

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

Б.Р. Царик, О.Ф. Мужиченко, О.В. Махненко

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

Розроблено досить просту і ефективну математичну модель процесу зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП), спрямовану на оперативне визначення залишкових зварювальних напружень і деформацій з інженерною точністю. Модель базується на застосуванні методу термопружнопластичного деформування матеріалу, який використовується при моделюванні дугового зварювання, але замість моделі дугового джерела нагрівання розроблено модель тепловиділення від тертя робочого інструмента з матеріалом елементів з'єднання, а також в моделі враховано специфічні для ЗТП умови жорсткого закріплення елементів з'єднання під час зварювання. За допомогою розробленої моделі ЗТП проведено розрахунки для стикового з'єднання пластин з алюмінієвого сплаву АМгб та представлено результати характерного розподілу залишкових напружень та пластичних деформацій порівняно з дуговим зварюванням стикового з'єднання. Отримані за допомогою розробленої моделі розрахункові результати підтверджують висновки інших дослідників, що при ЗТП алюмінієвих сплавів також утворюються небажані залишкові напруження та деформації, але вони нижчі, ніж при традиційних дугових способах зварювання. Розроблену модель можна ефективно використовувати для оперативного розрахункового визначення залишкових напружень та пластичних деформацій у зоні зварних з'єднань, виконаних ЗТП, з метою подальшої оцінки міцності зварних з'єднань або прогнозування загальних деформацій великогабаритних конструкцій. Намічено шляхи подальшого вдосконалення розробленої моделі з метою підвищення точності прогнозування, в тому числі шляхом урахування деградації механічних властивостей (знеміцнювання) алюмінієвого сплаву під час нагрівання. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 7.

*Ключові слова:* зварювання тертям з перемішуванням, алюмінієвий сплав, залишкові напруження, пластичні деформації, математичне моделювання

**Вступ.** На сьогодні технологія зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) знаходить широке використання при виконанні стикових з'єднань відповідальних конструкцій в таких галузях промисловості, як аерокосмічна, суднобудування, автомобільний і залізничний транспорт тощо. Враховуючи високі вимоги до конструкцій, що працюють за умов високого навантаження, визначення залишкових напружень і деформацій в зварних з'єднаннях, отриманих при ЗТП, та розробка математичної моделі їхнього визначення є актуальним завданням.

У процесі ЗТП, коли робочий інструмент, занурений у метал зварного з'єднання, обертається і поступово рухається вздовж лінії утворення шва, відбувається інтенсивний процес тертя плеча інструмента з поверхнею елементів з'єднання і поверхні штиря з матеріалом в об'ємі виробу. Відбувається також процес перемішування металу в об'ємі поблизу поверхні контакту штиря і плеча з елементами з'єднання. Форма інструмента і параметри процесу ЗТП можуть суттєво впливати на якість зварного з'єднання [1, 2].

Для ефективного моделювання даного процесу різні дослідники використовують різноманітні підходи залежно від поставлених цілей. Це може

бути прогнозування якості формування зварного з'єднання для оптимізації технології зварювання або прогнозування залишкових зварювальних напружень і деформацій, які впливають на службові характеристики конструкції.

Найбільш прості математичні моделі джерела нагрівання при ЗТП [3] визначають виділення тепла тільки в результаті процесу тертя інструмента відносно матеріалу елементів з'єднання, більш детальні моделі додатково враховують внесок пластичних деформацій в розігрів елементів. У таких моделях [4, 5], крім процесу тертя, необхідно також прогнозувати процес перемішування матеріалу, для того щоб визначити баланс внесків тертя і пластичних деформацій в розігрів елементів з'єднання.

В роботі [6] в моделі ЗТП використовують непостійний, а змінний коефіцієнт тертя, який залежить від температури. В математичній моделі, представленій в [6], також кількість пластичної роботи, яка перетворена в тепло, дорівнює 80 %, хоча автори і зазначають, що в багатьох дослідженнях це значення не сягає і 5 %.

