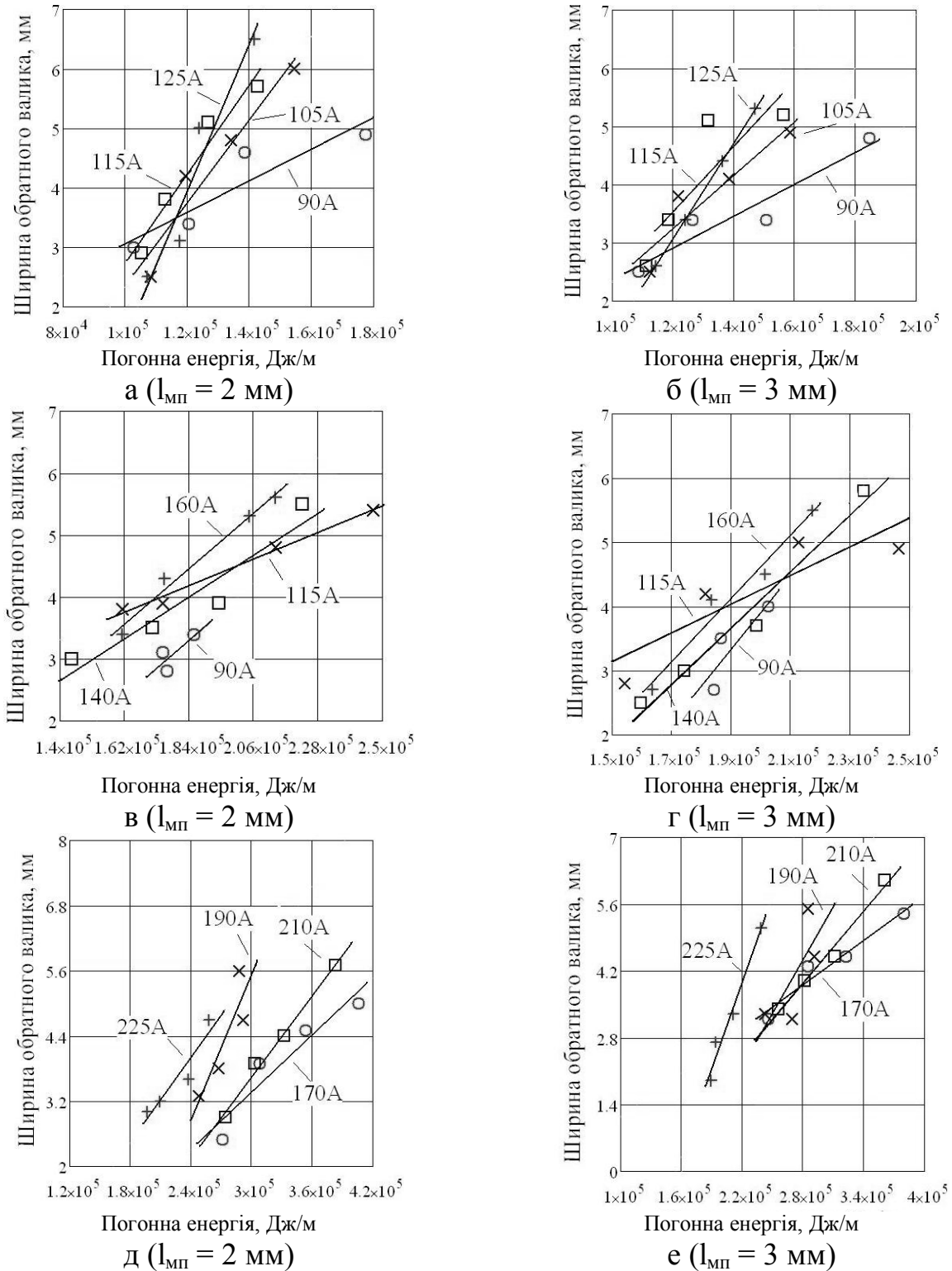


Рисунок 2.13 – Залежність ширини зворотного валика від погонної енергії при зварюванні для товщини металу 1,5 мм (а, б); 2,0 мм (в, г) і 3,0 мм (д, е)

Готові формули для обчислення ширини зворотного валика шва в залежності від введеної погонної енергії представлені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Визначення ширини зворотного валика шва за допомогою кусочно- лінійної апроксимації результатів експериментів

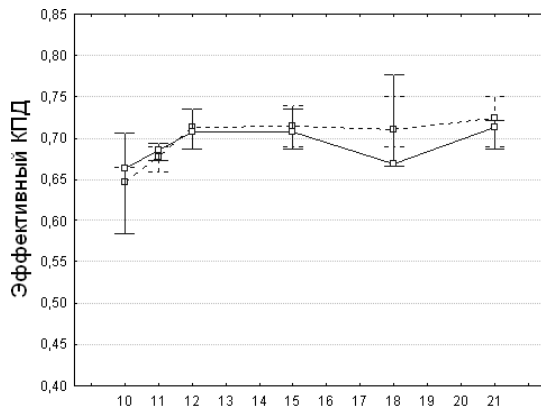
Товщина металу, мм	Сила струму $I_{св}$ , А	Діапазон швидкостей зварювання $V_{св}$ , м/год	Ширина зворотного валика ( $q_n$ , Дж/м), $e_{11}$ , мм	
			$l_{мп}=2$ мм	$l_{мп}=3$ мм
1,5	90	12-21	$e_{11}=0,397+2,656 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-0,398+2,752 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
	105	15-24	$e_{11}=-4,674+7,013 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-2,272+4,594 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
	115	18-27	$e_{11}=-4,765+7,5 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-3,22+5,633 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
	125	21-30	$e_{11}=-10,781+1,228 \cdot 10^{-4} \cdot q_n$	$e_{11}=-6,826+8,248 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
2,0	90	10-12	$e_{11}=-4,354+4,162 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-7,559+5,735 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
	115	10-18	$e_{11}=-0,57+1,96 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-0,241+2,248 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
	140	16-25	$e_{11}=-1,646+3,069 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-4,651+4,381 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
	160	18-26	$e_{11}=-3,015+4,061 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-5,237+4,930 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
3,0	170	10-16	$e_{11}=-0,396+1,54 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-1,915+1,76 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
	190	12-18	$e_{11}=-5,894+3,684 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-7,822+4,451 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
	210	14-20	$e_{11}=-3,177+2,538 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-3,829+2,491 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$
	225	18-25	$e_{11}=-9,343+6,044 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$	$e_{11}=-2,274+2,618 \cdot 10^{-5} \cdot q_n$

Величина  $e_{11}$  залежить від умов контакту сталевого зразка і ширини канавки в мідній підкладці. Для врахування ступеня впливу кожного з цих параметрів на ширину зворотного валика був введений поправочний коефіцієнт (див. п. 3.8).

## 2.6 Визначення ефективного ККД нагрівання

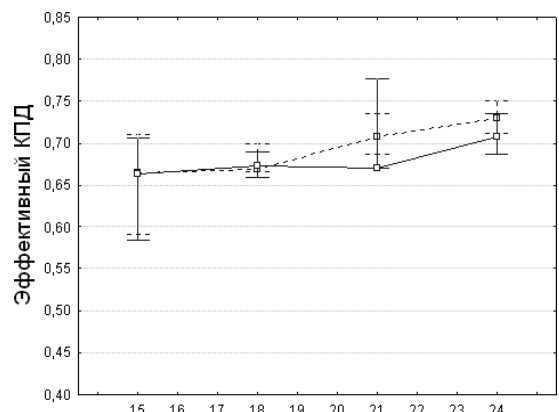
Визначення ефективного ККД зварювальної дуги здійснювалося за допомогою методу калориметрування в ємності з водою. У ємність наливалася рідина об'ємом 100 мл, який визначався за допомогою вимірювальної мензурки з ціною поділки 1 мл. Після чого відбувалося вимір температури відстояною

рідини.



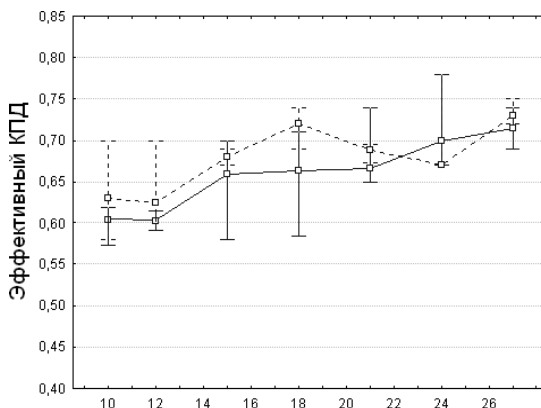
Швидкість зварювання, м/год

а ( $I_{св} = 90А$ )



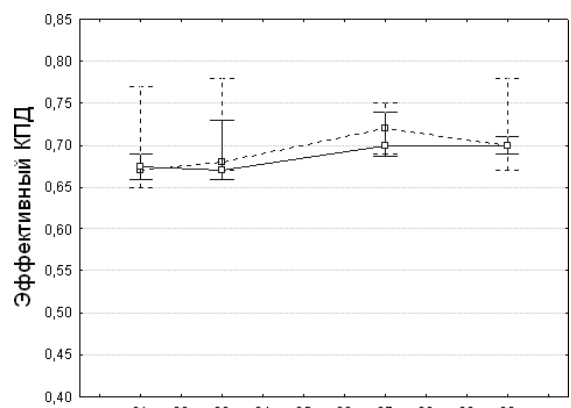
Швидкість зварювання, м/год

б ( $I_{св} = 105А$ )



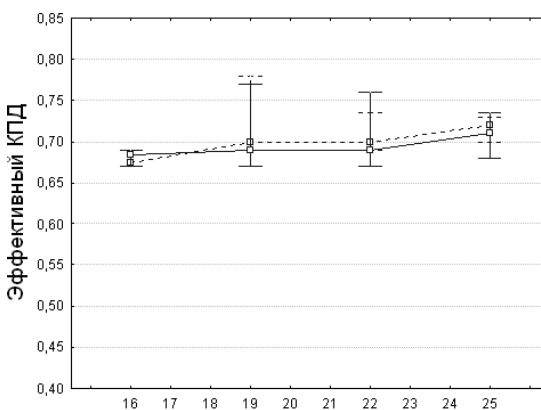
Швидкість зварювання, м/год

в ( $I_{св} = 115А$ )



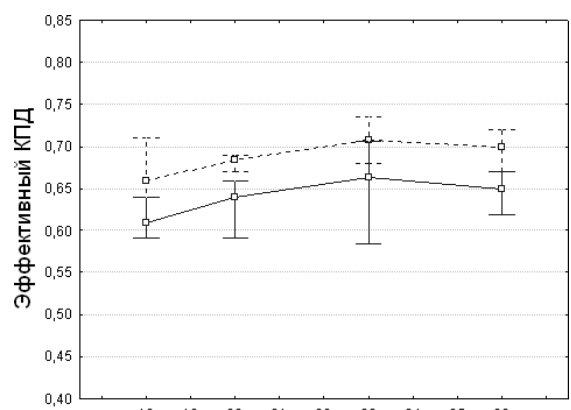
Швидкість зварювання, м/год

г ( $I_{св} = 125А$ )



Швидкість зварювання, м/год

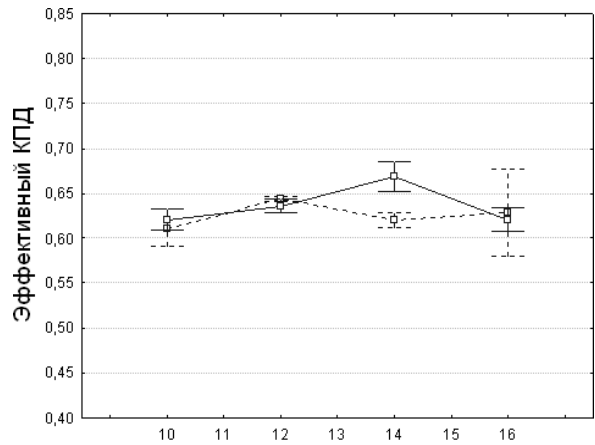
д ( $I_{св} = 140А$ )



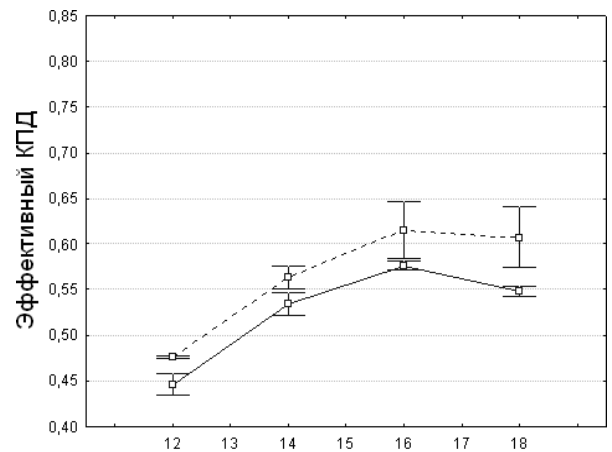
Швидкість зварювання, м/год

е ( $I_{св} = 160А$ )

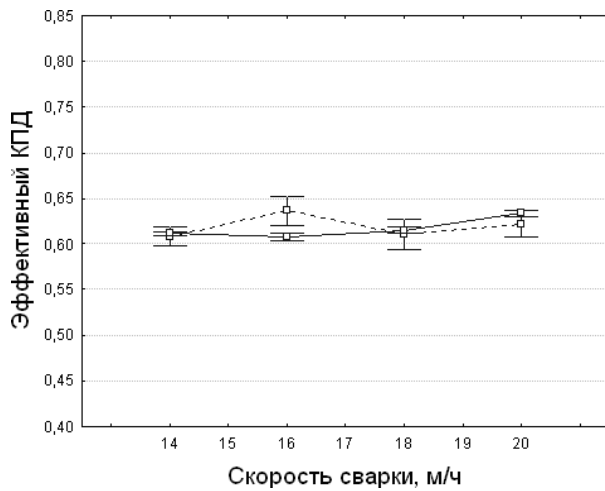
Рисунок 2.14 – Залежність ефективного ККД зварювальної дуги від швидкості зварювання для струмів  $I_{св} = 90А; 105А; 115А; 125А; 140А$  і  $160А$



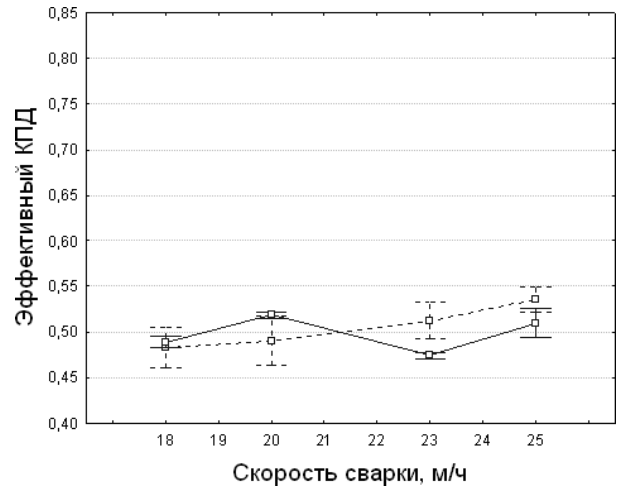
Швидкість зварювання, м/год

а (I<sub>св</sub> = 170А)

Швидкість зварювання, м/год

б (I<sub>св</sub> = 190А)

Швидкість зварювання, м/год

в (I<sub>св</sub> = 210А)

Швидкість зварювання, м/год

г (I<sub>св</sub> = 225А)

Рисунок 2.15 – Залежність ефективного ККД зварювальної дуги від швидкості зварювання для струмів I<sub>св</sub> = 170А; 190А; 210А і 225А

Зварювання проводили на теплоізолированній підставці без притискачів на всіх режимах зварювання, що забезпечують отримання зварного шва по ГОСТ 14771-76 [29, 30] (див. п. 2.4). Після зварювання зразок містився в ємність з водою і вироблялося повторне вимірювання температури, до якої нагрілася вода. На кожному режимі зварювання проведено 3 - 6 повторів. Ефективний ККД зварювальної дуги визначали за формулою [18]:

$$\eta = \frac{mc\Delta T}{UIt_{зв}}, \quad (2.1)$$

де  $c$  – питома теплоємність води, Дж/(кг·К);

$m$  – маса води, кг;

$\Delta T$  – різниця між виміряними значеннями температури води до і після зварювання, °С.

Графіки залежності ефективного ККД зварювальної дуги від швидкості зварювання представлені на рис. 2.14 і 2.15. Виміряні значення ефективного ККД оброблялися в програмі STATISTICA. В якості середнього положення вибірки використовувалась медіана з квантилем 25% (Q25) і 75% (Q75). Довірчий інтервал експериментальних даних визначався з рівнем надійності 0,95. Суцільними лініями показані режими зварювання при довжині міжелектродного проміжку  $l_{мп} = 3$  мм, пунктирними – 2 мм.

Результати статистичної обробки вимірянних параметрів зварних швів послужили вихідними даними для вибору величини експериментальних коефіцієнтів чисельної моделі теплопередачі при АрДЗ на мідній підкладці.

## **2.7 Оцінка впливу розташування притискачів від осі зварного шва на ширину шва стикових з'єднань**

В ході досліджень по визначенню впливу розташування притискачів щодо осі шва проводили зварювання на фіксованих режимах і змінювали відстань від вісі шва до місця докладання тиску притисками. Зразки для АрДЗ і встановлювали в пристосування пневмошлангового типу з розташуванням стику по осі канавки в підкладці і включали компресор, що нагнітає повітря в пневмосистему, що здійснює поджатие притискачів.

