

ОСОБЛИВОСТІ ПОПЕРЕДНЬОГО НАГРІВУ ОПОРОМ ПРИ КОНТАКТНОМУ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ОПЛАВЛЕННЯМ ТОВСТОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

К.В. Гушин¹, І.В. Зяхор¹, С.М. Самотрясов¹, М.С. Завертанний¹, А.М. Левчук¹, Wang Qichen²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²СІМС Offshore Engineering Institute Company Limited, Yantai, Shandong, P.R. China

Запропоновано та розрахунковим шляхом обґрунтовано технологічну концепцію контактної стикової зварювання оплавленням з попереднім нагріванням опором з використанням багаторазової проміжної вставки з матеріалу з високим електричним опором. Розрахункові та експериментальні результати свідчать про значний ефект використання проміжної вставки при нагріванні опором – суттєво підвищується температура в обох характерних точках при всіх досліджуваних значеннях щільності струму, товщини вставки і часу нагрівання. Зазначений ефект досягається шляхом інтенсифікації та локалізації процесу тепловиділення в зоні контакту деталей і відповідного зменшення втрати енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: контактне стикове зварювання оплавленням, нагрівання опором, алюмінієвий сплав, математичне моделювання, температурне поле

Вступ. Ефективною технологією нерознімного з'єднання при виготовленні силових елементів літальних апаратів з прямолінійних (стрингери) і кільцевих (обичайки) заготовок, пресованих профілів розвиненого і компактного перерізу (шпангоути) є контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО). Цей спосіб забезпечує високу стабільну якість з'єднань, об'єднує в єдиному циклі складальні та зварювальні операції, не вимагає застосування допоміжних витратних матеріалів [1–3]. При зварюванні заготовок алюмінієвих сплавів товщиною до 12 мм технологія КСЗО забезпечує високі показники міцності та якісне (бездефектне) з'єднання при незначній ширині зони термічного впливу (ЗТВ).

При КСЗО профілів з алюмінієвих сплавів більшої товщини необхідно виконувати попереднє нагрівання заготовок опором шляхом пропускання електричного струму високої щільності з наступним розведенням заготовок і виконанням оплавлення і осадки.

Технологію КСЗО з попереднім нагріванням опором широко використовують в різних галузях промисловості, зокрема для з'єднання деталей різноманітної товщини та конфігурації зі сталей різних класів [4–7]. При КСЗО залізничних рейок застосовують попереднє нагрівання імпульсами струму [4, 5] (рис. 1, а), щоб забезпечити відведення тепла від торців углуб заготовок. Для більш ефективного нагрівання опором заготовок з алю-

мінієвих сплавів, які мають високі значення електро- та теплопровідності, використовують безперервне пропускання струму [1–3] (рис. 1, б).

Такий процес нагрівання має низькі енергетичні показники, а його тривалість досягає 80 % загальної тривалості зварювання [1]. Крім того, для забезпечення формування бездефектних з'єднань зі збільшенням товщини зварюваних заготовок зростають необхідні температури попереднього нагрівання опором. Зокрема, в роботі [2] показано, що при КСЗО сплаву 2219 оптимальні умови деформації при осадці забезпечуються при нагріванні контактної зони на ділянці інтенсивної деформації до температури близько 400 °С. Необхідність підвищення температури попереднього нагрівання опором обумовлює додаткову витрату енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини, при цьому збільшується тривалість етапу нагрівання опором, що призводить до збільшення ширини ЗТВ зварних стиків і негативно впливає на механічні та експлуатаційні властивості зварних виробів з алюмінієвих сплавів.

Підвищення ефективності попереднього нагрівання опором, зменшення його тривалості та втрати енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини є актуальною проблемою, розв'язання якої забезпечить суттєву економію енергії та підвищення механічних властивостей зварних з'єднань виробів з високоміцних алюмінієвих сплавів.

Гушин К.В. – <https://orcid.org/0000-0003-3298-4537>, Зяхор І.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7780-0688>,

Самотрясов С.М. – <https://orcid.org/0000-0003-4891-9625>, Завертанний М.С. – <https://orcid.org/0000-0002-8415-8555>,

Левчук А.М. – <https://orcid.org/0000-0002-0361-7394>

© К.В. Гушин, І.В. Зяхор, С.М. Самотрясов, М.С. Завертанний, А.М. Левчук, Wang Qichen, 2022