В роботах [3, 5–9] до скінченно-елементної моделі, крім зварного з'єднання, входить також робочий інструмент і оснащення для закріплення

Царик Б.Р.– <https://orcid.org/0000-0002-8929-7722>, Мужиченко О.Ф. – <https://orcid.org/0000-0002-4870-3659>,

Махненко О.В.– <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>

© Б.Р. Царик, О.Ф. Мужиченко, О.В. Махненко, 2022

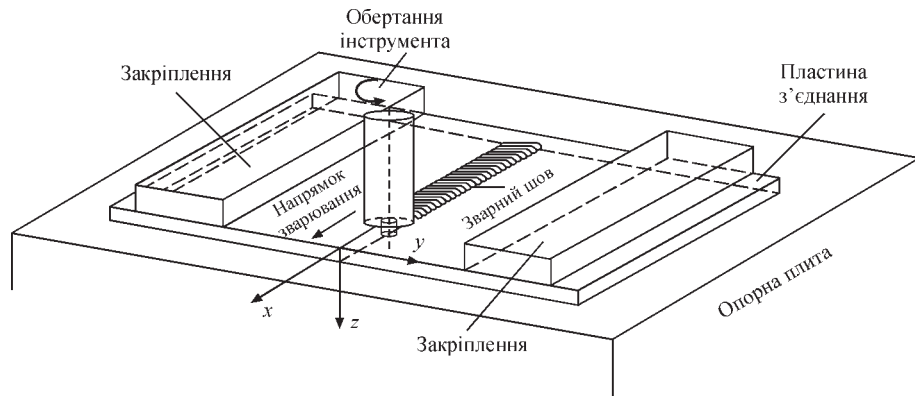


Рис. 1. Схема процесу ЗТП

його елементів, що дозволяє визначити втрати тепла джерела нагрівання через інструмент і оснащення. Інші дослідники [4] використовують напіваналітичну термічну модель процесу ЗТП, яка скорочує час обчислень.

Всі моделі визначення напружено-деформованого стану при ЗТП враховують дію термонапружень на процеси пружнопластичного деформування матеріалу в процесі зварювання і подальшого охолодження [9]. Основною особливістю моделювання процесу ЗТП є доволі жорстке закріплення в процесі зварювання елементів з'єднання [6, 8].

**Математична модель.** В результаті аналізу існуючих робіт з математичного моделювання процесів термопружнопластичного деформування і масоперенесення при ЗТП розроблено досить просту модель, спрямовану на оперативне визначення залишкових зварювальних напружень і деформацій з інженерною точністю з метою подальшої оцінки міцності зварних з'єднань за умов експлуатаційного навантаження або прогнозування загальних деформацій великогабаритних конструкцій з великою кількістю зварних з'єднань за методом функції усадки [10].

Відомо, що тепловиділення при ЗТП, отримане в результаті деформування, не перевищує 5% загальної кількості тепловиділень [11]. Тому в запропонованій моделі для оперативного отримання даних залишкових зварювальних напружень та деформацій при ЗТП елементів з алюмінієвих сплавів тепловиділенням від деформування металу можна знехтувати. Крім того, з метою спрощення моделі при збереженні інженерної точності прогнозування не врахували такі фактори, як залежність коефіцієнта тертя від температури матеріалу, відведення тепла в робочий інструмент і оснащення для закріплення елементів з'єднання (опорна пластина і затискачі), часткове зниження тепловиділення від тертя в результаті перемішування матеріалу, а також ефект знеміцнювання – зниження механічних властивостей алюмінієвого сплаву під час нагрівання [12].

При моделюванні температурних полів при ЗТП застосовували рівняння нестационарної теплопровідності, яке враховує об'ємне зварювальне джерело нагрівання  $W(x, y, z, t)$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(x, y, z, t) = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу;  $c$  – питома теплоємність;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

У загальному вигляді для зварювального виробу при ЗТП (рис. 1) під час руху центра  $(x_0, y_0, z_0)$  робочого інструмента (рис. 2) зі швидкістю зварювання  $v_w$  потужність виділення тепла на одиницю площі контакту між інструментом і матеріалом з'єднання в довільній точці  $(x, y, z)$  в момент часу  $t$  описується залежністю

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial n} = \mu P_n \omega r, \quad (2)$$