Після закріплення зразків на стенд встановлювалася пальник з електродом, ходовим гвинтом регулювався міжелектродний проміжок 3 мм і зразки знежирюємо. Далі виставлялася швидкість переміщення головки і проводилася зварювання при фіксованому струмі 115А на товщині матеріалу



2,0 мм. Відстань від вісі шва до місця докладання притиску становило  $a = 6$  і 8 мм. Сварка проводилася на декількох значеннях швидкостей, що забезпечують отримання зварного шва з розмірами по ГОСТ 14771-76 [141] для заданої величини сили струму. На кожному режимі було виконано по 3 ідентичні зварювальні операції.

Виміряні значення параметрів зварного шва оброблялися статистично в програмі STATISTICA. В якості середнього положення вибірки використовувалася медіана з Квантиль 25% (Q25) і 75% (Q75). Довірчий інтервал експериментальних даних - 0,95. Розміри зварних швів вимірювалися в програмі КОМПАС 3D по тій же схемі, що і в п. 2.4.

Залежності параметра зварного шва від швидкості зварювання представлені на рис. 2.16.

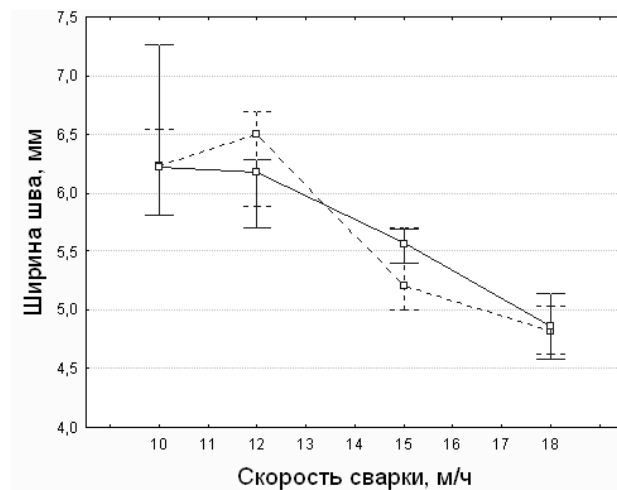


Рисунок 2.16 – Залежність ширини шва від швидкості зварювання для притискачів, розташованих від вісі шва на відстані  $a = 6$  мм (пунктирна лінія) і 8 мм (основна)

З аналізу даних, наведених на рис. 2.16, видно, що розташування притискачів зварювальної оснастки (на відстані від 6 мм і більше від вісі зварного шва до місця контакту притискача і пластини) практично не впливає на ширину зварного шва при зварюванні тонколистових корозійностійких сталей аустенітного класу в досліджуваних діапазонах варійованих параметрів режиму зварювання.

## 2.8. Оцінка впливу ширини канавки в мідній підкладці на ширину зворотного валика

Для визначення впливу ширини канавки в мідній підкладці проводили зварювання на зразках товщиною 2,0 мм при фіксованому значенні струму 115 А. Анодом служила мідна підкладка з канавкою глибиною 0,5 мм і шириною 6 і 8 мм. Відстань від вісі шва до місця докладання притиску становило 8 мм.

Після закріплення зразків на стенд встановлювалася пальник з електродом, ходовим гвинтом регулювався міжелектродний проміжок 3 мм і зразки знежирюємо. Сварка проводилася на декількох значеннях швидкостей, що забезпечують отримання зварного шва з розмірами по ГОСТ 14771-76 [141] для заданої величини сили струму. На кожному режимі було виконано по 3 ідентичні зварювальні операції.

Виміряні значення параметрів зварного шва оброблялися статистично в програмі STATISTICA. В якості середнього положення вибірки використовувалася медіана з Квантиль 25% (Q25) і 75% (Q75). Довірчий інтервал експериментальних даних - 0,95. Ширина зворотного валика визначалася при обробці фотографій в програмі КОМПАС 3D (див. П. 2.4). На рис. 2.17 показаний графік залежності ширини зворотного валика від швидкості зварювання для різних значень ширини канавки в підкладці.

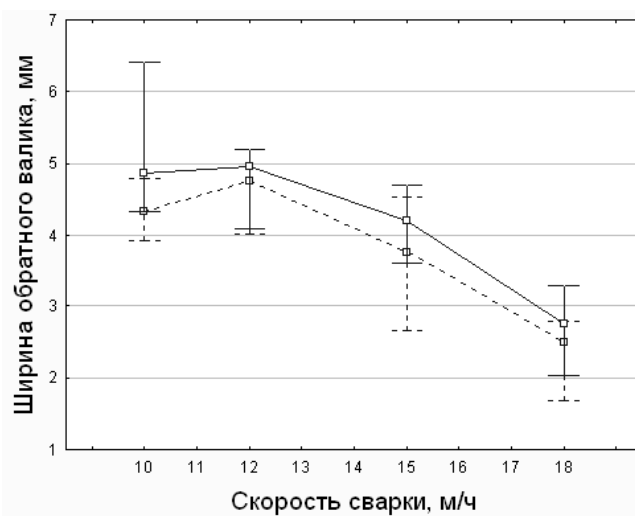


Рисунок 2.17 – Залежність ширини зворотного валика від швидкості зварювання для канавки шириною 8 мм (суцільна лінія) та 6 мм (пунктирна лінія)

З аналізу даних, наведених на рис. 2.17, випливає, що ширина мідної підкладки суттєво впливає на ширину зворотного валика за рахунок тепловіддачі з більшої площі контакту сталевोї та мідної пластин. При цьому ширина зворотного валика при зварюванні на підкладці з канавкою шириною 6 мм менше в середньому на 5 - 8%, ніж при зварюванні на підкладці з канавкою шириною 8 мм.

## **2.9. Оцінка впливу шорсткості сталевого зразка на ширину зворотного валика**

Для дослідження впливу шорсткостей сталевого зразка і мідної підкладки на геометрію зварного шва, їх ретельно зачищали наждачним папером перед зварюванням. Після чого вимірювали середню величину мікронерівностей контактируємих поверхонь приладом TR 100.

Після закріплення зразків на стенд встановлювалася пальник з електродом, ходовим гвинтом регулювався міжелектродний проміжок 3 мм і зразки знежирюємо. Зварювання проводили на сталевих зразках товщиною 2 мм при фіксованому значенні струму 115 А на крайніх швидкостях діапазону досліджуваних режимів зварювання (див. п. 2.4). На кожному режимі було виконано по 3 ідентичні зварювальні операції.

Виміряні значення параметрів зварного шва оброблялися статистично в програмі STATISTICA. В якості середнього положення вибірки використовувалася медіана з Квантиль 25% (Q25) і 75% (Q75). Довірчий інтервал експериментальних даних - 0,95. Розміри зварних швів вимірювалися в програмі КОМПАС 3D. На рис. 2.18 показана залежність ширини зворотного валика від висоти мікронерівностей шорсткості сталевого зразка.

Аналіз даних, наведених на рис. 2.18, показує, що із збільшенням шорсткості сталевого зразка з  $Ra \approx 0,63$  мкм до  $Ra \approx 1,25$  мкм спостерігається збільшення ширини зворотного валика на 16,2% при максимальній введеній погонній енергії для заданого значення сили струму. Із зменшенням погонної

енергії вплив шорсткості на ширину зворотного валика знижується. При погонній енергії  $q_{\text{п}} = 154$  кДж/м в досліджуваних діапазонах варіювання режимів зварювання розміри мікронерівностей сталевго зразка практично не впливають на величину зворотного валика, що пов'язано, перш за все, з тим, що величини тепловіддачі в мідну підкладку приблизно рівні, на відміну від режиму зварювання з  $q_{\text{п}} = 246$  кДж / м, де тепловіддача для випадку з шорсткістю  $Ra \approx 0,63$  мкм більш істотна.

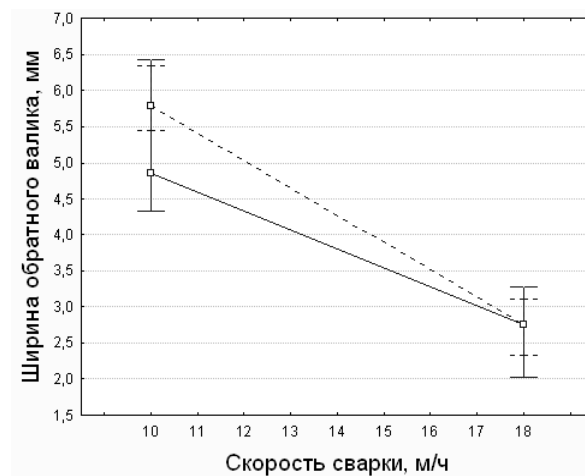


Рисунок 2.18 – Залежність ширини зворотного валика від швидкості зварювання під час зварювання на мідній підкладці з шорсткістю сталевго зразка  $Ra \approx 0,63$  мкм (суцільна лінія) і  $Ra \approx 1,25$  мкм (пунктирна лінія)

### Висновки по розділу 2

1. Визначено діапазони режимів АрДЗ зварних швів стикових з'єднань з тонколистової корозійностійкої сталі на мідній підкладці, що забезпечують формування зварного шва з розмірами, що відповідають вимогам ГОСТ 14771-76 «Дугове зварювання у захисних газах. З'єднання зварні. Основні типи, конструктивні елементи і розміри». Для товщини листів  $\delta = 1,5$  мм вони склали:  $I_{\text{св}} = 90-125\text{А}$  при  $V_{\text{св}} = 12-30$  м/год; для  $\delta = 2,0$  мм:  $I_{\text{св}} = 90-160\text{А}$  при  $V_{\text{св}} = 10-26$  м/год; для  $\delta = 3,0$  мм:  $I_{\text{св}} = 170-225\text{А}$  при  $V_{\text{св}} = 10-25$  м/год.
2. Отримано кількісні взаємозв'язки параметрів режиму АрДЗ стикових з'єднань на мідній підкладці з шириною зварного шва на лицьовій і зворотній стороні при зварюванні тонколистової корозійностійкої сталі

аустенитного класу товщиною від 1,5 до 3,0 мм.

3. Експериментально підтверджено, що розташування притискачів зварювальної оснастки на відстані 6 мм і більше від осі зварного шва до місця контакту притиску і зварної пластини практично не впливає на ширину зварного шва при автоматичній АрДЗ без присадного дроту тонколистових корозійно-стійких сталей аустенітного класу в досліджуваних областях варіювання параметрів режиму зварювання.

4. Зі збільшенням розмірів мікронерівностей сталевого зразка з  $Ra \approx 0,63$  мкм до 1,25 мкм спостерігається збільшення ширини зворотного валика на 10,4 - 16,2 % для швидкості зварювання 10 - 16 м / год, при цьому при подальшому збільшенні швидкості різниця між величинами ширини зворотного валика знижується і при швидкостях 26-30 м / год не перевищує похибки експерименту.

5. Експериментально встановлено, що при автоматичній АрДЗ тонколистової корозійностійкої сталі аустенітного класу на мідній підкладці ширина зворотного валика при зварюванні на підкладці з канавкою шириною 6 мм менше в середньому на 5-8%, ніж при зварюванні на підкладці з канавкою шириною 8 мм.

### **3. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ СТИКОВОГО ШВА ПРИ АРГОНОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННІ ТОНКОЛИСТОВИХ КОРОЗІЙНО-СТІЙКИХ СТАЛЕЙ НА МІДНІЙ ПІДКЛАДЦІ**

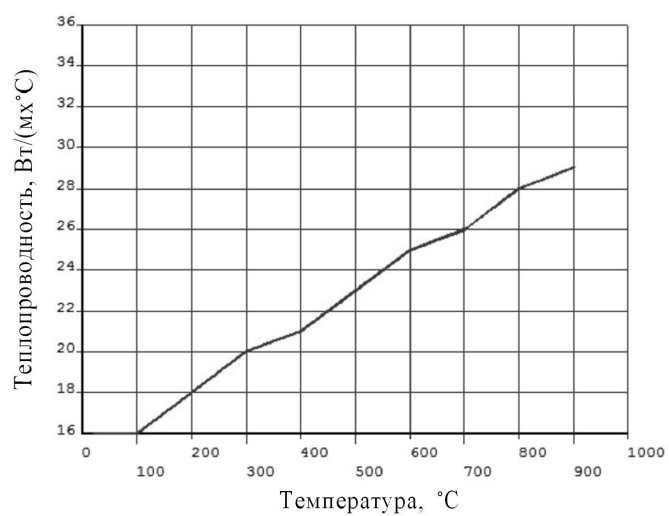
#### **3.1. Опис чисельної моделі теплопередачі при аргонодуговому зварюванні на мідній підкладці**

Для опису температурного поля  $T(x, y, z, t)$  в плоских зразках використовували диференціальне нелінійне рівняння теплопровідності у класичній формі [12].

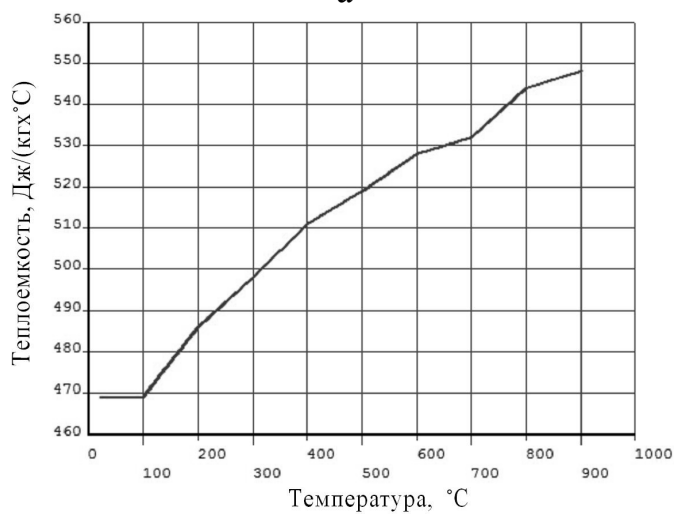
Залежність теплофізичних властивостей стали від температури  $\rho(T)$ ,  $\lambda(T)$ ,  $c(T)$  приймали згідно з літературними даними для стали 12X18H1T [10], міді М1 і латуні Л80 [7]. На рис. 3.1 показана залежність теплофізичних властивостей від температури для сталі 12X18H10T.

Температурне поле визначалося чисельним рішенням задачі нелінійної теплопередачі, візуалізація розрахунку температурних полів якої наведена на рис. 3.6. В результаті літературного огляду з'ясували, що для опису геометрії зварного шва при АрДЗ на підкладці найдоцільніше використовувати комбінацію нормально-розподіленого і зосередженого лінійного джерел нагріву (див. п. 1.4.1).

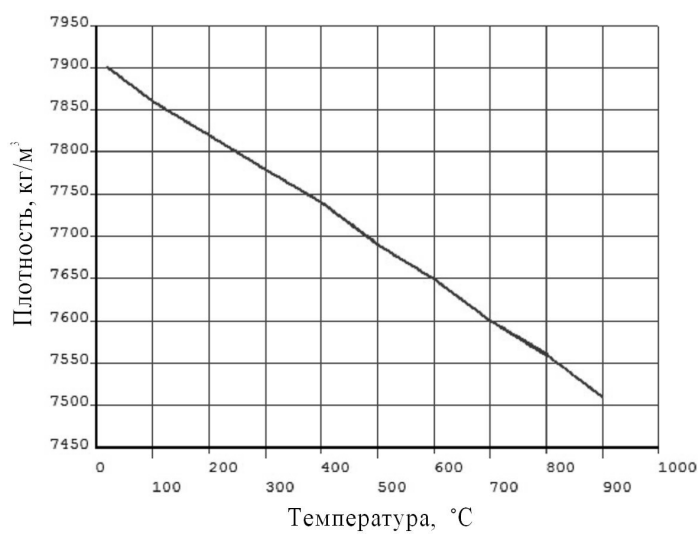
Потужність джерел нагріву і коефіцієнт зосередженості нормально-кругового розподіленого джерела підбиралися відповідно до методиками розрахунку плоских температурних полів, запропонованих в статтях [4, 13], згідно з якими для опису геометрії зварного шва використовувалася схема комбінації джерел нагріву - нормально-кругового розподіленого і лінійного зосередженого, при цьому величина розподілу ефективної потужності між джерелами  $q_{\text{НКР}} / q_{\text{ЛН}}$  приймалася 0,7 / 0,3 - 0,8 / 0,2 і залежала тільки від ізотерми плавлення комб лося джерела нагріву, а не від товщини зварних зразків, таким чином не враховуючи тиску зварювальної дуги зі збільшенням погонної енергії при зварюванні [4].



а



б



в

Рисунок 3.1 – Залежність теплопровідності (а), теплоємності (б) і щільності (в) сталі 12Х18Н10Т від температури

Відповідно до запропонованого алгоритму підбору потужностей джерел нагрівання, спочатку по напівширині зворотного валика підбиралася ефективна потужність лінійного джерела нагріву, після чого - по напівширині зварного шва вибирався коефіцієнт зосередженості нормально-кругового розподіленого джерела нагріву.