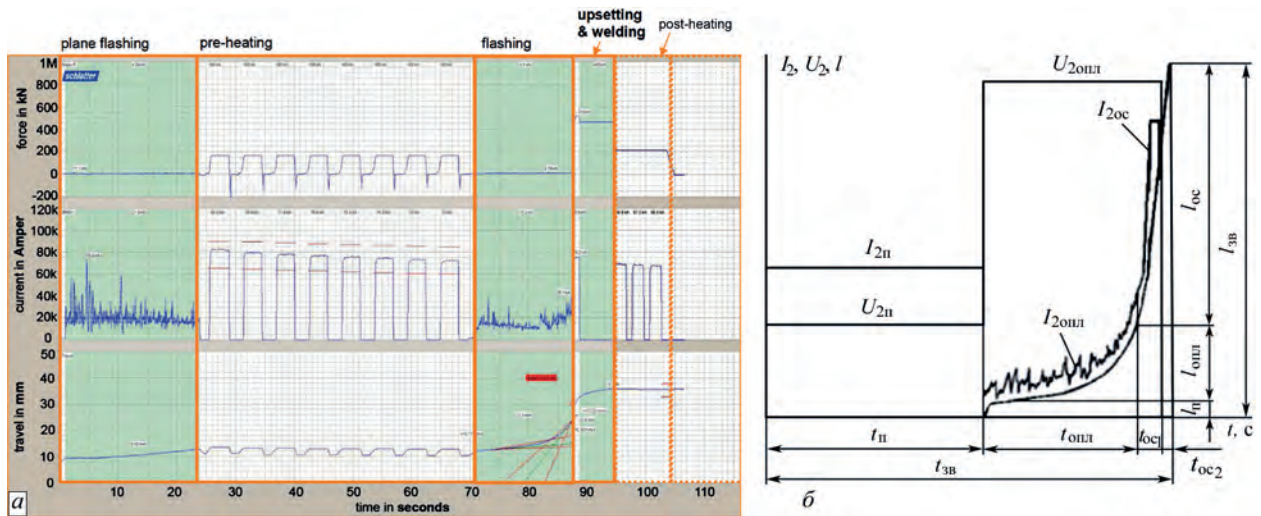


Рис. 1. Циклограми процесу КСЗО з попереднім нагріванням імпульсами (а) струму [5] і безперервним (б) пропусканням струму [2]

Відомі технічні рішення, в яких для підвищення ефективності нагрівання при КСЗ опором використовують проміжний прошарок у вигляді композитної вставки, зокрема при зварюванні сталеві арматури [8], а також у вигляді нанощаруватої фольги (НФ), зокрема при зварюванні алюмінідів титану в одно- [9] та різнорідному [10] з'єднаннях.

В роботі [8] при КСЗ опором сталеві арматури проміжним прошарком була офлюсована композитна вставка із профільованого листа з низьковуглецевої сталі, що дозволило локалізувати процес виділення тепла в зоні контакту. Показано, що при пропусканні струму через стик із вставкою, яка має більш високий питомий опір, відбувається її інтенсивне нагрівання та розплавлення. При цьому забезпечується локалізація тепловиділення порівняно з традиційним способом нагрівання опором, що сприяє формуванню якісних з'єднань при меншій ширині ЗТВ, ніж при зварюванні без використання проміжного прошарку.

Автори [9, 10] досліджували особливості формування одно- та різнорідних з'єднань сплаву $Ti-46Al-2Cr-2Nb$ на основі алюмініду титану $\gamma-TiAl$ при КСЗ опором, зокрема, з використанням проміжних прошарків у вигляді НФ. В роботі зазначено, що наявність НФ у зоні контакту сприяє утворенню тонкого шару рідкої фази на початковій стадії процесу нагрівання, локалізації процесу тепловиділення, активації поверхонь обох сплавів при значно меншій тривалості стадії нагрівання порівняно із зварюванням без використання проміжного прошарку.

У роботах [8–10] проміжною вставкою були тонкі фольги, що розплавляються в процесі зварювання і переважно витісняються із зони контакту при осадці, але частково можуть залишатись у зварних з'єднаннях, суттєво впливаючи на їхні механічні властивості.

На відміну від розглянутих вище схем використання одноразової вставки, яка залишається в

стику, для попереднього нагрівання опором при КСЗО запропоновано застосувати багаторазову вставку з матеріалу з високими показниками температури плавлення та омичного опору. Запропоновано технологічну концепцію КСЗО з використанням багаторазової проміжної вставки, яка деякою мірою аналогічна процесу зварювання встик нагрітим інструментом полімерних матеріалів [11]. Однак вона суттєво відмінна, оскільки виділення тепла відбувається як у вставці, так і в зварювальних деталях, і процес формування температурного поля залежить від електричних, а також теплових процесів з урахуванням їхньої складної взаємодії.

Мета роботи – встановити можливість підвищення ефективності процесу попереднього нагрівання опором при КСЗО алюмінієвих сплавів шляхом інтенсифікації та локалізації процесу тепловиділення в зоні контакту заготовок при використанні проміжної вставки з матеріалу з високим омичним опором.

Методи досліджень, методика, матеріали, устаткування. В роботі використовували розрахункові та експериментальні методи досліджень, зокрема проводили розрахунок термічних циклів і визначення температурних полів у зоні контакту заготовок за допомогою математичного моделювання процесу нагрівання та емпіричним методом при проведенні експериментів у лабораторних умовах.

Експерименти проводили на модернізованій машині для КСЗО K607 з переобладнаним зварювальним контуром, де джерелом живлення використано зварювальний трансформатор потужністю 75 кВ·А, розміщений безпосередньо під струмопідвідними затискачами машини.