при  $z = 0$  і  $R_1 < r < R_2$  (на поверхні в зоні плеча інструмента),

при  $0 < z < \delta$  і  $r = R_1$  (за товщиною в зоні штиря інструмента),

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $P_n$  – нормальне зусилля на одиницю площі (тиск) в точці контакту;  $\omega$  – кутова швидкість обертання інструмента;

$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  – відстань розглянутої точки контакту від осі обертання робочого інструмента  $(x_0, y_0)$ ;  $R_1$  – радіус штиря;  $R_2$  – радіус плеча;

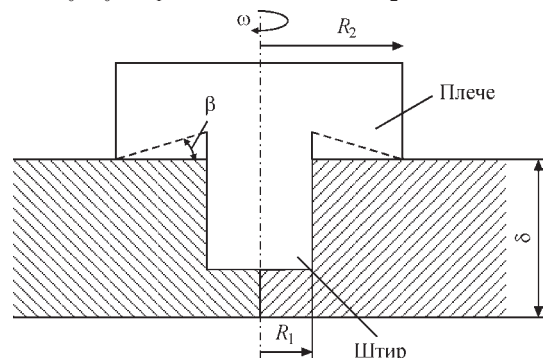


Рис. 2. Схема робочого інструмента при зварюванні

$\delta$  – товщина зварюваних елементів. Кутом нахилу плеча  $\beta$  можна знехтувати, оскільки при малих кутах  $\leq 2...3^\circ$  збільшення площі контакту в зоні плеча, що не перевищує 5%.

Граничні умови на поверхнях елементів з'єднання (рис. 3) з урахуванням конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем задавали у вигляді

$$q = -h(T_{\text{out}} - T), \quad (3)$$

де  $T_{\text{out}}$  – температура навколишнього середовища;  $q$  – тепловий потік;  $h$  – коефіцієнт теплопередачі з поверхні при конвекційному теплообміні з довкіллям (зазвичай за умов природної конвекції на повітрі  $T_{\text{out}} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h = 10...20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ).

Після визначення розподілів температури при ЗТП чисельне визначення напружень і деформацій проводиться за аналогічним алгоритмом як для дугового зварювання шляхом послідовного простеження протягом часу термомеханічних процесів у матеріалі з'єднання від початку нагрівання до повного охолодження методами пружно-пластичного аналізу та скінченних елементів [13]. Відмінністю моделі визначення напружень і деформацій при ЗТП від моделі при дуговому зварюванні є умова жорсткого закріплення елементів у процесі зварювання і наступного охолодження, тобто граничні умови в зоні закріплення по всій довжині зварюваних елементів знаходиться на невеликій відстані ( $\approx 30...40 \text{ мм}$ ) від зварного шва

$$U_x(x,y,z,t) = U_y(x,y,z,t) = U_z(x,y,z,t) = 0 \text{ при } |y| > y_w, \quad (4)$$

де  $U_x, U_y, U_z$  – переміщення в поздовжньому, поперечному напрямках та за товщиною елементів з'єднання;  $y_w$  – відстань від осі зварного з'єднання до розташування пристроїв закріплення.

У пружнопластичній постановці тензор деформацій можна представити у вигляді

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (i, j = x, y, z), \quad (5)$$

де  $\varepsilon_{ij}^e, \varepsilon_{ij}^p$  – тензор відповідно пружних і пластичних деформацій. Компоненти тензорів напружень  $\sigma_{ij}$  та пружних деформацій  $\varepsilon_{ij}^e$  пов'язані один з одним законом Гука:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma + \varphi), \quad (6)$$

де  $\delta_{ij}$  – одиничний тензор ( $\delta_{ij} = 0$ , якщо  $i \neq j$ ,  $\delta_{ij} = 1$ ,

якщо  $i = j$ );  $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$ ;  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  –

модуль зсуву;  $K = \frac{1-2\nu}{E}$  – піддатливість об'ємного стиснення;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\varphi$  – функція вільних відносних подовжень (об'ємних змін), викликаних зміною температури:

$$\varphi = \alpha(T - T_0), \quad (7)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт відносного температурного видовження матеріалу.