На рис. 3.2 показано вплив товщини металу на ширину зворотного валика / ширину зварного шва. Очевидно, що зі збільшенням товщини пластини для отримання зварного шва з розмірами, що відповідають ГОСТ 14771-76 [11], необхідно збільшувати величину зварювального струму, внаслідок чого зростає і вплив тиску дуги на розміри зварювальної ванни. Оскільки тиск дуги впливає на зварювальну ванну навіть на малих зварювальних струмах, при моделюванні геометрії стикового шва рухомим комбінованим джерелом нагрівання цей вплив виражається у вигляді розподілу температур від лінійного джерела.

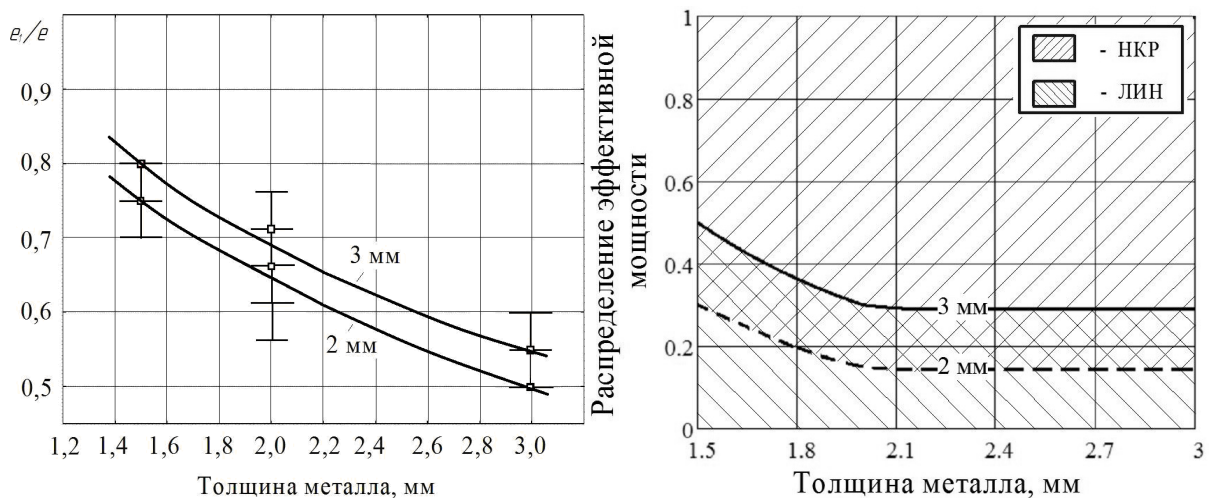


Рисунок 3.2 – Вплив товщини металу на ставлення ширина зворотного валика / ширина зварного шва (а) і розподіл ефективної потужності між двома джерелами нагріву (б): НКР - нормально-кругове джерело, ЛІН – лінійне джерело

Для забезпечення наскрізного проплавлення матеріалу більшої товщини використовують великий зварювальний струм, при якому тиск зварювальної



дуги зростає і при чисельному моделюванні в одних і тих же умовах зварювання призводить до збільшення частки потужності нормально-кругового джерела нагрівання від загальної ефективної потужності, яка представлена на рис. 3.2, б для довжин міжелектродного проміжку  $l_{мп} = 2$  и 3 мм.

В використаній нами розрахунковій схемі для опису параметрів геометрії зварного шва теплова потужність зварювальної дуги для одного з зварних зразків частково вводилася через його бічну поверхню в площині стику, а частково - через верхню поверхню зразка (див. рис. 3.3, а).

Завдання вирішували методом кінцевих елементів в пакеті ANSYS / Multiphysics ver. 14. Для зменшення часу розрахунку геометрії зварного шва по ізотермам плавлення від комбінованих джерел нагрівання і в силу симетричності розв'язуваної задачі щодо осі Oх використовували 3D- модель, що представляє собою 1 зварений зразок. Розрахункова схема і звичайно-елементна модель представлені на рис. 3.3. Довжина розрахункової моделі вибиралася таким чином, щоб розподіл температури по плямі нагріву комбінованого джерела вийшло на квазістаціонарний режим нагріву, і вона складала  $l = 40-50$  мм.

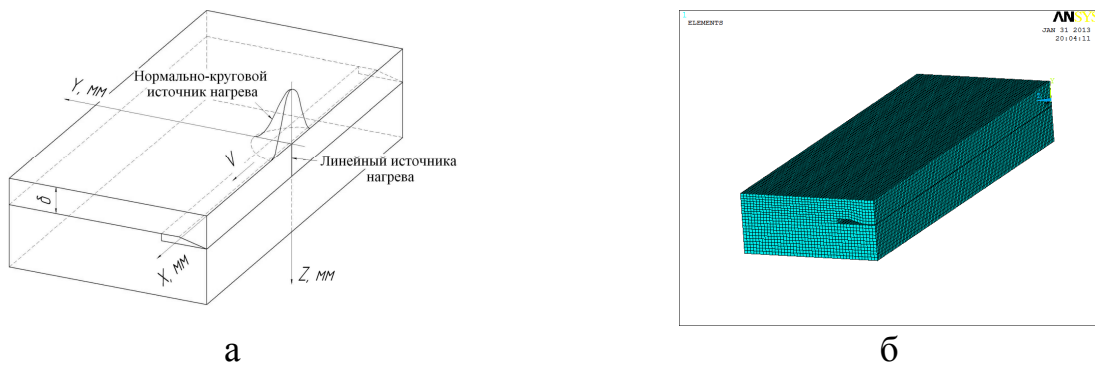


Рисунок 3.3 – Схема додатки джерел нагріву зразка (а) і розрахункова кінцево-елементна модель (б)

Лінійне теплове джерело було представлено як питомий тепловий потік через площину стику зварних зразків (рис. 3.3, а).

Нормально-кругове джерело нагрівання на верхній поверхні зразка

задавалося за методикою [29].

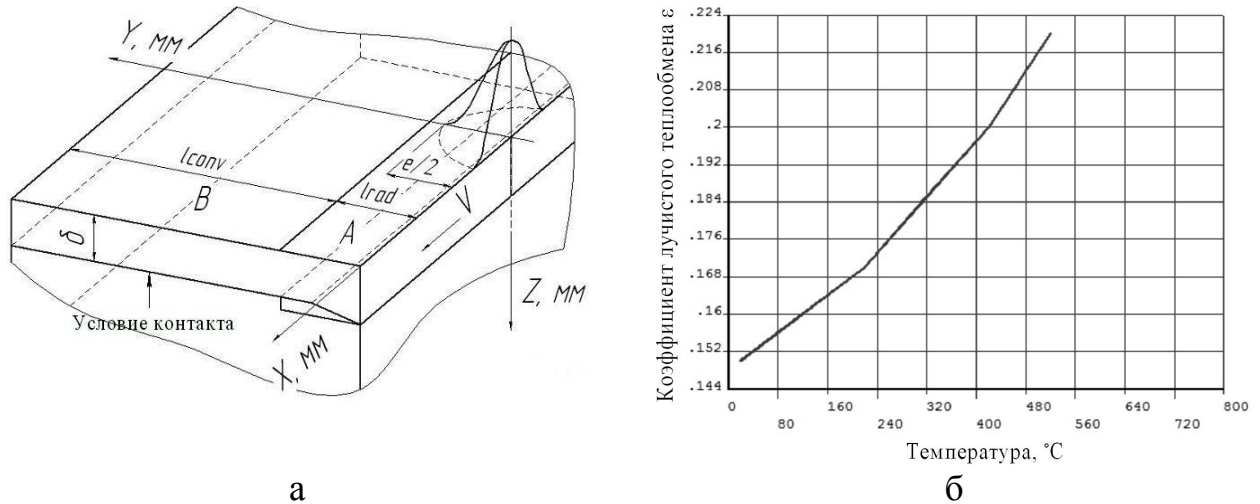


Рисунок 3.4 – Схема розташування поверхонь тепловіддачі на зразку (а) і інтегральний коефіцієнт променистого теплообміну сталі 12X18N10T(б)

Граничні умови тепловіддачі конвекції і випромінювання задавалися з зовнішніх поверхонь, розміри яких задавалися відповідно до роботами [13, 28, 30]. Схема розташування поверхонь тепловіддачі представлена на рис. 3.4, а. Інтегральний коефіцієнт променистого теплообміну, прийнятий згідно роботі [25], представлений на рис. 3.4, б.

Оскільки радіаційне випромінювання впливає на тепловіддачу з поверхні А (див. рис. 3.4, а), воно враховувалося в чисельній моделі за методикою [18].

### 3.2. Граничні умови контакту зварного зразка з підкладкою і притискачами

Методика розрахунку контактної термічної провідності докладно викладена в роботах [7, 16]. Підкладка з формує канавкою виготовлялася з міді, а притиски - з латуні. Граничні умови контакту «Сталевий зразок-мідна покладка» і «сталевий зразок-латунний притискач» розглядалися як сума термічних провідностей повітряного прошарку  $\alpha_{\text{в03}}$  між мікровиступів контактируємих матеріалів і металевого контакту  $\alpha_{\text{М}}$ .

Для обчислення коефіцієнта, що враховує площу фактичного контакту сталевого зразка і мідної підкладки, скористалися виразом, наведеним в довіднику [87].

Для розрахунку  $S_{\phi}$  використовували експериментально вимірний тиск притискачів  $P = 0,6$  МПа і дані по твердості міді М1 і латуні Л80 з довідника [7]. У нашому випадку для контакту «сталевий зразок-мідна покладка» отримали  $S_{\phi}=0,12$ , а для контакту «сталевий зразок-латунний притиск» -  $S_{\phi}=0,11$ . Оскільки ці величини відносно малі, то відповідно до методики [8], зробили висновок, що термічна провідність контакту приблизно може бути розрахована тільки за значенням  $\alpha_{\text{воз}}$ , яка обчислювалася за формулою [18].

Величину микронеровностей поверхні зварного зразка з листової сталі 12Х18Н10Т в стані поставки і мідної підкладки визначали за допомогою портативного вимірювача шорсткості TR 100. Величина микронеровностей  $Ra$  на поверхні сталі склала  $h_{\text{Steel}} = 0,54 - 0,72$  мкм (для розрахунків прийняли 0,66 мкм), на поверхні міді  $h_{\text{Cu}} = 2,1 - 3,61$  мкм (прийняли 2,90 мкм), на поверхні латуні  $h_{\text{лат}} = 5,01 - 9,57$  (прийняли 6,07 мкм). Залежність  $\lambda(T)$  повітря брали за даними роботи [7].

В результаті розрахунків були отримані наступні значення контактної термічної провідності:

-пара «сталевий зразок-мідна покладка»:

$$\alpha_{\text{п}}(T) = 10200 + 32T \quad (3.1)$$

-пара «сталевий зразок-латунний притискач»:

$$\alpha_{\text{п}}(T) = 5400 + 17T \quad (3.2)$$

Контакт в ANSYS / Multiphysics задавався через меню менеджера контакту (Contact Manager), в якому задається контакт між цільовою поверхнею

(Target surface) і контактної (Contact surface). Для контакту «сталевий зразок-мідна покладка» в якості Target surface обрали нижню повнерхню сталевого зразка, а в якості Contact surface - верхню поверхню мідної пластини.

Контактна теплопередача між поверхнями, що контактують розраховувалася за формулою:

$$Q = TCC(T_t - T_c), \quad (3.3)$$

де TCC – коефіцієнт контактного термічного опору,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ ;

$T_t$  та  $T_c$  - температури відповідно в вузлах контакту поверхонь,  $\text{°C}$ .

### **3.3 Верифікація граничних умов контакту зварного зразка з підкладкою і з притискачами**

Сварка проводилася на зразках з корозійностійкої сталі аустенітного класу 12X18Н10Т розмірами 100x50x2 мм на мідній підкладці зварювальному стенді з пневмоприжимом. При зварюванні на всіх режимах використовували вольфрамові електроди WL-20 діаметром 3 мм з кутом заточування 30°, довжина міжелектродного проміжку складала 3 мм і лишалася незмінною.

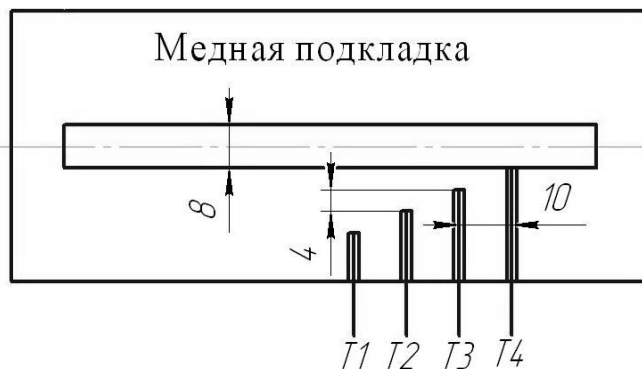
На кожному режимі було виконано по 3 ідентичні зварювальні операції. Результати статистичної обробки виміряних параметрів зварних швів послужили вихідними даними для визначення експериментальних коефіцієнтів в чисельної моделі теплопередачі при АрДЗ на мідній підкладці. Для визначення середнього значення вибірки дослідних даних використовувалась медіана з квантилем 25% (Q25) і 75% (Q75). Довірчий інтервал експериментальних даних визначався з рівнем надійності 0,95. Досліджені режими зварювання і отримані коефіцієнти зосередженості джерела нагрівання  $k$  для уточнення чисельної моделі теплопередачі представлені в табл. 3.1.

Перевірка розрахункової методики визначення провідності теплового контакту сталевого зразка з мідною підкладкою і з латунними притискачами здійснювалася шляхом запису термічних циклів з термопар в мідній підкладці,

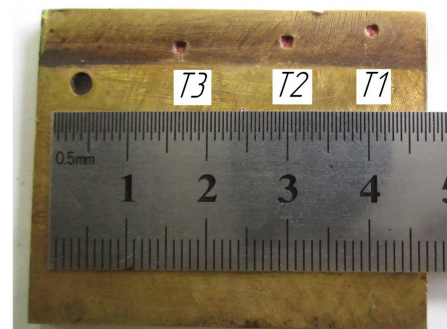
встановлених відповідно до рис. 3.5, і наступним їх порівнянням з термічними циклами вузлів кінцево-елементної сітки на 3D-моделі мідної підкладки при розрахунку контактної теплопередачі. При цьому термопари типу «К» встановлювались у мідну пластину на глибину  $1,5 \pm 0,5$  мм і заливали термостійким герметиком (див. рис. 3.5).

Таблиця 3.1 – Режими зварювання для верифікації моделі і розрахункові значення коефіцієнта  $k$

Сила струму, А	Швидкість зварювання, м/год	Ширина шва, мм	Ширина зворотного валика, мм	Висота зворотного валика, мм	Напруга на дузі, В	Ефективний ККД	Коефіцієнт $k$ , $\text{см}^{-2}$
115	12	6,2	5,0	0,42	10,10	0,61	5,5
115	15	5,6	4,2	0,52	10,27	0,64	8
115	18	4,9	2,8	0,36	10,31	0,65	13



а



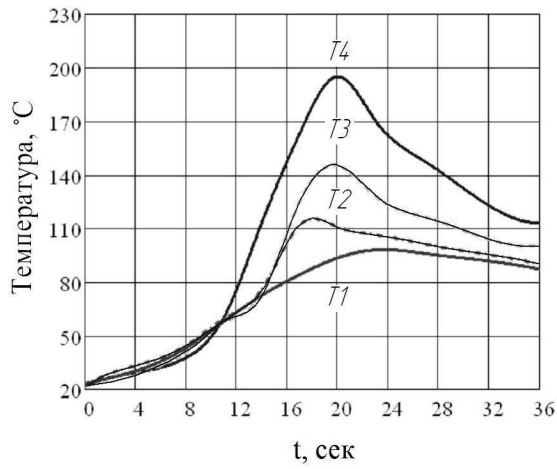
б

Рисунок 3.5 – Схема установки термопар в мідну підкладку (а) і латунний притискач (б)

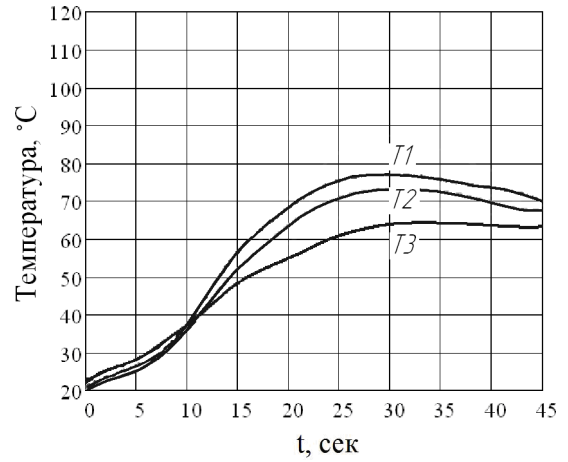
Термічні цикли в процесі зварювання записувалися за допомогою цифрового 4-х каналного вимірювача температури CENTER 309. На рис.3.6 представлені отримані термічні цикли режимів на підкладці і притискаючи, розташованих на відстані 6 мм від осі шва.