Для проведення дослідних зварювань використовували зразки з алюмінієвого сплаву 2219 з поперечним перерізом 32×60 мм. Проміжною вставкою слугували пластини з аустенітної сталі 12X18N10T товщиною 7 мм. Експериментально температурні поля досліджували за допомогою

комп'ютеризованої системи реєстрації температури на базі 8-канального USB-модуля для термопар Advantech USB-4718 з використанням термопар хромель-алюмель діаметром 0,5 мм.

На рис. 2 наведено програму зміни параметрів режиму КСЗО, яка передбачає послідовну зміну чотирьох основних етапів нагрівання перед формуванням зварного з'єднання при осадці. Між I і II етапами виконують розведення зварювальних деталей і затискання проміжної вставки між ними, а між II і III етапами – відповідно розведення деталей і виведення вставки із зазору між ними.

Схему розташування проміжної вставки між зварюваними деталями, яка пропонується в даній роботі, наведено на рис. 3. При такій схемі нагрівання кількість теплоти dQ , що виділяється у деталях при нагріванні опором за проміжок часу dt згідно з законом Джоуля–Ленца, можна представити як

$$dQ = I_{зв}^2 (R_{вст} + R_{дет} + 2R_k) dt, \quad (1)$$

де $I_{зв}$ – зварювальний струм; $R_{вст}$ – електричний опір вставки; $R_{дет}$ – електричний опір зварюваних деталей; R_k – перехідний опір контактів між деталями та вставкою.

Розрахункове дослідження процесу нагрівання опором. При КСЗО з попереднім нагріванням опором суттєвим є досягнення певного значення температури в зоні інтенсивної деформації.

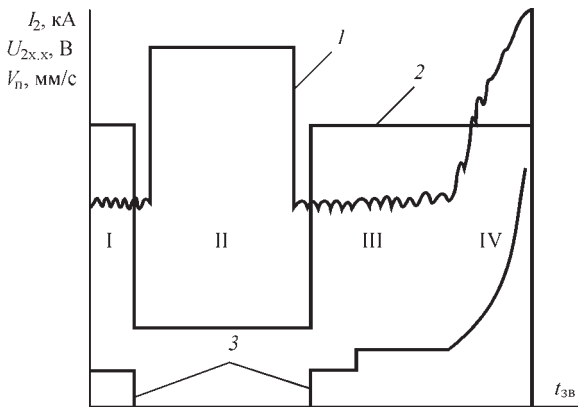


Рис. 2. Програма зміни параметрів процесу КСЗО з попереднім нагріванням опором з використанням проміжної вставки: I – попереднє оплавлення; II – нагрівання опором через проміжну вставку; III – оплавлення при постійній швидкості; IV – інтенсивне оплавлення (форсування) перед осадкою; 1 – зварювальний струм $I_{зв}$; 2 – вторинна напруга холостого ходу зварювального трансформатора $U_{2х,х}$; 3 – переміщення рухомої колони зварювальної машини $V_{п}$

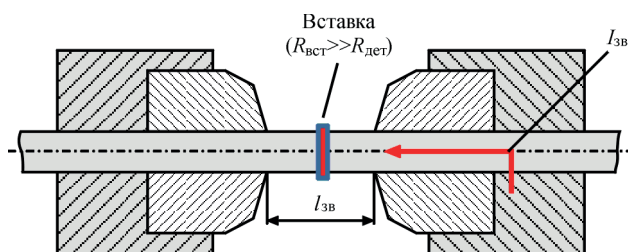


Рис. 3. Схема процесу нагрівання опором через проміжну вставку в струмопідвідних затискачах машини для КСЗО ($l_{зв}$ – припуск на зварювання)

Оптимальні умови формування зварного з'єднання при осадці створюються за умови рівності меж плинності та міцності матеріалу заготовок в зоні деформації [2]. У даному випадку забезпечується отримання зварних з'єднань з мінімальним рівнем внутрішніх напружень за відсутності мікротріщин та інших дефектів. При КСЗО з примусовим формуванням ширина зони інтенсивної деформації практично співпадає зі значенням припуску на осадку, тому оптимальні умови деформації заготовок із сплаву 2219 створюються при температурі близько 400 °С [2].

Для оптимізації температурного поля при попередньому нагріванні заготовок опором суттєвим є досягнення заданої температури в характерних точках, а саме: першій – на торцях заготовок (зона контакту) і другій – на відстані близько 30 мм від зони контакту. Це значення, яке визначали на основі попереднього практичного досвіду по КСЗО товстостінних деталей з алюмінієвих сплавів, відповідає половині встановленого значення загального припуску на зварювання $l_{зв} = 60$ мм ($l_{зв}/2 = 30$ мм), тобто друга характерна точка після виконання процесів оплавлення і осадки буде знаходитись у площині зварного з'єднання.