Пластичні деформації пов'язані з напруженим станом рівняннями теорії пластичної неізо-термічної течії, асоційованої з умовою плинності Мізеса:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) \quad (i, j = x, y, z), \quad (8)$$

де  $d\varepsilon_{ij}^p$  – прирощення тензора  $\varepsilon_{ij}^p$  в даний момент часу  $t$  обумовлене історією деформування, напруженнями  $\sigma_{ij}$  та температурою  $T$ ;  $d\lambda$  – скалярна функція, яка визначається умовами течії:

$d\lambda = 0$ , якщо  $f = \sigma_i^2 - \sigma_T^2(T) < 0$  або  $f = 0$  при  $df < 0$ ;

$d\lambda > 0$ , якщо  $f = 0$  і  $df > 0$ ;

стан  $f > 0$  неприпустимий,

де  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)},$$

$\sigma_T(T)$  – межа плинності матеріалу при температурі  $T$ .

Для отримання результатів компонент залишкових напружень  $\sigma_{ij}$  і деформацій  $\varepsilon_{ij}$  необхідно

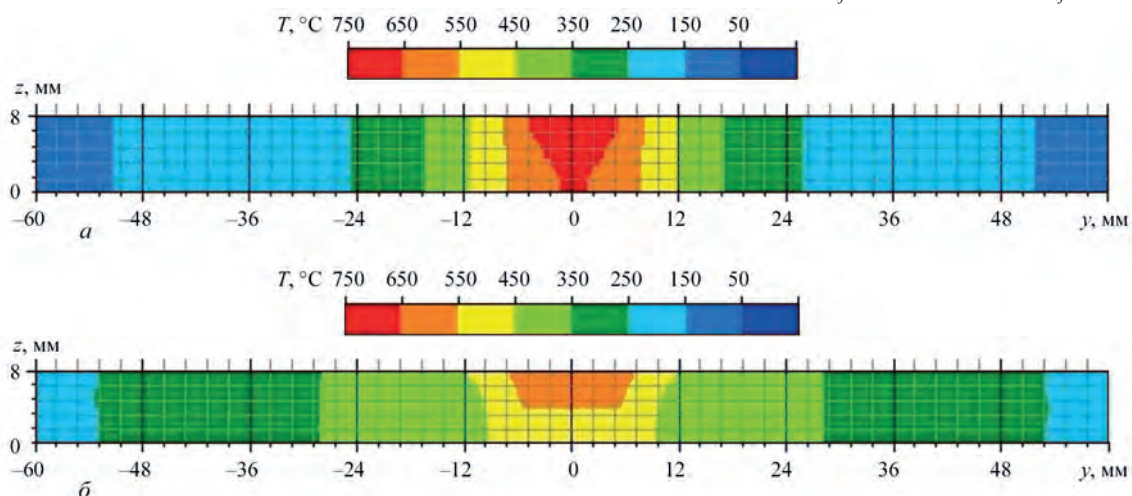


Рис. 3. Результати чисельного розрахунку розподілу температури за товщиною пластини в поперечному перерізі при зварюванні стикових з'єднань для моделі дугового зварювання (а) пластини розміром 500×500 мм,  $\delta = 8 \text{ мм}$  та моделі ЗТП (б) пластини розміром 300×300 мм,  $\delta = 8 \text{ мм}$

розглядати процес розвитку пружнопластичних деформацій протягом часу, починаючи з деякого початкового стану. Для цього традиційно використовують метод послідовного простежування, коли для моменту  $t$  розв'язок шукають, якщо відомий повний розв'язок для моменту  $(t - \Delta t)$ , де  $\Delta t$  – крок простеження розвитку пружнопластичних деформацій, в межах якого можна приблизно вважати, що розвиток відбувається за досить простою траєкторією навантаження. У цьому випадку зв'язок між кінцевими прирощеннями тензора деформацій  $\Delta \varepsilon_{ij}$  і тензором напружень  $\sigma_{ij}$  відповідно до [13] можна записати у вигляді:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma) - b_{ij}, \quad (10)$$

де  $\psi$  – функція стану матеріалу в точці  $(x, y, z)$  в момент  $t$ ,

$$\psi = \frac{1}{2G}, \text{ якщо } f < 0, \\ \psi > \frac{1}{2G}, \text{ якщо } f = 0, \quad (11)$$