Температура в точках T1-T4 на рис. 3.6 представляє собою середнє значення температури за результатами трьох зварювальних експериментів. На рис. 3.7 буквами T1-T4 позначені розташування вузлів кінцево елементної

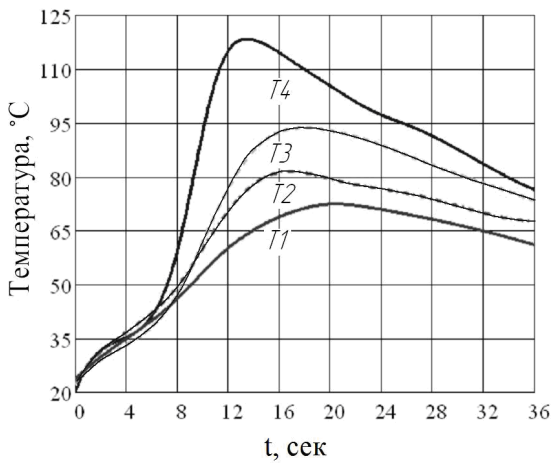
моделі теплопередачі, яким відповідають місця установки терморпар під час запису термічних циклів на підкладці.



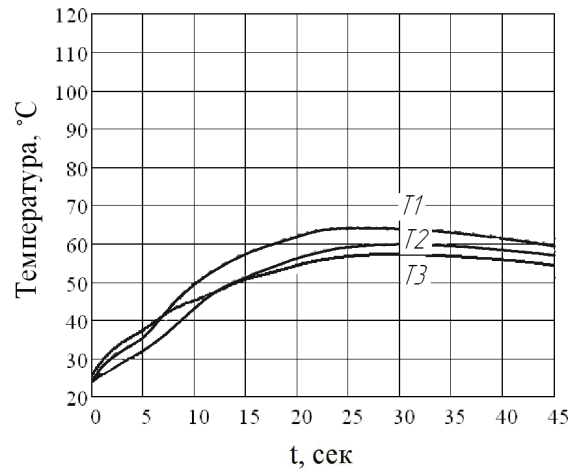
а ( $V_{CB} = 12$  м/год)



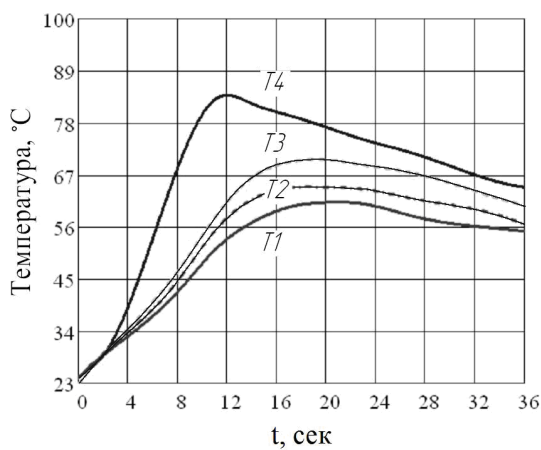
б ( $V_{CB} = 12$  м/год)



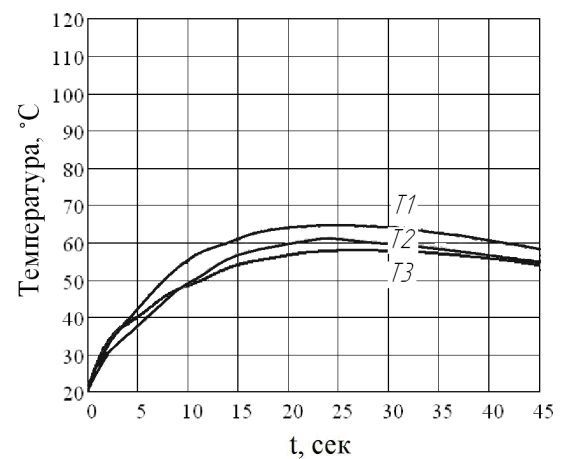
в ( $V_{CB} = 15$  м/год)



г ( $V_{CB} = 15$  м/год)



д ( $V_{CB} = 15$  м/год)



е ( $V_{CB} = 15$  м/год)

Рисунок 3.6 – Термічні цикли в мідній підкладці (а, в, д) і притискаючі (б, г, е) для  $I_{CB} = 115A$

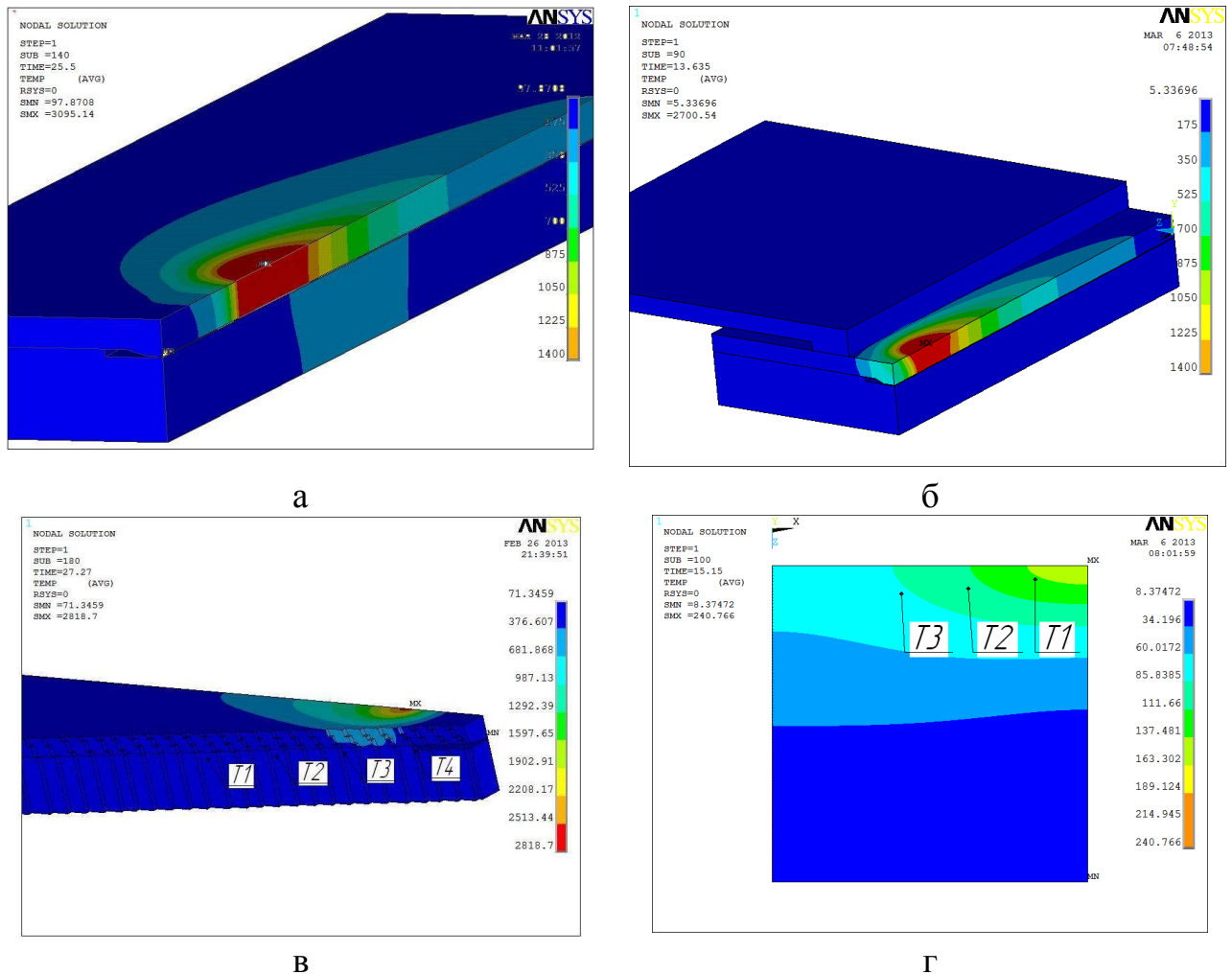


Рисунок 3.7 – Розподіл температурних полів на чисельній моделі без притискачів (а), з притиском (б) і визначення вузлів кінцевих елементів на підкладці (в) і в притискачі (г)

При використанні виразів (3.7) і (3.8) в якості граничних умов контакту в чисельній моделі теплопередачі необхідно враховувати величину конвективного тепловіддачі з поверхні В, що зумовлюють ступінь сходження експериментальних термічних циклів в підкладці з чисельними.

Конвективна тепловіддача в ANSYS / Multiphysics співвідносить температуру навколишнього середовища (ambient) з температурою на поверхні (surface) [20].

Експериментальні дані про коефіцієнт конвективної тепловіддачі, наведені в науковій літературі, представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Аналіз літературних даних про величину конвективного тепловіддачі з поверхні

Джерело інформації	Коефіцієнт конвективної тепловіддачі, Вт/м <sup>2</sup>
[18]	$h = 6,16 + 0,04T - 2,857 \cdot 10^{-2}T^2$ , при $T < 700$ °C
[98]	$h = 0,68T \cdot 10^{-2}$ , при $0 < T < 500$ °C $h = 0,231T - 82,1$ , при $T > 500$ °C
[108]	Немає даних по коефіцієнту конвективної тепловіддачі, конвекція задана як питомий тепловий потік з поверхні: $q_{2S} = 25$ Вт/м <sup>2</sup>
[123]	Комбінований коефіцієнт (конвекція + випромінювання) $h = 24,1 \epsilon T^{1,61}$

З використанням чисельного моделювання були проведені порівняльні розрахунки по визначенню впливу величини коефіцієнта конвективної тепловіддачі на термічні цикли в місцях їх вимірювання термопарами в мідній підкладці. На рис. 3.8 наведені порівняльні результати моделювання для кожного з літературних джерел.

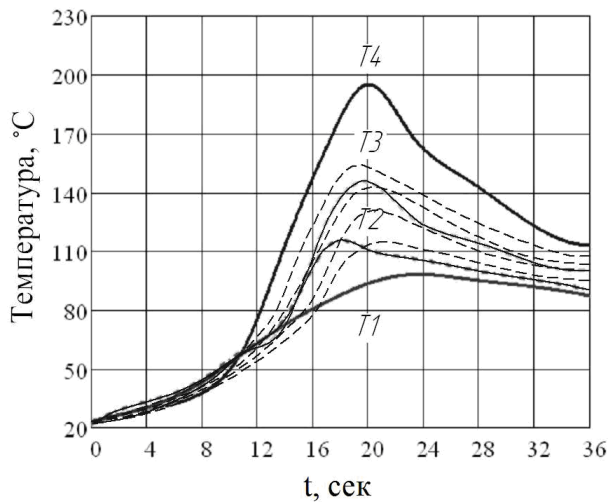
Виходячи з наведених вище графіків можна зробити висновок, що для чисельних розрахунків доцільно скористатися даними про конвективний коефіцієнт тепловіддачі, що наведені у роботі [18]. В результаті співставлення експериментальних термічних циклів з термічними циклами з чисельної моделі, було встановлено, що термічна провідність, розрахована за обраною методикою визначення теплопровідності повітряного прошарку між мікронерівностями шорсткостей поверхонь, відображає реальні умови зварювання з похибкою 5-7 %.

#### 3.4. Вибір типу кінцевих елементів і кінцевоелементне розбиття 3D-моделі

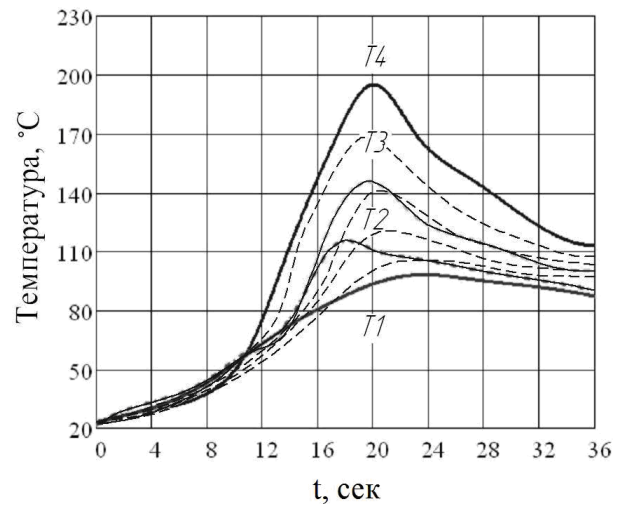
Бібліотека кінцевих елементів програми ANSYS містить більше 80 типів



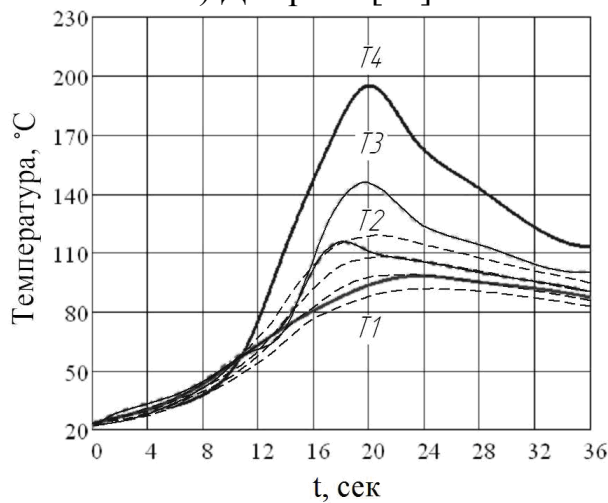
елементів, кожен з яких визначає придатність елемента до тієї чи іншої області розрахунків (розрахунки на міцність, теплові розрахунки тощо), характерну форму елемента (лінійну, плоску, у вигляді бруска і т.д.), а також двовимірність (2-D) або тривимірність (3-D) елемента як геометричного тіла. Процедура генерації вузлів і елементів в ANSYS / Multiphysics складається з трьох основних кроків [3, 27]:



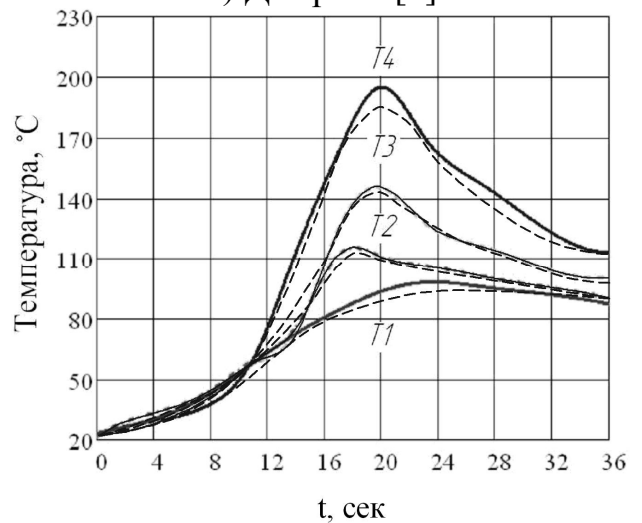
а) Джерело [23]



б) Джерело [8]



в) Джерело [9]



в) Джерело [11]

Рисунок 3.8 – Зіставлення експериментальних термічних циклів з термопар в підкладці з циклами, отриманими с чисельної моделі теплопередачі в підкладку з урахуванням різних умов конвективного тепловіддачі для режиму

$$I_{CB} = 115A, V_{CB} = 12 \text{ м/год}$$

- Встановлення атрибутів елементів.
- Встановлення контролю розбиття. ANSYS передбачає велику кількість видів контролю розбиття, які ви можете відключити при відсутності необхідності;
- Генерація сітки.

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

Другий крок – встановлення контролю розбиття. Не обов'язковий до виконання.

Третій крок – вибір способу створення сітки і перевірка правильності побудови сітки. Інструменти створення сітки (Mechtool) в ANSYS (Main Menu> Preprocessor> Mechtool) представляють собою зручний інтерфейс для більшості випадків користування.

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 володіння 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 [9, 16, 24, 32] рекомендується використовувати тип SOLID 70. Різновиди вживаних типів кінцевих елементів представлені на рис. 3.9.

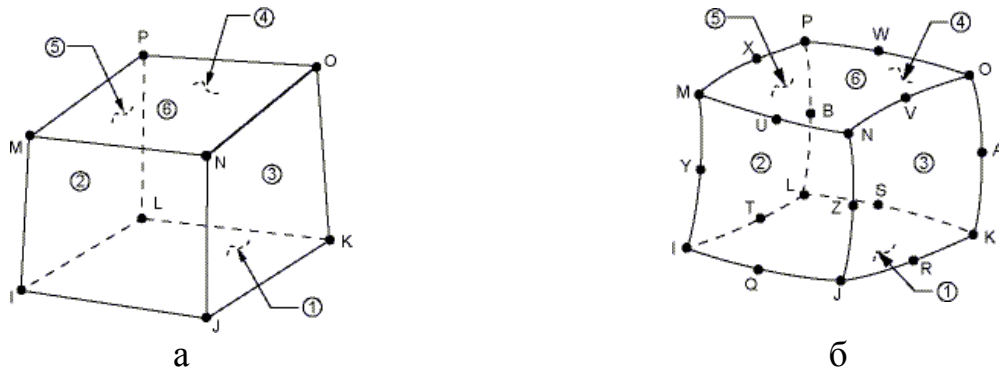
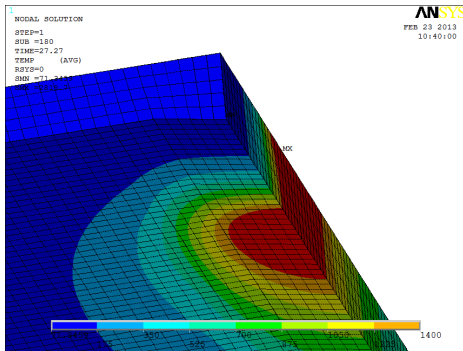


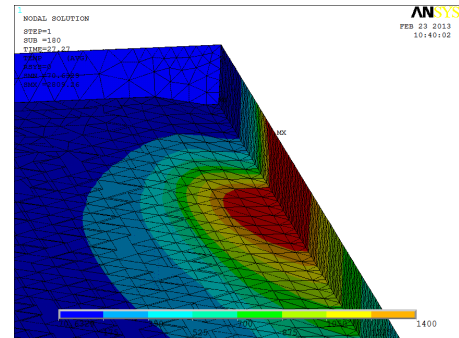
Рисунок 3.9 – Типи кінцевих елементів для вирішення 3D теплових задач:  
SOLID 70 (а) і б) SOLID 90 (б)

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 нестационарного (Transient) аналізу. Цифрами на рис. 3.9, а показані межі, на які можна поставити навантаження. Для вирішення структурних завдань цей елемент може бути замінений еквівалентним йому структурним елементом SOLID 45. Головним недоліком цього елемента є неможливість використання його для розв'язання контактних теплових задач. Таку властивість має елемент SOLID 90, представлений на рис. 3.9, 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 кінцевого елемента є найбільш раціональним для вирішення поставленого завдання. На рис. 3.10 показані попередні чисельні розрахунки температурних полів у зразку товщиною 2 мм для режимів зварювання  $I_{CB}=115A$ ,  $V_{CB}=12$  м/год,  $l_{МП}=3$  мм. Розрахунок виконаний на комп'ютері з 4-х ядерним процесором Intel core I-7, 16 GB Ram.