Критерієм ефективності нагрівання опором вважали досягнення заданої температури в характерних точках деталей за найменший час при заданому значенні щільності струму. З точки зору стабільності етапів оплавлення при постійній швидкості та інтенсивного оплавлення (див. рис. 2, III і IV етапи) бажаним результатом попереднього нагрівання опором є досягнення у першій із характерних точок (зоні контакту) найбільшого можливого значення температури, але не менше 150...200 °С [1, 12]. Критерієм достатнього нагрівання опором деталей вважали досягнення температури 150 °С у другій з характерних точок (на відстані 30 мм від зони контакту). У цьому випадку в процесі наступних етапів КСЗО досягається поступове нагрівання деталей до температури 400 °С у зоні деформації між формуючими пристроями зварювальної машини і забезпечуються необхідні умови для формування бездефектних зварних з'єднань при осадці.

Процес формування температурного поля при КСЗО обумовлений складним розподілом джоулевих джерел теплоти. Теплопередача, яка поряд з тепловідведенням формує поле температур у металі, здійснюється кондуктивним шляхом. Теплопровідність металу, його питомий електричний опір та інші фізичні властивості суттєво залежать від температури. Сила зварювального струму, що визначає інтенсивність теплового впливу на метал, залежить від напруги холостого ходу, опору зварюваних деталей і внутрішнього опору машини для контактного зварювання. Тому

адекватна математична модель процесу формування температурного поля при контактному нагріванні повинна включати опис електричних і теплових процесів у зварюваному металі з урахуванням їхньої складної взаємодії. Сила зварювального струму (щільність струму) повинна задаватися на основі експериментальних даних. Виділення тепла визначається розрахунковим шляхом з урахуванням електричного опору зони зварювання, а властивості металу в кожній точці розрахункової області необхідно задавати відповідно до поточно-го розподілу температурного поля деталі.

На відміну від переважно об'ємного тепловиділення у заготовках між струмопідвідними застискачами зварювальної машини при нагріванні опором без вставки (перехідний опір контакту між деталями з алюмінієвих сплавів незначний), при нагріванні опором через вставку з'являється додаткове джерело тепловиділення, яке може бути лінійним (при незначній товщині вставки, зокрема при використанні тонкої фольги) або об'ємним (при використанні пластини товщиною кілька міліметрів). В останньому випадку температурне поле у нагрітих деталях буде формуватись за законом, близьким до експоненти.

Розрахункову схему для випадку однорічної задачі наведено на рис 4.

Розподілом температури в поперечному перерізі зварюваних заготовок для спрощення розрахунку можна знехтувати. Виходячи з цього завдання вирішується в одновимірній постановці. Одновимірне нестационарне рівняння теплопровідності для випадку одновимірного завдання в декартових координатах має вигляд [13]

$$c(T)\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + q_v, \quad (2)$$

де T – температура, К; t – час, с; q_v – об'ємна щільність внутрішніх джерел тепла, Вт/м³.

Проведено дискретизацію розрахункової області, яка полягає в заміні безперервної області визначення та безперервної області значення функції на відповідні дискретні області. У нашому нестационарному завданні необхідно провести дискретизацію як просторової розрахункової області, так і часової. За початок відліку оберемо один з торців деталей, що нагрівається.

Виділимо на відрізку осі x точку x_i , $i = 0 \dots 1, \dots, n-1, n$. Прийmemo, що відстань між двома су-

сідніми точками дискретизації x_i та x_{i+1} , рівна кроку дискретизації h , буде однаковою, тобто дискретизація розрахункової області рівномірна. При цьому кожній точці дискретизації x_i відповідає значення температури t_i .

Зварний зразок має поперечний переріз з розмірами $a \times b$, тому об'єм одного елемента визначається за формулою $a \times b \times h$. Якщо попередньо не враховувати нелінійність теплофізичних властивостей деталей, що нагріваються (залежності $\lambda(T)$, $c(T)$ і $\gamma(T)$), тоді нелінійність завдання полягатиме лише в урахуванні залежності щільності потужності джерела джоулевого тепла $q_{дж}$:

$$q_{дж}(T) = \frac{I^2 \rho(T) h}{ab h(ab)} = \frac{I^2 \rho(T)}{a^2 b^2}, \quad (3)$$

де $\rho(T)$ – температурна залежність питомого електричного опору деталей.

З урахуванням виразу (2) запишемо апроксимацію вихідного диференціального рівняння теплопровідності (1) для i -ї просторової точки та j -го моменту часу

$$c_i(T_i^*) \gamma_i(T_i^*) \frac{T_i - T_i^*}{t - t^*} = \frac{2}{(x_{i+1} - x_{i-1})} \times \left[\lambda_{i+1}(T_{i+1}^*) \frac{T_{i+1} - T_i}{x_{i+1} - x_i} - \lambda_i(T_i^*) \frac{T_i - T_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right] + \frac{I^2 \rho_i(T_i^*)}{a^2 b^2}, \quad (4)$$

де T_i^* – температура в розрахунковому вузлі на попередньому часовому кроці (величина кроку – Δt); $c_i(T_i^*)$, $\gamma_i(T_i^*)$, $\lambda_i(T_i^*)$ – температурна залежність відповідно теплоємності, щільності та теплопровідності деталей, що нагріваються.