стан  $f > 0$  неприпустимий;

$b_{ij}$  – тензорна функція додаткових деформацій, яка визначається прирощенням об'ємних змін  $\Delta\varphi$  і відомими результатами попереднього етапу простеження:

$$b_{ij} = \left[ \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma) \right]_{t-\Delta t} + \delta_{ij}\Delta\varphi \\ (i, j = x, y, z). \quad (12)$$

Умови течії у вигляді (9) включають значну фізичну нелінійність в функції стану матеріалу  $\psi$ , для реалізації якої зазвичай використовують ітераційні процеси. В результаті на кожній ітерації фізично нелінійна задача переходить в лінійну задачу теорії пружності зі змінним модулем зсуву, який дорівнює  $1/2\psi$ , і додатковими деформаціями  $b_{ij}$ .

**Результати моделювання.** За допомогою розробленої моделі ЗТП (1)–(12) проведено розрахунки для стикового з'єднання пластин обмеженого розміру ( $300 \times 300$  мм,  $\delta = 8$  мм, режим зварювання  $R_1 = 5$  мм,  $R_2 = 10$  мм,  $\omega = 700$  об/хв,  $\mu = 0,4$ ,  $P_n = 70$  МПа,  $v_w = 1,7$  мм/с) та представлено результати характерного розподілу залишкових напружень та пластичних деформацій порівняно з

дуговим зварюванням стикового з'єднання для пластини розміром  $500 \times 500$  мм,  $\delta = 8$  мм (режим TIG  $I = 230$  А,  $U = 15$  В,  $v_w = 3$  мм/с, ефективний коефіцієнт  $\eta = 0,6$ ). Механічні й теплофізичні властивості матеріалу залежно від температури при моделюванні прийнято як для алюмінієвого сплаву АМг6 (таблиця).

Результати чисельного розрахунку показали (рис. 3), що максимальна температура нагрівання при ЗТП (до  $500 \dots 550$  °С) значно нижча, ніж при дуговому зварюванні (до  $750$  °С і вище) і не досягає температури плавлення алюмінієвого сплаву  $T_{liq} = 650$  °С. Поздовжня компонента залишкових пластичних деформацій при ЗТП розподілена в більш вузькій зоні, ніж при дуговому зварюванні, тому інтегральна величина поздовжньої усадки приблизно в 3 рази нижче (рис. 4). Поперечна компонента залишкових пластичних деформацій при ЗТП за абсолютною величиною в 3 рази нижче, ніж при дуговому зварюванні (рис. 5). Залишкові поздовжні напруження при ЗТП за максимальним значенням розтягуючих напружень (до  $150$  МПа) приблизно дорівнюють залишковим поздовжнім напруженням при дуговому зварюванні, але зона розтягуючих напружень при ЗТП значно (в 3 рази) вужче (рис. 6). Залишкові поперечні напруження при ЗТП (до  $14$  МПа) значно нижчі за абсолютною величиною, ніж при дуговому зварюванні (до  $40$  МПа) (рис. 7).

Таким чином, отримані за допомогою розробленої моделі ЗТП зварювання розрахункові результати підтверджують, що при ЗТП алюмінієвих сплавів утворюються небажані залишкові напруження і деформації, причому залишкові напруження (особливо поздовжня компонента) за значенням і характером розподілу близькі до залишкових напружень при дуговому зварюванні, а залишкові деформації мають значно нижчий рівень, ніж за традиційних дугових способів зварювання.

Крім того, є ціла низка факторів, які можуть впливати на точність прогнозування розробленої моделі. Це, наприклад, залежність коефіцієнта тертя від температури матеріалу, відтік частини тепла в робочий інструмент і оснащення для закріплення елементів зварного з'єднання, також

**Механічні й теплофізичні властивості алюмінієвого сплаву типу АМг6 [13, 14]**

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$E, \text{ МПа}$	$\sigma_p, \text{ МПа}$	$\nu$	$\alpha \cdot 10^6, \text{ } 1/^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{ Вт/(см}\cdot^\circ\text{C)}$	$c_p, \text{ Дж/(см}^3\cdot^\circ\text{C)}$
20	71440	155	0,324	22,7	1,18	2,40
100	68770	152	0,327	23,4	1,22	2,51
200	64790	149	0,332	24,5	1,27	2,62
300	60330	143	0,337	25,5	1,33	2,73
400	55400	98	0,343	26,6	1,38	2,85
500	49590	70	0,351	27,6	1,43	3,00