а) Розмір елемента 0,5 мм.

Сітка рівномірна



б) Розмір елемента 0,5 мм

Зона шва – 0,25 мм

Рисунок 3.10 – Визначення температурних полів при використанні гексаедріческою і тетраедричних сітки кінцевих елементів

З аналізу даних, наведених на рис. 3.10, видно, що тип використовуваних кінцевих елементів практично не впливає на картину розподілу температури, при цьому час розрахунку практично не відрізняється: 126 хвилин з тетраедричною сіткою (84536 елементів) і 155 хвилин з гексаедричною сіткою (64200 елементів) для пластини довжиною 0,1 м. Однак, автори статей [97, 108] рекомендують використовувати рівномірну гексаедріческою сітку для розв'язання контактних задач, в результаті чого для розрахунків використовували рівномірне розбиття 3D - моделі гексаедріческімі елементами.

Для визначення впливу розмірів кінцевих елементів на картину полів розподілу температур по поверхні пластини змодельовали розподіл температурних полів від рухомого нормально-кругового джерела нагріву при розмірі гексаедріческіх кінцевих елементів  $a = 0,15; 0,2; 0,33; 0,5$  и  $0,8$  мм для товщини зразка 3 мм і режиму зварювання:  $I_{св} = 170A$ ,  $V_{св} = 10$  м/год,  $l_{мп} = 3$  мм. Коефіцієнт зосередженості джерела залишався постійним для всіх експериментів  $k = 5,8 \text{ см}^{-2}$ . Приклади розподілу температурного поля для сіток з різними розмірами елементів представлені на рис. 3.11, а-в.

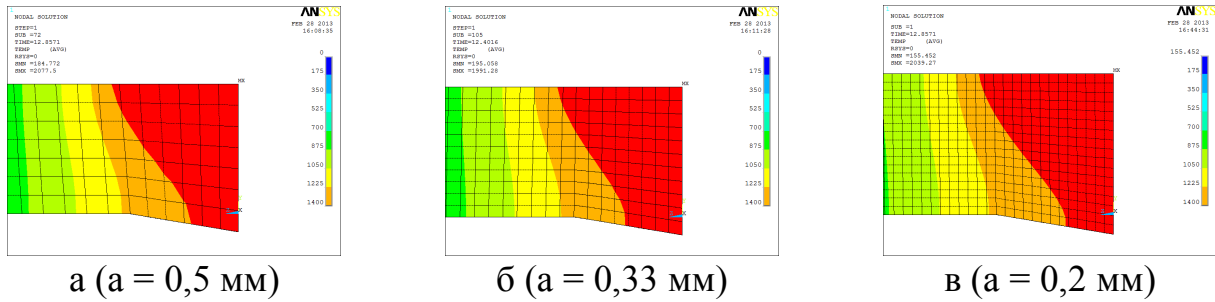


Рисунок 3.11 – Розподіл температурних полів в поперечному перерізі пластини товщиною 3 мм від нормально-кругового джерела нагрівання

Використовуючи лінійну апроксимацію даних в середовищі MathCad за даними чисельних розрахунків була побудована лінійна залежність відхилення півширини зварного шва від розміру кінцевого елемента за методом найменших квадратів. За вихідну величину півширини зварного шва була прийнята полушірина зварного шва, отримана при використанні кінцево-елементної сітки з розміром елемента  $a = 0,15$  мм і відповідна експериментальними даними. Вплив розміру кінцевого елемента на середнє відхилення від вихідної півширини зварного шва представлено на рис. 3.12.

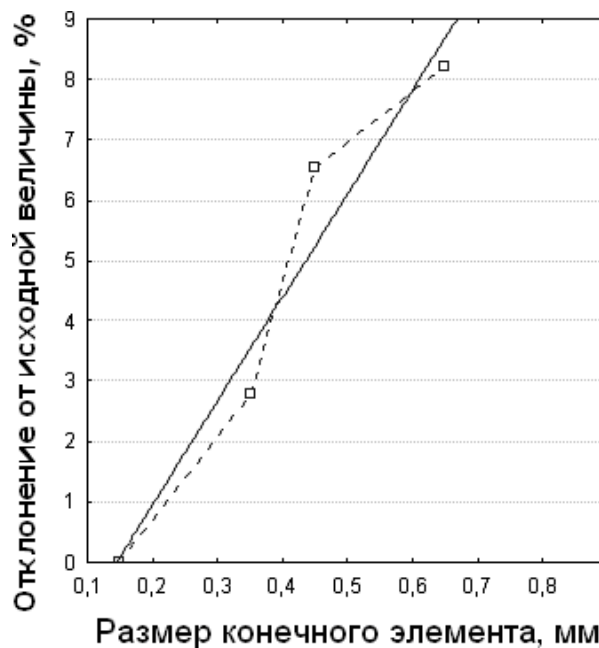


Рисунок 3.12 – Вплив розміру гексаедрического кінцевого елемента на середнє відхилення від вихідної півширини зварного шва

З аналізу рис. 3.12 випливає, що при використанні кінцевих елементів розміром менше 0,33 мм відхилення від номіналу не перевищує 3%, що цілком достатньо в чисельній моделі, використовуваної для інженерних розрахунків.

Таким чином, в результаті проведених численних експериментів з'ясували, що для чисельного рішення задачі нелінійної контактної теплопередачі найбільш доцільно використовувати гексаедрічеській тип кінцевих елементів SOLID 90 з розміром елемента  $a = 0,33$  мм.

### 3.5 Обробка результатів моделювання

Обробка результатів чисельних експериментів показує, що залежність ширини шва від коефіцієнта зосередженості нормально-кругового джерела близька до лінійної в досліджених діапазонах режиму зварювання, тому отримані в результаті моделювання значення коефіцієнтів зосередженості лінійно апроксимували в середовищі пакету MathCad за методом найменших квадратів. Графіки, що ілюструють залежність ширини зварного шва від коефіцієнта зосередженості нормально-кругового джерела нагріву, представлені на рис. 3.13 - 3.15.

Таблиця 3.3 – Визначення ширини зварного шва за допомогою лінійної апроксимації коефіцієнтів чисельної моделі

Товщина металу, мм	Сила струму $I$ , А	Діапазон швидкостей зварювання $V$ , м/год	Ширина зварного шва $e$ , мм	
			$l_{мп}=2$ мм	$l_{мп}=3$ мм
1,5	90	12-21	$e=5,69-0,044V_{св}$	$e=6,63-0,147V_{св}$
	105	15-24	$e=9,95-0,234V_{св}$	$e=5,22-0,031V_{св}$
	115	18-27	$e=9,24-0,220V_{св}$	$e=7,56-0,103V_{св}$
	125	21-30	$e=12,04-0,267V_{св}$	$e=11,88-0,277V_{св}$
2,0	90	10-12	$e=6,78-0,171V_{св}$	$e=7,03-0,171V_{св}$
	115	10-18	$e=5,66-0,016V_{св}$	$e=5,57-0,097V_{св}$
	140	16-25	$e=6,23-0,037V_{св}$	$e=9,07-0,217V_{св}$
	160	18-26	$e=8,383-0,153V_{св}$	$e=11,64-0,295V_{св}$
3,0	170	10-16	$e=8,58-0,110V_{св}$	$e=10,09-0,224V_{св}$
	190	12-18	$e=9,30-0,125V_{св}$	$e=10,6-0,021V_{св}$
	210	14-20	$e=8,23-0,123V_{св}$	$e=7,78-0,151V_{св}$

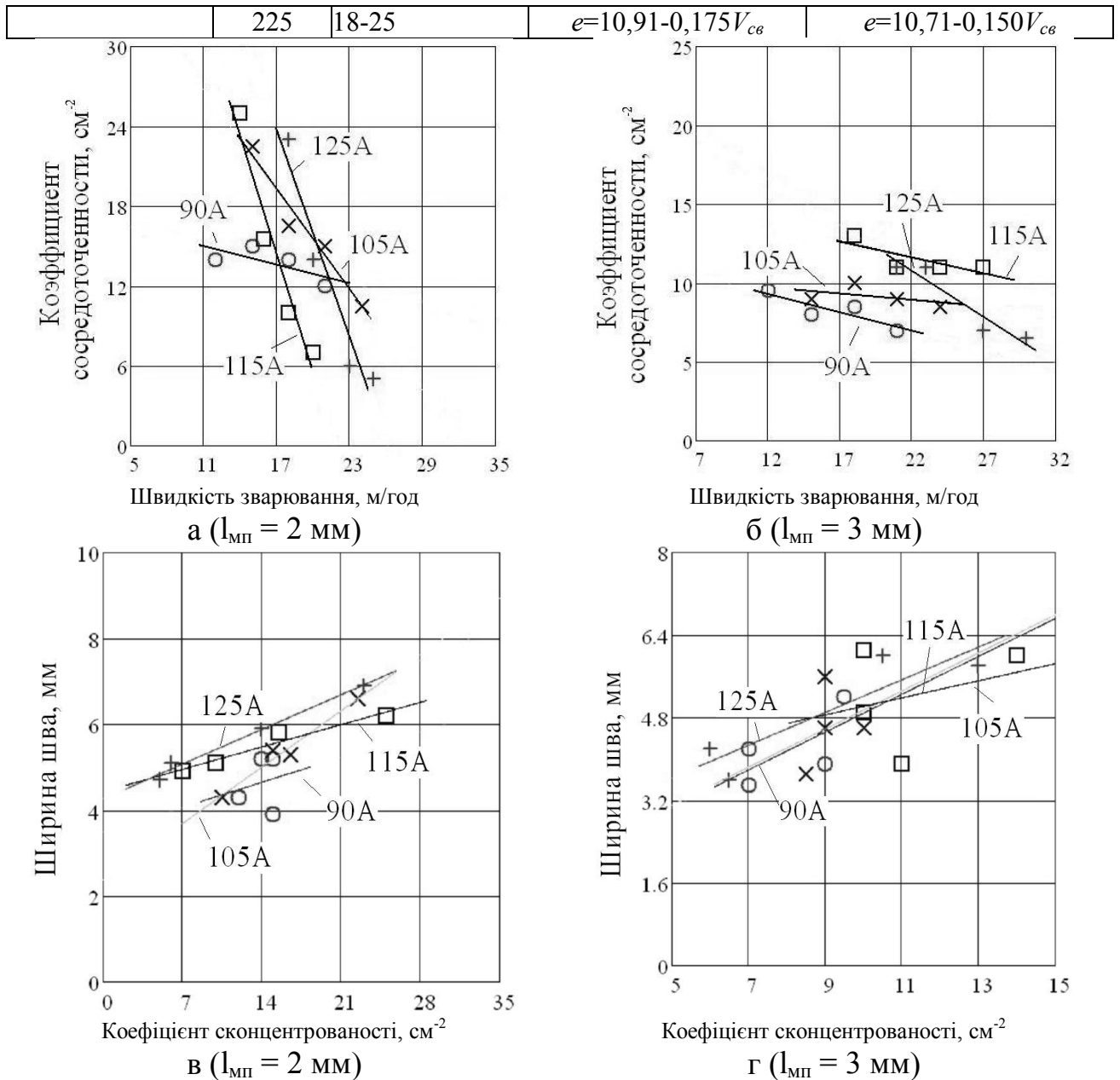


Рисунок 3.13 – Залежності коефіцієнта зосередженості нормально-кругового джерела від швидкості зварювання (а, б) і ширини зварного шва від коефіцієнта зосередженості (в, г) для товщини зразка 1,5 мм

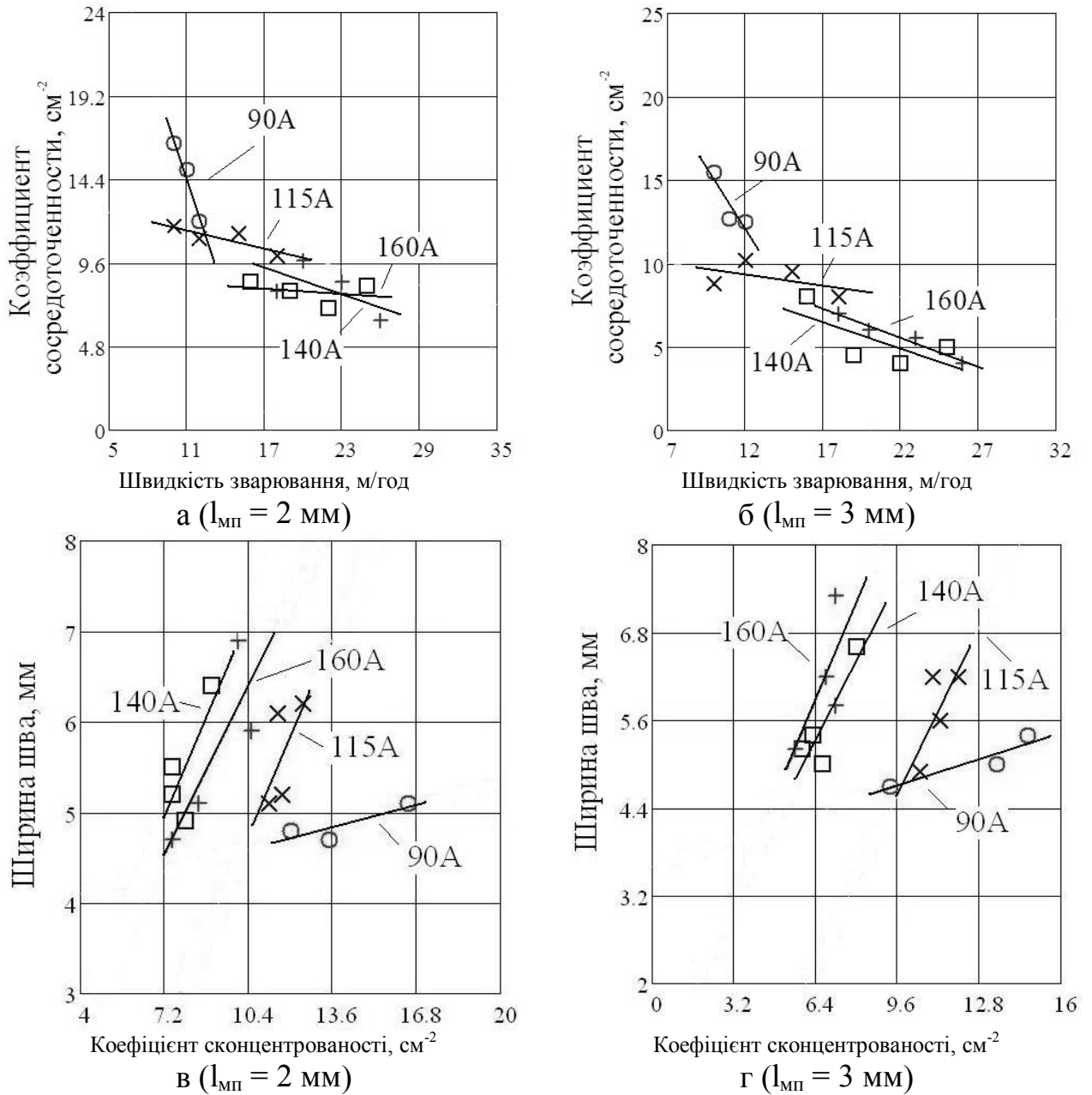


Рисунок 3.14 – Залежності коефіцієнта зосередженості нормально-кругового джерела від швидкості зварювання (а, б) і ширини зварного шва від коефіцієнта зосередженості (в, г) для товщини зразка 2,0 мм