Для розрахунку температурного поля в математичну модель вводять такі вхідні дані: геометричні розміри зварюваних деталей та товщину проміжної вставки; теплофізичні характеристики алюмінієвого сплаву та матеріалу проміжної вставки (таблиця). Основними вхідними параметрами режиму нагрівання є щільність струму та час нагрівання.

З використанням розробленої математичної моделі проведено розрахунок температурних полів при нагріванні опором заготовок алюмінієвого сплаву 2219 перерізом 32×60 мм залежно від товщини проміжної вставки $h_{вст}$ зі сталі 12X18H10T при часі нагрівання $t_H = 60$ с (рис. 5) та різній щільності струму J при $t_H = 40$ с (рис. 6).

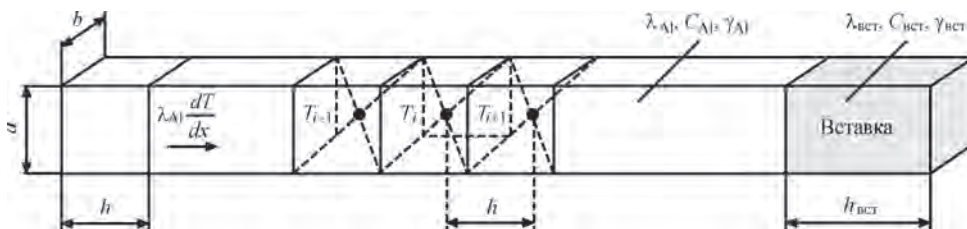


Рис. 4. Схема сітки розрахункової моделі

Теплофізичні характеристики сталі 12Х18Н10Т та сплаву 2219

T, °C	12Х18Н10Т			Сплав 2219		
	λ, Вт/(м·К)	c, Дж/(кг·К)	ρ·10 ⁻⁹ , Ом·м	λ, Вт/(м·К)	c, Дж/(кг·К)	ρ·10 ⁻⁹ , Ом·м
20	15	450	725	130	0,8	55,3
100	16	462	792	142	0,86	62,4
200	18	496	861	155	0,92	72,2
300	19	517	920	163	1,05	77,2
400	21	538	976	167	1,05	85,6
500	23	550	1028	-	-	-
600	25	563	1075	-	-	-
700	27	575	1115	-	-	-

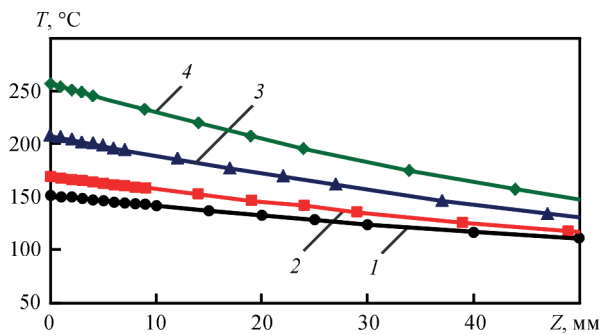


Рис. 5. Розрахункові температурні поля при нагріванні опором через проміжну вставку із сталі 12Х18Н10Т товщиною $h_{вст} = 2$ (2), 6 (3), 12 (4) мм та без вставки (1) ($h_{вст} = 0$ мм) для щільності струму $J = 10$ А/мм² і $t_{н} = 60$ с (Z – відстань від торців деталей)

За одержаними даними побудовано залежність температури характерних точок зварного з'єднання від щільності струму при нагріванні опором без вставки та з використанням проміжної вставки із сталі 12Х18Н10Т (рис. 7).

Аналіз отриманих розрахункових температурних полів (рис. 5) показує, що при нагріванні опором без вставки деталей сплаву 2219 перерізом 32×60 мм за час до $t_{н} = 60$ с при щільності струму $J = 7,5$ і 10 А/мм² не забезпечується досягнення заданої температури в характерних точках деталей – у зоні контакту і на відстані 30 мм від торців. Необхідний для формування якісних з'єднань розподіл температур при нагріванні опором без вставки досягається при щільності струму $J \geq 12,5$ А/мм² (рис. 6, а), що на практиці обумовлює значні втра-

ти енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини і необхідність використання джерела живлення високої потужності.

Результати розрахунків, наведені на рис. 5 і 6, б, свідчать про значний ефект використання проміжної вставки при нагріванні опором – суттєво підвищується температура в обох характерних точках при всіх досліджуваних значеннях щільності струму, товщини вставки і часу нагрівання. Встановлено, що ефективність процесу нагрівання опором через проміжну вставку залежить від її товщини: заданий розподіл температур в деталях із сплаву 2219 при щільності струму $J = 10$ А/мм² і часі нагрівання $t_{н} = 60$ с досягається при $h_{вст} \geq 6$ мм.

Для заданої товщини вставки ефективність процесу нагрівання збільшується зі зростанням щільності струму J (рис. 6, б), зокрема заданий розподіл температури в деталях при $h_{вст} = 7$ мм і часі нагрівання $t_{н} = 40$ с досягається для всіх досліджуваних значень щільності струму J , за винятком $J = 7,5$ А/мм². Слід зазначити значне зростання температури в зоні контакту для всіх значень досліджуваних параметрів при нагріванні через вставку, зокрема при $J = 12,5 \dots 15$ А/мм² до $T = 300 \dots 420$ °C порівняно з $T = 180 \dots 270$ °C при нагріванні без вставки. Останній факт особливо важливий з точки зору стабільності етапів оплавлення при постійній швидкості (див. рис. 2, II етап) та інтенсивного оплавлення перед осадкою (IV етап), і з практичної точки зору дає можли-

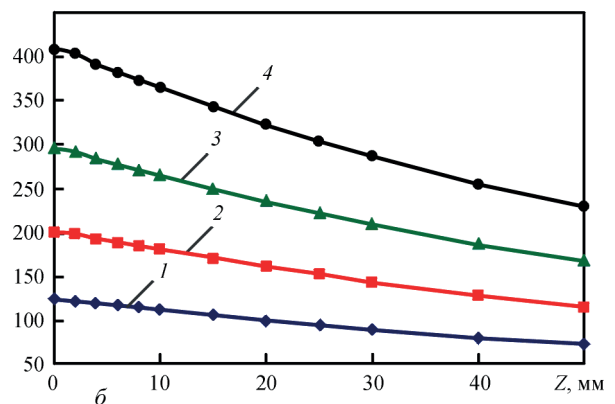
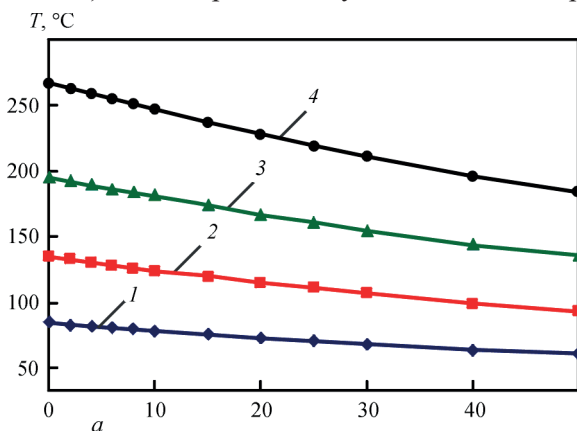


Рис. 6. Розрахункові температурні поля при нагріванні опором без вставки (а) та через проміжну вставку із сталі 12Х18Н10Т товщиною $h_{вст} = 7$ мм (б) при $t_{н} = 40$ с і щільності струму $J = 7,5$ (1), 10 (2), 12,5 (3), 15 (4) А/мм²

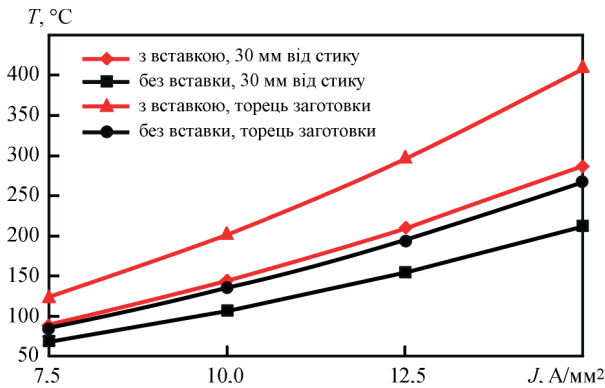


Рис. 7. Розрахункова залежність температури характерних точок зварного з'єднання від щільності струму J при нагріванні опором з використанням проміжної вставки із сталі 12X18H10T та без неї

вість гарантувати відсутність дефектів зварювання (непроварів, оксидних плівок, матових плям) при суттєво меншій потужності джерела живлення зварювальної машини.

Отримані результати підтверджують припущення, що при нагріванні опором через вставку з'являється додаткове об'ємне джерело тепловиділення, яке забезпечує більш швидке нагрівання металу в обох характерних точках – в зоні інтенсивної деформації при осадці та зоні контакту деталей, і обумовлює зменшення втрати енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини.

Експериментальне дослідження процесу нагрівання опором. Експерименти з дослідження термічних циклів нагрівання опором деталей перерізом 32×60 мм з алюмінієвого сплаву 2219 проводили при вторинній напрузі трансформатора $U_{2xx} = 3$ В. Термопари хромель-алюмель діаметром 0,5 мм встановлювали в деталі на відстані 5, 10, 20 та 30 мм від торців з внутрішньої сторони вторинного контуру зварювальної машини. Виконували безпосереднє нагрівання деталей (без вставки) і через проміжну вставку із сталі 12X18H10T при щільності струму близько 10 A/mm^2 і часі нагрівання $t_n = 40$ і 85 с. Виходячи з результатів розрахунків, що свідчать про доцільність використання вставки при її товщині $h_{вст} \geq 6$ мм, експериментальне дослідження температурних полів проводили при $h_{вст} = 7$ мм.