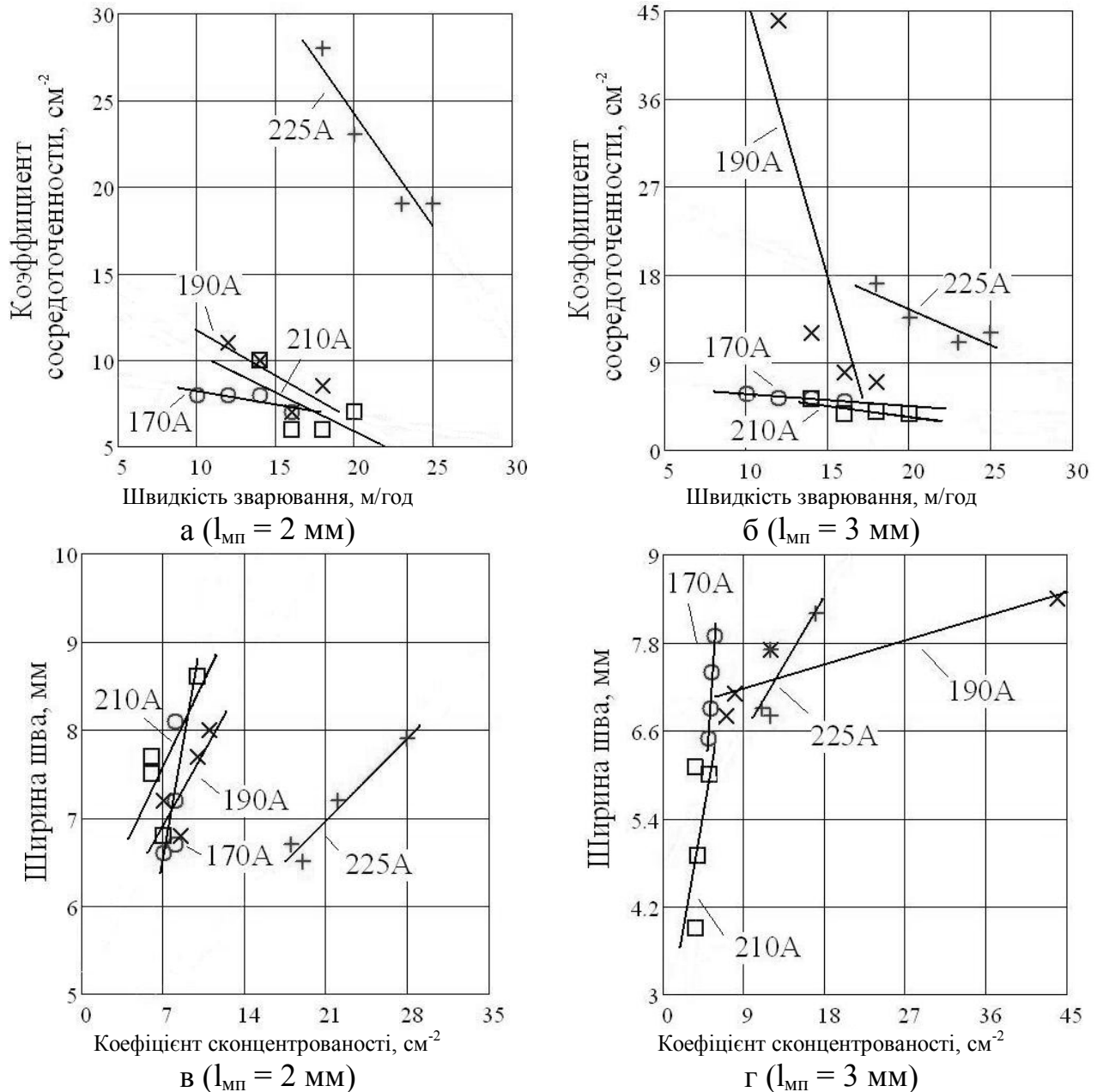


Рисунок 3.15 – Залежності коефіцієнта зосередженості нормально-кругового джерела від швидкості зварювання (а, б) і ширини зварного шва від коефіцієнта зосередженості (в, г) для товщини зразка 3,0 мм

Вочевидь, розташування притискачів впливає на параметри геометрії зварного шва через тепловіддачі із зовнішньої поверхні зварного шва. Отже, в отриманих формулах необхідно враховувати цю обставину. Використовуючи чисельне моделювання, визначимо на скільки впливає розташування притискачів на певній відстані від вісі шва на кінцеву величину ширини зварного шва.

### 3.6. Чисельна оцінка впливу розташування притискачів відносно вісі шва на ширину зварного шва

Для визначення ступеня впливу притискачів на ширину зварного шва їх мали на відстані  $a = 6$  і  $8$  мм від осі зварного шва. В якості граничних умов контакту використовували раніше отримані вирази. Розподіл температурних полів по поверхні пластини товщиною  $2,0$  мм для режимів зварювання  $I_{CB}=115A$ ,  $V_{CB}=10$  м/год,  $l_{МП}=3$  мм (лишалася незмінною) представлено на рис. 3.16. Розмір кінцевого елемента  $0,5$  мм, тип елементів - гексаедричний.

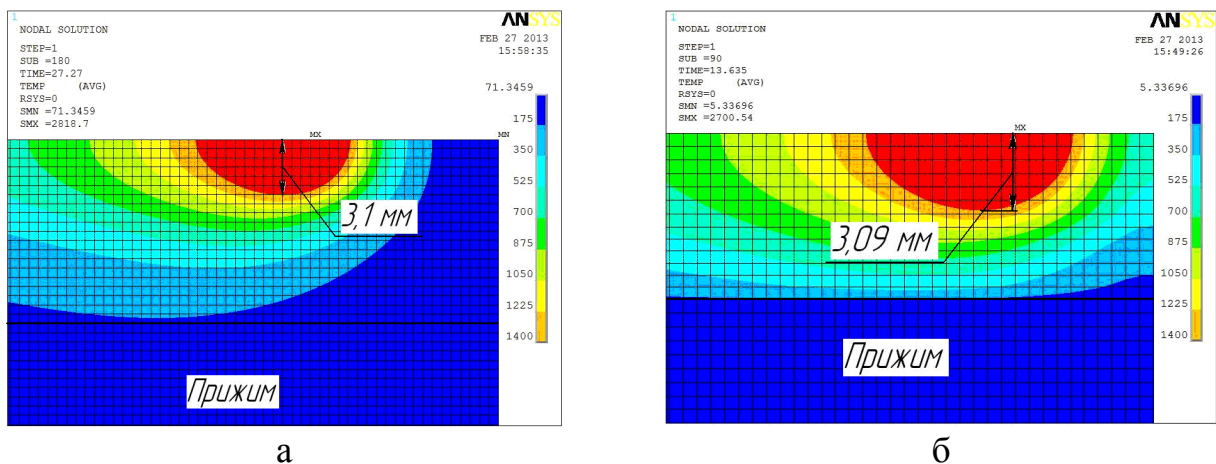


Рисунок 3.16 – Розподіл температурних полів від рухомих джерел на вільній поверхні пластини з розташуванням притиску на відстані  $a = 8$  мм (а) від вісі шва і на відстані  $a = 6$  мм (б)

На рис. 3.17 суцільною лінією показані експериментальні значення ширини шва для двох режимів: 1)  $I_{CB} = 115A$ ,  $V_{CB} = 10$  м/год,  $l_{МП} = 3$  мм; 2)  $I_{CB} = 160A$ ,  $V_{CB} = 26$  м/год,  $l_{МП} = 3$  мм. Пунктирною лінією показані результати чисельного моделювання ширини шва по ізотерме плавлення комбінованого джерела нагрівання.

З аналізу рис. 3.17 чітко видно, що розташування притискачів на відстані  $6$  мм і більше від вісі шва до місця контакту притискача і зразка практично не впливає на ширину шва при зварюванні тонколистових корозійностійких

сталей аустенітного класу, відхилення в результатах не перевищує похибки експерименту.

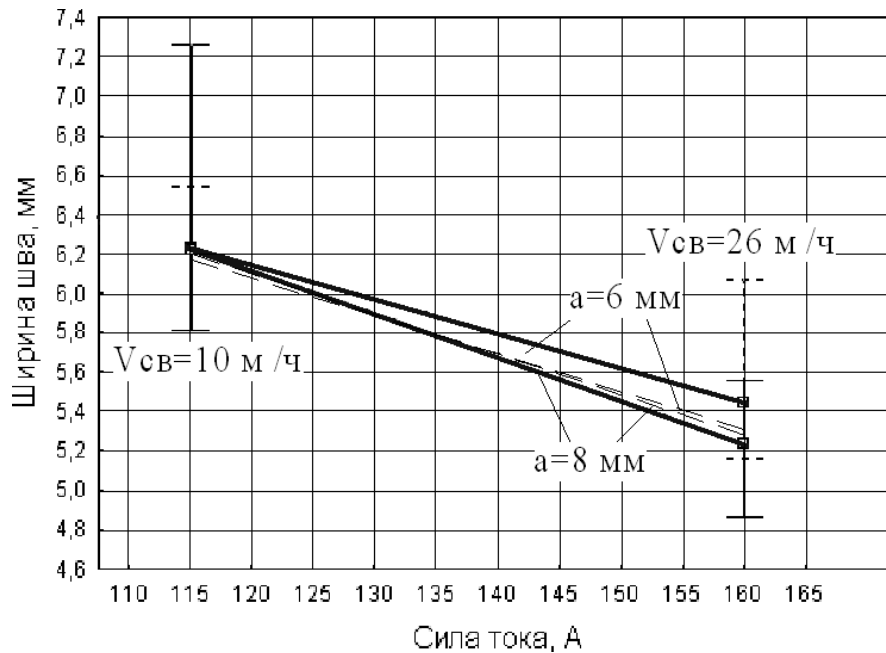


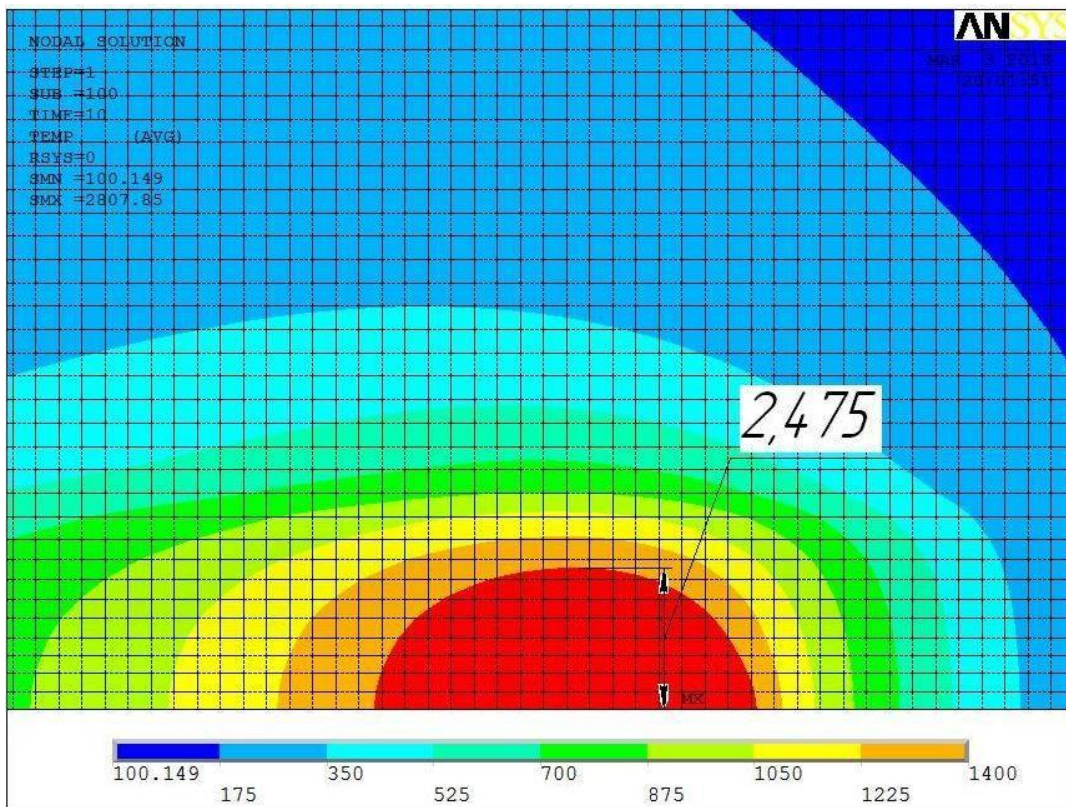
Рисунок 3.17 – Вплив розташування притискачів на ширину зварного шва (відстань від вісі шва  $a = 6$  і  $8$  мм)

### 3.7 Чисельна оцінка впливу ширини канавки в мідній підкладці на ширину зворотнього валика

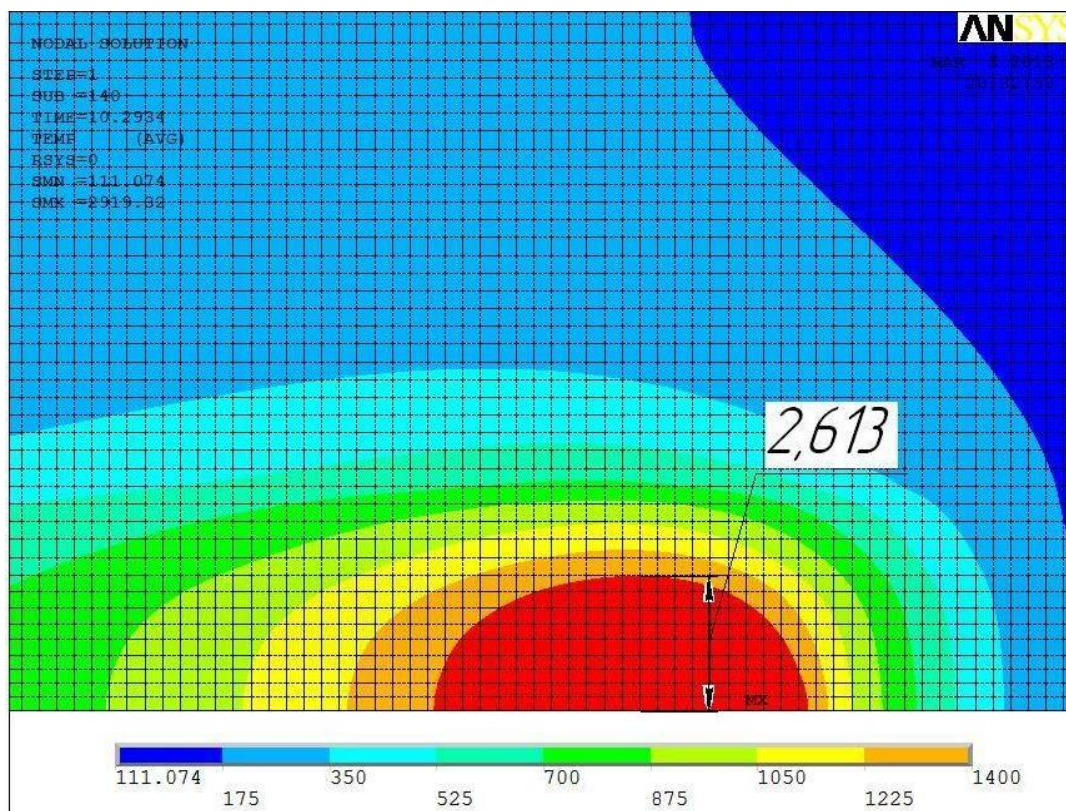
Для визначення впливу ширини канавки в мідній підкладці проводили чисельні експерименти на наступних режимах зварювання - товщина металу 2 мм,  $I_{св} = 115$  А,  $V_{св} = 12$  м/год,  $l_{мп} = 3$  мм. Розподіл температурних полів із зворотного боку шва в залежності від ширини канавки в мідній підкладці показано на рис. 3.18.

На рис. 3.19 представлений графік залежності півширини зворотнього валика від ширини канавки в мідній підкладці.

З аналізу рис. 3.19 видно, що рішення задачі теплопередачі чисельним методом з урахуванням умов контакту «сталевий зразок-мідна покладка» і «сталевий зразок-латунний притиск» дозволяє для дослідженої області моделювання з похибкою не більше 7% описати ширину зворотнього валика в залежності від ширини канавки в підкладці в досліджуваному діапазоні параметрів режиму зварювання.



a



б

Рисунок 3.18 – Розподіл температурних полів при чисельному рішенні завдання теплопередачі (гексаедрична сітка, розмір елемента - 0,33 мм) зі

зворотного боку зразка:  $b = 6$  мм (а);  $b = 8$  мм (б)

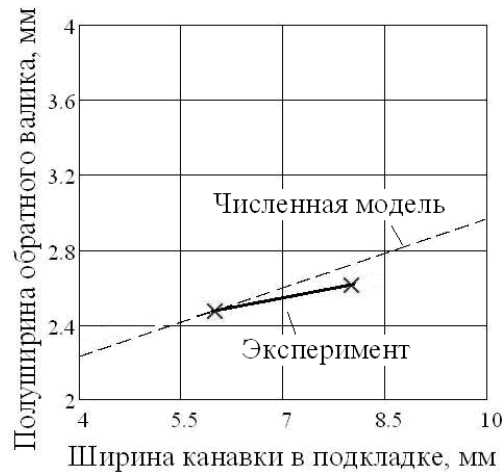


Рисунок 3.19 – Залежність півширини зворотного валика шва від ширини канавки в мідній підкладці (пунктирна лінія – дані з чисельної моделі, суцільна лінія – результат експерименту)

### 3.8 Чисельна оцінка впливу шорсткості поверхонь в зоні контакту на ширину зворотнього валика зварного шва

Для визначення впливу шорсткості поверхонь в області контакту проводили чисельні експерименти на наступних режимах зварювання - товщина зразка 2 мм,  $I_{св} = 115$  А,  $V_{св} = 12$  м/ГОД,  $l_{мп} = 3$  мм. Приклади розподілу температурних полів із зворотного боку шва в залежності від величини мікронерівностей контакту на сталевому зразку показані на рис. 3.20.