Результати експериментів показують, що без застосування проміжної вставки при заданих енергетичних параметрах режиму попереднього нагрівання не вдалось досягнути необхідного розподілу температурного поля за час $t_n = 40$ і 85 с (рис. 8, криві 2, 3). При $t_n = 85$ с процес нагрівання практично перейшов у квазістаціонарний стан. Температура в зоні контакту при $t_n = 85$ с становила близько 170 °С, а на відстані 30 мм – 140 °С. При нагріванні деталей через вставку із сталі 12X18H10T суттєво підвищується температура в обох характерних точках і розподіл температур, не-

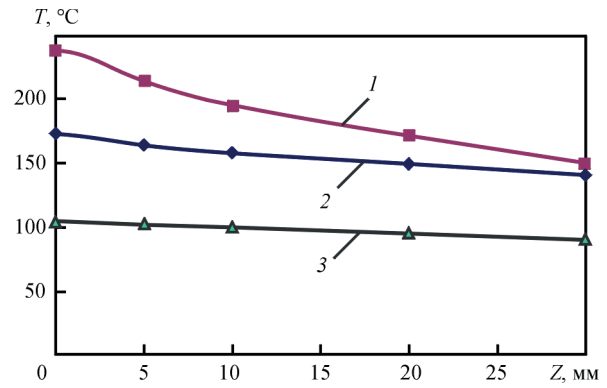


Рис. 8. Температурні поля при попередньому нагріванні опором з використанням проміжної вставки із сталі 12X18H10T товщиною $h_{вст} = 7$ мм (1) та без вставки (2, 3) при часі нагрівання $t_n = 40$ (1, 3) і 85 с (2)

обхідний для проведення наступних етапів оплавлення, досягається за час $t_n = 40$ с (рис. 8, крива 1).

Варто відзначити значне зростання температури в зоні контакту при нагріванні через вставку при $t_n = 40$ с, і значно вищий градієнт температурного поля порівняно з нагріванням без вставки при $t_n = 85$ с. Експериментально встановлене зростання температури в зоні контакту особливо важливе з точки зору стабільності етапів оплавлення і запобігання утворенню дефектів у зварних з'єднаннях. При КЗСО термічнозміцнених сплавів зменшення тривалості етапу нагрівання опором сприяє мінімізації негативних структурних і фазових перетворень у зоні термічного впливу і обумовлює збереження на більш високому рівні показників міцності, корозійної стійкості та інших експлуатаційних властивостей зварних виробів [12].

Експериментальне дослідження температурних полів у деталях із сплаву 2219 при їхньому нагріванні опором з використанням проміжної вставки із сталі 12X18H10T при $t_n = 40 \dots 85$ с свідчить про інтенсифікацію та локалізацію процесу тепловиділення в зоні контакту порівняно з процесом нагрівання без вставки і підтверджують дані розрахунків відповідно до запропонованих узагальнень.

Отже, результати розрахунків та експериментального дослідження температурних полів свідчать про підвищення ефективності процесу попереднього нагрівання опором при КЗСО алюмінієвих сплавів при використанні проміжної вставки з матеріалу з високим електричним опором. Зазначений ефект досягається за допомогою інтенсифікації та локалізації процесу тепловиділення в зоні контакту деталей і відповідного зменшення «нераціональної» втрати енергії на нагрівання вторинного контуру зварювальної машини.

Висновки

1. Запропоновано технологічну концепцію контактного стикового зварювання оплавленням (КЗСО) товстостінних деталей з алюмінієвих спла-

вів з попереднім нагрівання опором з використанням багаторазової проміжної вставки. Розрахунковим шляхом досліджували ефективність процесу попереднього нагрівання опором при КСЗО алюмінієвого сплаву 2219 при використанні проміжної вставки із сталі 12Х18Н10Т. Критерієм ефективності нагрівання опором вважали досягнення заданої температури в характерних точках деталей – у зоні контакту і на відстані 30 мм від торців деталей за найменший час при заданому значенні щільності струму.

2. Встановлено, що порівняно з безпосереднім нагріванням деталей опором при використанні проміжної вставки із сталі 12Х18Н10Т суттєво підвищується температура в обох характерних точках при всіх досліджуваних значеннях щільності струму, товщини вставки і часу нагрівання.

3. Для заданої товщини вставки $h_{вст}$ в досліджуваному діапазоні $h_{вст} = 2...12$ мм ефективність процесу нагрівання збільшується зі зростанням щільності струму J , а при заданому значенні J в діапазоні $J = 7,5...15$ А/мм² – при збільшенні товщини вставки.