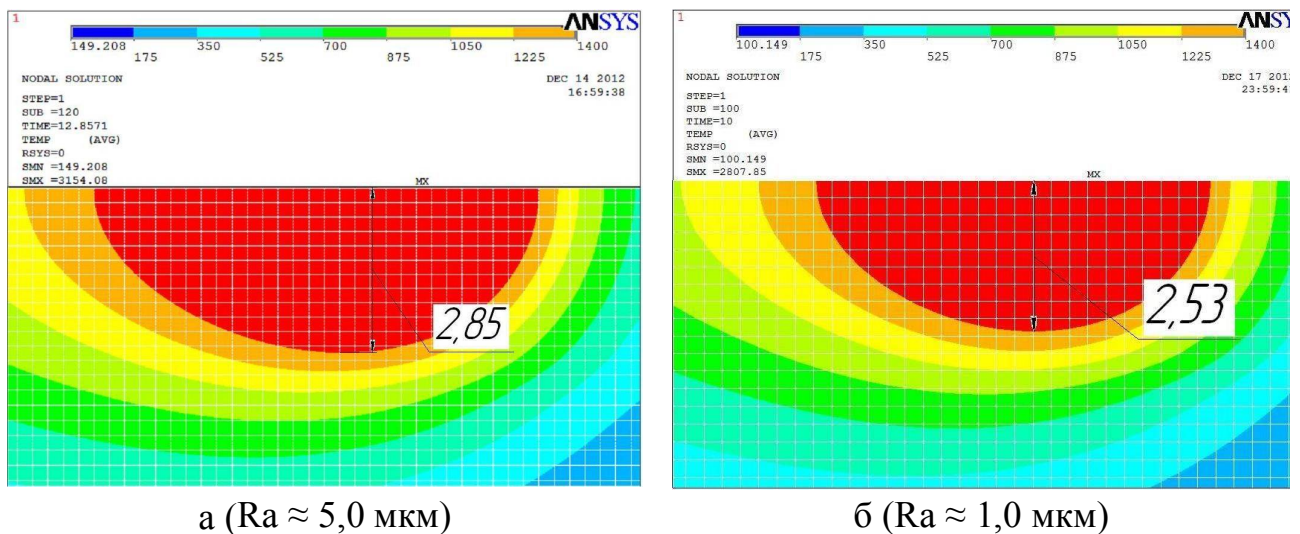


Рисунок 3.20 – Розподіл температурних полів при чисельному рішенні задачі

теплопередачі (гексаедрична сітка, розмір елемента 0,25 мм):  $a - Ra \approx 5,0$  мкм;

$$б - Ra \approx 1,0 \text{ мкм}$$

Скориставшись даними [7, 10], визначили величину контактної термічної провідності контактуючих поверхонь сталевго зразка і мідної підкладки при  $Ra_{\text{steel}}$ :

$$Ra_{\text{steel}} = 0,63 \text{ мкм}$$

$$\alpha_{\text{возд}}(T) = 10200 + 32T \quad (3.4)$$

$$Ra_{\text{steel}} = 1,0 \text{ мкм}$$

$$\alpha_{\text{возд}}(T) = 9395 + 28,7T \quad (3.5)$$

Порівняння експериментальних даних з результатами чисельного моделювання представлено на рис. 3.21.

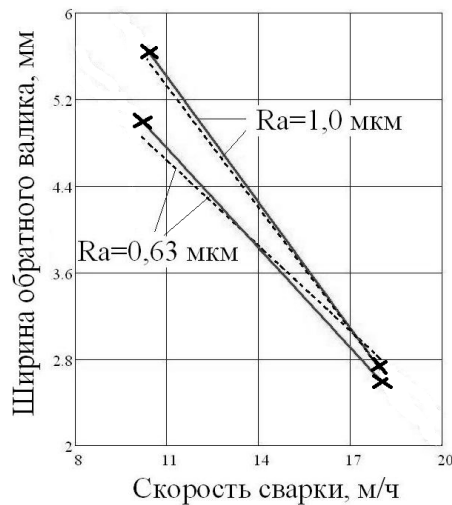


Рисунок 3.21 – Зміна ширини зворотного валика шва від швидкості зварювання при різних значеннях шорсткостей контактуючих поверхонь (суцільні лінії – експериментальні дані, пунктирні лінії – результати чисельного моделювання)

З аналізу рис. 3.16 - 3.20 випливає, що урахування впливу термічної провідності контакту при чисельному рішенні задачі теплопередачі дозволяє з похибкою, що не перевищує 5 %, описати ширину зворотного валика зварного

шва при різній шорсткості сталевго зразка і різних розмірах канавки в мідній підкладці.

Використовуючи лінійну апроксимацію результатів моделювання в пакеті MathCad за методом найменших квадратів для урахування розмірів канавки в мідній підкладці і особливостей контакту «сталевий зразок-мідна підкладка» в розрахункову модель був введений поправочний коефіцієнт  $k^1$ .

### 3.9 Визначення коефіцієнта тепловіддачі у мідну підкладку в процесі зварювання

Для визначення величини тепловіддачі в мідну підкладку використовували чисельне моделювання. Ширина 3D-моделі теплопередачі відповідала собою ширину сталевго зразка і мідної підкладки, довжина моделі становила 0,1 м. Граничні умови залишалися тими ж, що і в моделі для розрахунку геометрії зварного шва (див. п. 3.1 і 3.2). Після проходження рухомого джерела нагріву за зразком для отримання даних про величину теплового потоку (Heat Flow) використовували функцію Nodal Loads - Contact Only в постпроцесорі ANSYS / Multiphysics. Результати визначення частини теплового потоку, який пішов в мідну підкладку, на крайніх точках параметрів режиму для всіх досліджуваних товщини матеріалу представлені на рис. 3.22. Ширина канавки в мідній підкладці становила 8 мм.

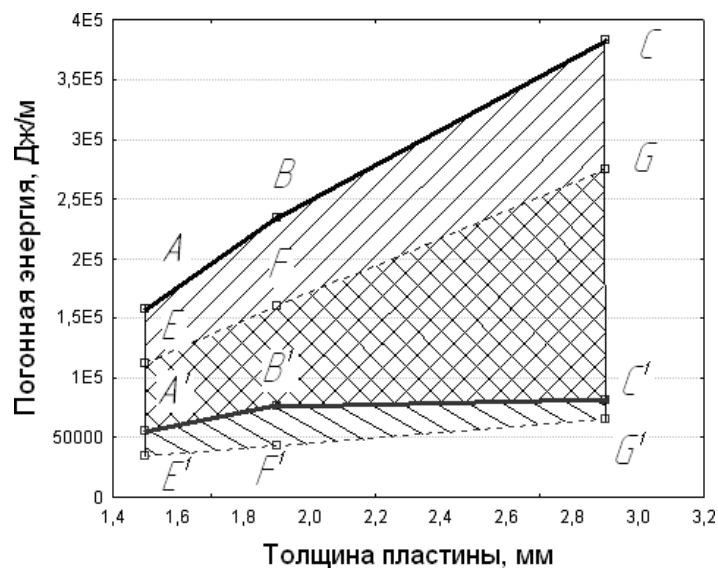


Рисунок 3.22 – Погонна енергія, введена в зразки товщиною 1,5; 2,0 і 3,0 мм і відведена в мідну підкладку

На рис. 3.22 багатокутник  $ABCC^1A^1B^1$  являє собою область значень максимальної погонної енергії, витраченої на отримання геометрії зварного шва з розмірами, відповідними ГОСТ 14771-76 [141] для заданих товщин матеріалу. багатокутник  $ABCC^1A^1B^1$  складається з багатокутників  $ABCGFE$  і  $EFGC^1B^1A^1$ , що представляють собою частина погонної енергії, яка пішла за рахунок тепловіддачі в підкладку, і частина погонної енергії, акумульованої в зразку, відповідно. А багатокутник  $EFGG^1F^1E^1$  являє собою область значень мінімальної погонної енергії, витраченої на отримання геометрії наскрізного проплавлення з розмірами, відповідними ГОСТ 14771-76 [141] для заданих товщин матеріалу. багатокутник  $EFGG^1F^1E^1$  складається з багатокутників  $EFGC^1B^1A^1$  і  $A^1B^1C^1G^1F^1E^1$  що представляють собою частина погонної енергії, яка пішла за рахунок тепловіддачі в підкладку, і частина погонної енергії, акумульованої в зразку, відповідно.

З аналізу рисунка 3.22 видно, що зі збільшенням товщини зразка величина тепловідведення в зразок спочатку зростає до товщини 2,0 мм (відрізок  $A^1B^1$ ), а потім залишається практично незмінною (відрізок  $B^1C^1$ ) при одночасному збільшенні погонної енергії, що вводиться при зварюванні. Величина тепловіддачі для максимальної та мінімальної погонної енергії при зварюванні зразка товщиною  $\delta = 1,5$  мм склала  $(0,31-0,36)q_{\text{п}}$ ;  $\delta = 2,0$  мм –  $(0,27-0,32)q_{\text{п}}$  і  $\delta = 3,0$  мм –  $(0,21-0,24)q_{\text{п}}$  відповідно.

Отже, при АрДЗ на мідній підкладці тонколистових корозійно-стійких сталей аустенітного класу товщиною від 1,5 до 3,0 мм величина тепловіддачі в мідну підкладку досягає  $0,21q_{\text{п}} - 0,36q_{\text{п}}$ , що істотно впливає на параметри геометрії зварного шва стикових з'єднань і викривлення деталей після зварювання. При збільшенні товщини зразка відведена тепла потужність залишається практично постійною (відрізок  $B^1C^1$ ), але в зв'язку з ростом вводиться погонної енергії для зварювання ступінь впливу відводиться в



підкладку потужності знижується.

### 3.10 Чисельна оцінка впливу ширини канавки в підкладці і шорсткості сталевго зразка на величину тепловіддачі в мідну підкладку при зварюванні

Для оцінки впливу ширини канавки мідної підкладці і висоти мікронерівностей сталевго зразка на величину тепловіддачі в підкладку проводили чисельне моделювання на крайніх точках діапазону параметрів режиму зварювання. Ширина 3D-моделі теплопередачі відповідала собою ширину сталевго зразка і мідної підкладки, довжина моделі становила 0,1 м. Для врахування зміни шорсткості сталевго зразка в моделі змінювали граничні умови контакту: в одному випадку сталевга пластина шліфувалася ( $Ra = 0,63$  мкм), в іншому випадку – фрезерувалася ( $Ra = 5,0$  мкм; величина термічної провідності:  $\alpha_{\text{возд}}(T) = 4600 + 15T$ ).

На рис. 3.23 суцільною лінією показана частка погонної енергії, що відводиться в підкладку з шириною проточки в мідній підкладці 6 мм і шорсткістю поверхні сталевго зразка  $Ra = 0,63$  мкм, пунктирною – з шириною проточки 6 мм и  $Ra = 5,0$  мкм, штрихпунктирної - з шириною канавки 8 мм и  $Ra = 0,63$  мкм.

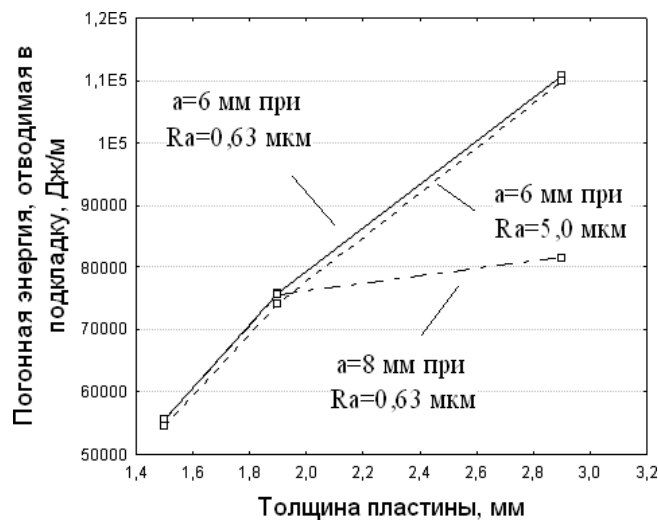


Рисунок 3.23 – Залежність погонної енергії, що відводиться в підкладку, від

## товщини зварювальних зразків

З аналізу рис. 3.22 випливає, що при зварюванні зразків товщиною 1,5 і 2,0 мм для канавки шириною 6 і 8 мм величина тепловіддачі в мідну підкладку практично однакова. Однак зі збільшенням товщини зразка і зростанням вводиться погонної енергії при зварюванні величина відводиться потужності зростає на 25% при зміні ширини канавки з 8 мм до 6 мм. При цьому видно, що зміна шорсткості сталевого зразка практично не впливає на величину тепловіддачі в мідну підкладку. Мабуть, це пов'язано з тим, що зусилля затиснення притискачів досить для того, щоб поверхня мідної підкладки деформувалися, і відбулося зменшення обсягу повітряних прошарків між мікронерівностями зварного зразка і підкладки.

На основі отриманих кількісних взаємозв'язків параметрів режиму зварювання і геометрії стикового зварного шва листового матеріалу (див. п. 2.5, табл. 2.9 і п. 3.5, табл. 3.12) розроблена комп'ютеризована система «Розрахунок параметрів геометрії стикових з'єднань при АрДЗ тонколистових корозійно-стійких сталей на мідній підкладці», що дозволяє здійснювати розробку технологій зварювання нових виробів без проведення робіт по експериментальній коригуванні режимів зварювання у виробничих умовах. Вхідними параметрами комп'ютеризованої системи для вибору режимів зварювання, що забезпечують розміри зварного шва відповідно до ГОСТ 14771-76 [141], є товщина листового матеріалу з корозійностійкої сталі (1,5 - 3,0 мм); ширина канавки в мідній підкладці (6 - 8 мм); шорсткість поверхні листового матеріалу і мідної підкладки ( $Ra=0,63 - 5,0$  мкм). Значення параметрів режиму зварювання для значень товщини листів, що відрізняються від 1,5; 2,0 і 3,0 мм, визначаються лінійною інтерполяцією. За результатами чисельного моделювання в системі формувалося найкраще поєднання параметрів режиму зварювання стикових з'єднань на мідній підкладці (сила зварювального струму  $I_{св}$ , швидкість зварювання  $V_{св}$ , величина міжелектродного проміжку  $l_{мп}$ ; і розмірів зварного шва - ширину стикового шва з лицьової і зворотної сторони),

що задовольняють заданій виробничому вимогу. Отримана математична модель реалізована в комп'ютеризованій системі і є частиною бази даних для керування зварювальними інверторними джерелами живлення. Інтерфейс комп'ютеризованій системі і алгоритми вибору основних виробничих вимог і розрахунків параметрів геометрії зварного шва стикових з'єднань представлені в додатку А.

### ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 3

1. Для АрДЗ корозійностійких сталей аустенітного класу товщиною від 1,5 до 3 мм розроблена модель теплопередачі в пакеті ANSYS / Multiphysics, що описує вплив режимів зварювання і тепловідведення в мідну підкладку на ширину зварного шва стикових з'єднань з лицьової і зворотної сторони.

2. Встановлено, що термічна провідність на кордоні з тепловідводної підкладкою, обчислена за теплопровідності повітряного прошарку між мікронерівностями поверхонь контактних пар «Сталевий зразок-мідна покладка» і «сталевий зразок-латунний притиск», відображає реальні умови зварювання з похибкою 5-7% і може бути застосована для інженерних розрахунків.

3. В результаті чисельного моделювання визначено величину тепловіддачі у мідну підкладку для максимальної та мінімальної погонної енергії  $q_{\text{п}}$  при зварюванні корозійностійких сталей аустенітного класу з товщиною  $\delta = 1,5; 2,0$  и  $3,0$  мм, яка лежить в межах -  $(0,31-0,36)q_{\text{п}}$ ;  $(0,27-0,32)q_{\text{п}}$  та  $(0,21-0,24)q_{\text{п}}$  відповідно.

4. На розробленій моделі показано, що при зварюванні корозійностійких сталей аустенітного класу товщиною 1,5 і 2,0 мм для канавки шириною 6 і 8 мм величина тепловіддачі у мідну підкладку практично однакова, але для товщини сталевого зразка 3 мм величина тепловіддачі зростає на 25% при зменшенні ширини канавки з 8 мм до 6 мм.

5. В результаті комп'ютерного моделювання отримані кількісні

взаємозв'язки режимів зварювання і ширини зварного шва при АрДЗ без присадки корозійно-стійких сталей аустенітного класу товщиною від 1,5 до 3,0 мм з урахуванням геометрії мідної підкладки і величини шорсткості листового матеріалу, що зварюється.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Загальні вимоги охорони праці

Студенти, що беруть участь в НДР, допускаються до виконання робіт лише в присутності і під безпосереднім керівництвом викладача, що веде НДРС.

Забороняється працювати в лабораторії в нетверезому стані, вживати алкогольні напої, наркотичні і токсичні речовини під час роботи і після закінчення роботи на території університету.

Спецодяг і інші засоби індивідуального захисту повинні зберігатися в спеціально відведеному місці. Забороняється перебувати в лабораторії у верхньому одязі і класти одяг на випробувальні установки, прилади і устаткування.

При роботі в лабораторії необхідно дотримувати правила особистої гігієни. Забороняється приймати їжу на робочому місці.

У лабораторії має бути аптечка для надання першої допомоги при порізі, опіку і інших нещасних випадках.

Для гасіння можливих займань і пожеж лабораторія має бути оснащена необхідними засобами пожежегасіння (вогнегасник, ящик з піском).