4. Встановлено суттєве зростання градієнта температурного поля в деталях при нагріванні через вставку: температура в зоні контакту при $J = 12,5...15$ А/мм² становила $T = 300...420$ °С порівняно з $T = 180...270$ °С при нагріванні без вставки. Зазначений результат важливий з точки зору стабільності наступних етапів оплавлення при КСЗО і з практичної точки зору дає можливість гарантувати відсутність дефектів зварювання при суттєво меншій потужності джерела живлення зварювальної машини.

5. Експериментальне дослідження температурних полів у деталях із сплаву 2219 при їхньому нагріванні опором з використанням проміжної вставки із сталі 12Х18Н10Т підтверджують розрахункові дані і свідчать про інтенсифікацію та локалізацію процесу тепловиділення в зоні контакту порівняно з процесом нагрівання без вставки.

Список літератури/References

1. Кучук-Яценко С.И. (1992) *Контактная стыковая сварка оплавлением*. Киев, Наукова думка.
2. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (1992) *Flash butt welding*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
3. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Chvertko, P.N., Semyonov, L.A. et al. (2010) Peculiarities of flash butt welding of high-strength aluminium alloy 2219. *The Paton Welding J.*, **3**, 7–9.
4. Кучук-Яценко С.И., Гушин К.В. (2018) *Контактная стыковая сварка оплавлением высокопрочных сплавов на основе алюминия. Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. Київ, Академперіодика.
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Gushchin, K.V. (2018) *Flash butt welding of high-strength aluminium-based alloys*. In: *Science of Materials: Achievements and Prospects*. Kyiv, Akadempriodyka [in Russian].
6. Weingrill, L., Krutzler, J., Enzinger, N. (2017) Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*, **879**, 2088–2093. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088.
7. <https://www.schlattergroup.com/en/welding-machines/flash-butt-welding-machines-for-rails/> [дата звернення 28.06.2022].
8. Патент CN103894717A (2014) *Preheating burnoff flash butt welding method for welding large-section steel vehicle wheels*. Patent CN103894717A (2014) *Preheating burnoff flash butt welding method for welding large-section steel vehicle wheels*.
9. Shi, S.-C., Wang, W.-C., Ko, D.-K. (2022) Influence of inclusions on mechanical properties in flash butt welding joint of high-strength low-alloy steel. *Metals*, **12**, 242, 1–13. DOI: 10.3390/met12020242.
10. Kuchuk-Yatsenko, V.S., Nakonechny, A.A., Sakhatsky, A.G. (2010) Resistance welding of steel reinforcement using composite insert. *The Paton Welding J.*, **4**, 34–36.
11. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Zyakhor, I.V., Chernobaj, S.V. et al. (2015) Structure of γ -TiAl joints in resistance butt welding with application of interlayers. *Ibid*, **9**, 5–12. DOI: 10.15407/tpwj2015.09.01.
12. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Zyakhor, I.V., Nakonechny, A.A. et al. (2018) Resistance butt welding of titanium aluminide γ -TiAl with VT5 alloy. *Ibid*, **9**, 2–6. DOI: 10.15407/tpwj2018.09.01.
13. Юрженко М.В. (2019) Новітній технологічний підхід зварювання «в замкнутому об'ємі» нагрітим інструментом встик полімерних багатошарових композитних труб. *Вісник ХНТУ. Інженерні науки*, **1**, 68, 65–72.
14. Iurzhenko, M.V. (2019) Novel technological approach to butt welding «in closed volume» with heated tool of polymer multilayer composite pipes. *Visnyk KhNTU. Inzhenerni Nauky*, **1** (68), 65–72 [in Russian].
15. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Hushchyn, K.V., Ziakhor, I.V. et al. (2021) Structure and mechanical properties of 2219-T87 aluminium alloy joints produced by flash butt welding. *The Paton Welding J.*, **8**, 27–32.
16. Ткаченко В.Н. (2008) *Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов*. Киев, Наукова думка.
17. Tkachenko, V.N. (2008) *Mathematical modeling, identification and control of technological processes of heat treatment of materials*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

FEATURES OF RESISTANCE PREHEATING AT FLASH-BUTT WELDING OF THICK-WALLED PARTS FROM ALUMINIUM ALLOYS

K.V. Hushchyn¹, I.V. Zyakhor¹, S.M. Samotryasov¹, M.S. Zavertannyi¹, A.M. Levchuk¹, Wang Qichen²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²CIMC Offshore Engineering Institute Company Limited, Yantai, Shandong, P.R. China

The technological concept of flash-butt welding with resistance preheating using a reusable intermediate insert of a material with a high electrical resistance is proposed and substantiated by calculation. Calculation and experimental results indicate a significant effect of using intermediate insert during resistance heating: the temperature at both characteristic spots grows significantly at all investigated values of current density, insert thickness and heating time. The specified effect is achieved by intensifying and localizing the process of heat generation in the contact area of parts and correspondingly reducing the energy loss for heating the secondary circuit of the welding machine. 13 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Key words: flash-butt welding, resistance heating, aluminum alloy, mathematical modeling, temperature field

Надійшла до редакції 22.08.2022