До самостійної роботи в якості штампувальника допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, а також:

- вступний інструктаж;
- інструктаж з пожежної безпеки;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- навчання безпечним методам і прийомам праці не менше ніж за 10 годинною програмою;
- інструктаж з електробезпеки на робочому місці і перевірку засвоєння його змісту.

Основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі на пресі холодного штампування при певних обставинах можуть бути:

- елементи виробничого обладнання;
- несправний робочий інструмент;
- частки металу, що відлітають;
- електрострум;
- промисловий пил;
- виробничий шум;
- механічні небезпеки: розчавлювання, защемлення і падіння; відрізання; розрив, затягування, потрапляння під удар.

При виявленні несправностей устаткування, блокувань, пристроїв, інструментів та інші недоліки або небезпеки на робочому місці негайно повідомити викладачу. Приступити до роботи можна тільки з його дозволу після усунення всіх недоліків.

При виявленні загоряння або у випадку пожежі:

- відключити обладнання;
- повідомити в пожежну охорону і адміністрації;
- приступити до гасіння пожежі наявними в цеху первинними засобами пожежогасіння відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

При загрозі життю - покинути приміщення.

При нещасному випадку надати потерпілому першу (долікарську) допомогу, негайно повідомити про те, що трапилося викладачу, вжити заходів до збереження обстановки події (стан устаткування), якщо це не створює небезпеки для оточуючих.

#### **4.2 Вимоги охорони праці перед початком роботи**

Перед початком роботи мають бути перевірені з'єднання обладнання з контуром захисного заземлення, справність електроприладів, інструменту, автоматичних вимикачів, розеток, вилок, освітлення, а також наявність первинних засобів пожежогасіння.

Заземлюючі контакти розеток мають бути надійно з'єднані з контуром захисного заземлення.

Перед початком роботи переконатися в тому, що всі електроприлади, використовувані в експерименті, правильно підключені і надійно заземлені.

При експлуатації електроприладів необхідно керуватися правилами, викладеними в технічному паспорті.

При виявленні несправностей електроприладів, стендів, захисного заземлення повідомити про це науковому керівникові лабораторії, або зав. лабораторією.

Робота на пресах повинна проводитися тільки після перевірки:

- справності штампів і відповідності їх розмірних модельних характеристик;
- наявності та справності навколо обертових частин пресів захисних огорожень, заземлюючих пристроїв, електропроводки;
- наявність і справність блокувальних і запобіжних пристроїв, заблокованих з пусковими механізмами.

Всі рухи (переміщення) преса, які можуть стати причиною небезпеки для обслуговуючого персоналу та оточуючих, повинні мати справне захисне блокування. Блокуючі пристрої преса при його роботі в одному з режимів повинні виключити можливість його роботи в іншому режимі і мимовільне перемикавання з режиму на режим. З метою забезпечення безпеки штампувальника система управління пресом повинна мати пристрій аварійної зупинки, яке спрацьовує при будь-якому порушенні працездатності преса незалежно від режиму його роботи, в тому числі при взаємному відключенні будь-якого виду живлення, яке використовується в обслуговуваному обладнанні.

Органи аварійного відключення повинні оснащуватися механічними засувками для фіксації їх у положенні "Виключено". Повторне включення преса має бути можливим тільки після того, як всі органи аварійного відключення, які

раніше були задіяні, будуть вручну наведені в початкове положення.

### **4.3 Вимоги охорони праці під час роботи**

Дозволяється працювати лише зі справними електроприладами.

При роботі з електроприладами можливі випадки ураження людей електричним струмом. Причинами цього можуть бути [38, 39]:

- одночасний дотик руками або металевим предметом до корпусу електроприладів і оголених проводів;
- робота з несправними електроприладами;
- порушення правил користування електроприладами.

Забороняється працювати з електроприладами і вимірювальними приладами при знятому кожусі.

Забороняється висмикувати штепсельні роз'єми, вилки і фішки, узявшись за провід. Відключення проводити тільки узявшись за роз'єм, вилку або фішку, щоб уникнути короткого замикання і можливого при цьому нещасного випадку (опіку).

Забороняється працювати з електроприладами у вогкому одязі, вогкими руками, перекривати вентиляційні отвори, якщо вони є на приладах.

Куріння в лабораторії заборонене.

Забороняється залишати без спостереження, ремонтувати і переносити включені в мережу електроприлади.

Забороняється підключати декілька споживачів електроенергії до однієї штепсельної розетки.

Забороняється заміна згорілих запобіжників «жучками». Необхідно застосовувати запобіжники заводського виготовлення, що калібруються.

Забороняється захарашувати підступи до електричних пристроїв (шафам, автоматичним вимикачам, розеткам), а також відчиняти їх.



При раптовому припиненні подачі електроенергії всі вимикачі і рубильники мають бути негайно вимкнені.

Не допускається залишати неізольованими оголені проводи, перевантажувати електромережу, користуватися розбитими вилками, розетками і вимикачами.

Електроприлади мають бути розташовані на відстані не менше 1 м від нагрівальних приладів і не повинні піддаватися дії прямих сонячних променів.

Робоче місце утримувати в сухому і чистому стані, не допускати запиленості електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

Забороняється виконувати очистку від пилу і бруду включених в мережу 220V електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

При виявленні несправностей електроприладів, вимірювальних приладів, стендів, за відсутності їх заземлення, а також при появі іскріння або характерного запаху перегрітої ізоляції, негайно знеструмити їх. Повідомити про це науковому керівникові лабораторії або його заступникові.

Приступати до роботи дозволяється тільки після усунення помічених несправностей електроприладів, вимірювальних приладів і стендів.

При проведенні профілактичних і ремонтних робіт дозволяється використовувати ізопропиловий або етиловий спирт.

Дозволяється зберігати запас легкозаймистих рідин, що не перевищує 0,5 літра. Зберігання запасу дозволяється в тарі, що не згоряє, зі щільно закритою кришкою.

Забороняється виконувати ремонтні роботи, пов'язані з обслуговуванням преса, без відключення системи живлення. Обов'язковою є присутність другої особи, яка наглядає за безпекою виробництва робіт, в разі навчання і (або) налагодження з використанням переносного дистанційного пульта управління.

Оброблені та необроблені деталі повинні складатися тільки на відведених для цієї мети місцях так, щоб вони не захаращували робочого місця.

Для дрібних деталей, заготовок і відходів повинна бути передбачена спеціальна тара.

Для зберігання інструменту, невеликих, часто використовуваних пристроїв і оснащення, робочі місця повинні бути обладнані шафами, стелажми тощо.

Для екстреної зупинки обладнання повинно оснащуватися кнопками «Стоп» червоного кольору з грибоподібним штовхачем, що знаходяться в легкодоступних місцях, в зоні постійних робочих приміщеннях поруч з небезпечними вузлами, що часто обслуговуються.

#### **4.4 Вимоги охорони праці після закінчення роботи**

Після закінчення роботи вимкнути електроприлади, вимірювальні прилади, стенди.

Вимкнути всі автоматичні вимикачі, відключити використовувані подовжувачі мережі 220 V.

Привести до ладу робоче місце, прибравши пил, що з'явився, і сміття. Інструменти, пристосування та мастильні матеріали прибрати у відведене для них місце. Ганчір'я і займісті матеріали, щоб уникнути самозаймання, прибрати в металеві ящики з щільними кришками.

Зняти спецодяг, прибрати його в шафу, вимити руки та обличчя з милом.

При виході з приміщення лабораторії необхідно вимкнути всі споживачі електроенергії.

При виявлених під час роботи і після закінчення роботи несправностях і неполадках електроприладів повідомити наукового керівника лабораторії або його заступника.

#### **4.5 Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях**

При ліквідації аварійної ситуації необхідно діяти відповідно до плану ліквідації аварій [37].

При роботі з електроприладами і вимірювальними приладами в лабораторії можливі наступні аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;
- ураження електричним струмом.

Джерелами спалаху в лабораторії можуть бути вузли приладів, пристроїв електроживлення, де в наслідок різних порушень перегріваються електронні компоненти схем, проводи, утворюються електричні іскри і дуги, здатні спричинити загоряння горючих матеріалів.

Співробітники і викладачі, що користуються електроприладами в лабораторії, зобов'язані знати розташування засобів пожежогасіння і уміти ними користуватися.

При пожежі слід виконати наступні дії:

- негайно знеструмити всі електроприлади загальним автоматичним вимикачем;
- негайно евакуювати в безпечне місце людей що були ушкоджені;
- повідомити за телефоном 101 в пожежну команду;
- видалити в безпечне місце неушкоджені електроприлади;
- приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння;
- повідомити керівництво університету про те, що сталося;
- електроприлади гасити вуглекислотними вогнегасниками, порошковими вогнегасниками або сухим піском;
- гасити електроприлади і дроти водою забороняється.

В разі ураження електричним струмом слід негайно знеструмити електроприлади і викликати швидку допомогу по телефону 103. Співробітники, що працюють в лабораторії, зобов'язані знати заходи надання першої допомоги людині, яка була ушкоджена при ураженні електричним струмом і уміти надати її при необхідності.

Негайно повідомити про нещасний випадок керівництво лабораторії, декана факультету.

## ВИСНОВКИ

1. Для АрДЗ корозійно-стійких сталей аустенітного класу товщиною від 1,5 до 3 мм розроблена чисельна модель теплопередачі в пакеті ANSYS / Multiphysics з експериментальними коефіцієнтами, що описує вплив режимів зварювання і тепловідведення в мідну підкладку на ширину зварного шва стикових з'єднань з лицьової і зворотного боку в області допустимих значень, що відповідають ГОСТ 14771-76.

2. Встановлено, що термічна провідність на границі «сталевий зразок-мідна підкладка» і «сталевий зразок-латунний притискач» відображає реальні умови зварювання з похибкою 5-7% і може бути застосована для інженерних розрахунків.

3. В результаті чисельного моделювання визначено величину тепловіддачі в мідну підкладку для максимальної та мінімальної погонної енергії  $q_{\text{п}}$  при зварюванні корозійно-стійких сталей аустенітного класу з товщиною  $\delta = 1,5; 2,0$  і  $3,0$  мм, яка лежить в межах  $(0,31-0,36)q_{\text{п}}$ ;  $(0,27-0,32)q_{\text{п}}$  та  $(0,21-0,24)q_{\text{п}}$  відповідно.

4. Показано, що при зварюванні корозійно-стійких сталей аустенітного класу товщиною 1,5 і 2,0 мм для канавки шириною 8 і 6 мм величина тепловіддачі в мідну підкладку практично однакова, але для товщини сталевих зразка 3 мм величина тепловіддачі зростає на 25% при зміні ширини канавки з 8 мм до 6 мм.

5. В результаті комп'ютерного моделювання отримані кількісні взаємозв'язки режимів АрДЗ корозійно-стійких сталей аустенітного класу товщиною від 1,5 до 3,0 мм без присадки і ширини зварного шва при АрДЗ з урахуванням геометрії мідної підкладки і величини шорсткості листового матеріалу.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Акулов А.И., Гусаков Г.Н. О формировании шва при автоматической аргонодуговой сварке на весу неплавящимся электродом // Сварочное производство. 1974. № 3. С. 16-18.
2. Акулов А.И., Гладков Э.А., Юхин Н.А. Процессы саморегулирования по скрытой составляющей длины дуги при сварке неплавящимся электродом в аргоне // Сварочное производство. 1974. № 7. С. 1-3.
3. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.И. Технология и оборудование сварки плавлением: Учебник для студентов вузов. - М.: Машиностроение, 1977. 432 с.
4. Антонец Д.П., Псарас Г.Г. Экспериментальное определение веса, формы и размеров сварочной ванны // Сварочное производство. 1970. № 5. С. 11-13.
5. Исследование стабильности геометрических характеристик сварного соединения при длительной работе вольфрамового электрода / В.В. Атрощенко [и др.] // Сварка и диагностика. 2011. № 6. С. 40-42.
6. Влияние геометрии лантанированного вольфрамового катода на стабильность глубины проплавления при сварке в аргоне / В.В. Атрощенко [и др.] // Сварочное производство. 2012. № 2. С. 29-33.
7. Численное моделирование формы проплавления при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом на медной подкладке / В.В. Атрощенко // Вестник УГАТУ. 2012. Т.16, №8 (53). С. 89-94.
8. Бабкин А.С., Епифанцев Л.Т. Методика расчета оптимальных параметров дуговой сварки и наплавки // Сварочное производство. 2004. № 2. С. 3-6.
9. Оптимизация основных факторов при построении статистических моделей процесса сварки плавлением / Б.Н. Бадьянов // Сварочное

производство. 1982. №6. С. 31-32.

10. Зависимость между током, скоростью сварки и толщиной материала, установленная по литературным данным / Б.Н. Бадьянов // Автоматическая сварка. 1982. № 7. С. 72-73.

11. Барашков А.С., Шоршоров М.Х. К оценке эффективного радиуса подвижного нормально-кругового источника на поверхности плоского слоя по ширине зоны проплавления // Сварочное производство. 1990. № 8. С. 12-14.

12. Беленький В.Я., Язовских В.М., Трушников Д.Н. Тепловые процессы при электронно-лучевой сварке круговых швов // Сварка и диагностика. 2012. № 5. С. 25-30.

13. Березовский Б.М., Стихин В.А. Расчет параметров распределения теплового потока поверхностной сварочной дуги // Сварочное производство. 1980. № 2. С. 17-19.

14. Березовский Б.М., Прохоров В.К., Суздаев И.В. Влияние параметров режима сварки на форму и размеры кратера сварочной ванны и толщину жидкой прослойки под дугой // Сварочное производство. 1988. № 8. С. 34-35.

15. Букаров В.А. Разработка моделей управления дуговой сваркой в защитных газах // Сварочное производство. 1997. № 2. С. 13-17.

16. Определение влияния теплоотода в медную подкладку на проплавление тонколистовых материалов при аргонодуговой сварке / В.М. Бычков [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т.14, №1. С. 349-353.

17. Варламов И.В. Программирование режима аргонодуговой сварки трубок неплавящимся электродом // Сварочное производство. 1961. № 6. С. 5-9.

18. Гладков Э.А., Чернышов Г.Г. Математические модели при исследовании, расчете и проектировании сварочных процессов. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1981. 109 с.

19. Гладков Э.А., Малолетков А.В., Ден Оуден Г. Оценка экспериментальных данных с помощью экспертных систем типа нейросеть // Сварочное производство. 1995. № 3. С. 31-33.

20. Гладков Э.А. Задачи прогнозирования качества и управления формированием шва в процессе сварки с использованием нейросетевых моделей // Сварочное производство. 1996. № 10. С. 36-41.

21. Гладков Э.А., Малолетков А.В., Перковский Р.А. Прогнозирование качества сварных соединений при дуговой сварке неплавящимся электродом с помощью нейросетевых моделей // Сварочное производство. 1997. № 8. С. 7-10.

22. Гришеленок Д.А., Ковель А.А. Использование результатов математического планирования эксперимента при формировании обучающей выборки нейросети // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 4. С. 51-54.

23. Численное моделирование процесса лазерной сварки стыковых соединений сталей толщиной 1...12 мм / А. Г. Григорьянц [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2005. №3. С. 67-87.

24. Джальуд Ф. Влияние остаточных сварочных напряжений на прочность и ресурс конструкций чопов для ремонта магистральных нефтепроводов // Сварка и диагностика. 2012. № 2. С. 30-33.

25. Ерофеев В.А. Прогнозирование качества сварных соединений на основе физико-математической модели процесса орбитальной сварки // Сварочное производство. 2005. № 2. С. 8-16.

26. Ерофеев В.А., Логвинов Р.В. Особенности использования эквивалентного источника теплоты при учете деформаций и напряжений в процессе электронно-лучевой сварки // Сварка и диагностика. 2010. № 4. С. 22-26.

27. Ерохин А.А., Ищенко Ю.С. Расчет размеров и веса ванны при сварке со сквозным проплавлением // Автоматическая сварка. 1967. № 2. С.6-8.

28. Ерохин А.А., Букаров В.А., Ищенко Ю.С. Расчет режимов

автоматической сварки стыковых соединений с заданной величиной проплавления // Сварочное производство. 1971. № 2. С. 20-23.

29. Жандарев А.П., Кудрявцев М.А., Руктешель Ф.С. К расчету размеров обратного валика при сварке на весу // Сварочное производство. 1982. № 6. С. 10-12.

30. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1990. 367 с.

31. Ищенко Ю.С., Гречишкин В.И. Оценка веса сварочной ванны и геометрических размеров зоны проплавления // Автоматическая сварка. 1966. №11. С. 11-15.

32. Казимиров А.А., Недосека А.Я., Лобанов А.И. Расчет температурных полей в пластинах при электросварке плавлением: Справочник. Киев: Наукова Думка, 1968. 840 с.

33. Каплун А. Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство (2-е изд.). М.: УРСС, 2004. 269 с.

34. Модели источников теплоты для прогнозирования тепловых полей при сварке плавлением / В.А. Кархин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2008. № 3. С. 55-63.

35. Колдаев В.Д. Численные методы и программирование / Под ред. Л.Г. Гагариной. – М.: ИД «Форум» - Инфра-М, 2009. 336 с.

36. Косяков В.А., Сараев Ю.Н. Математическое моделирование технологических процессов импульсной аргодуговой сварки неплавящимся электродом // Сварочное производство. 1997. № 4. С. 16-19.



## ДОДАТКИ