*Примітки.*  $\sigma_T$  – межа плинності. Щільність матеріалу  $\rho = 2640$  кг/м<sup>3</sup>, інтервал температур плавлення  $T_{sol} = 560$  °С,  $T_{liq} = 640$  °С, питома теплота плавлення  $Q_{liq} = 390$  кДж/кг [14].

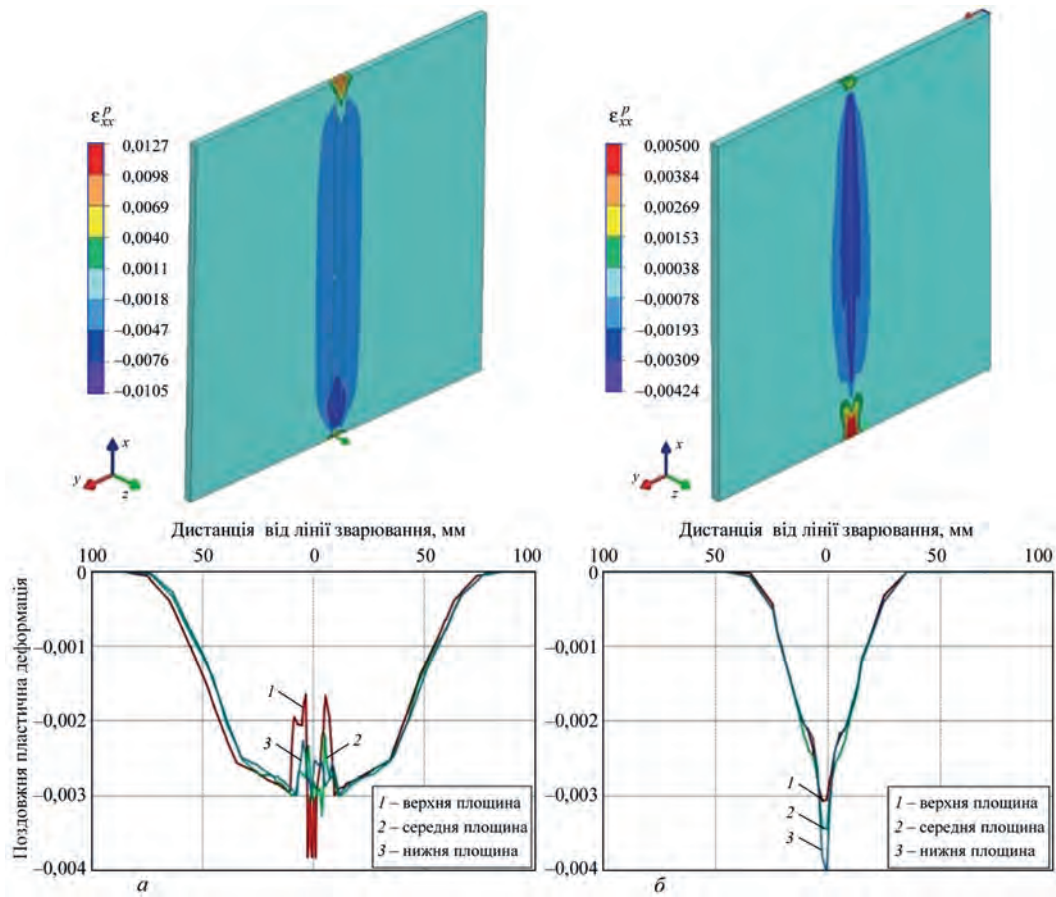


Рис. 4. Результати чисельного розрахунку розподілу поздовжніх пластичних деформацій для стикових зварних з'єднань у моделі дугового зварювання (а) пластини розміром 500×500 мм,  $\delta = 8$  мм та моделі ЗТП (б) пластини розміром 300×300 мм,  $\delta = 8$  мм

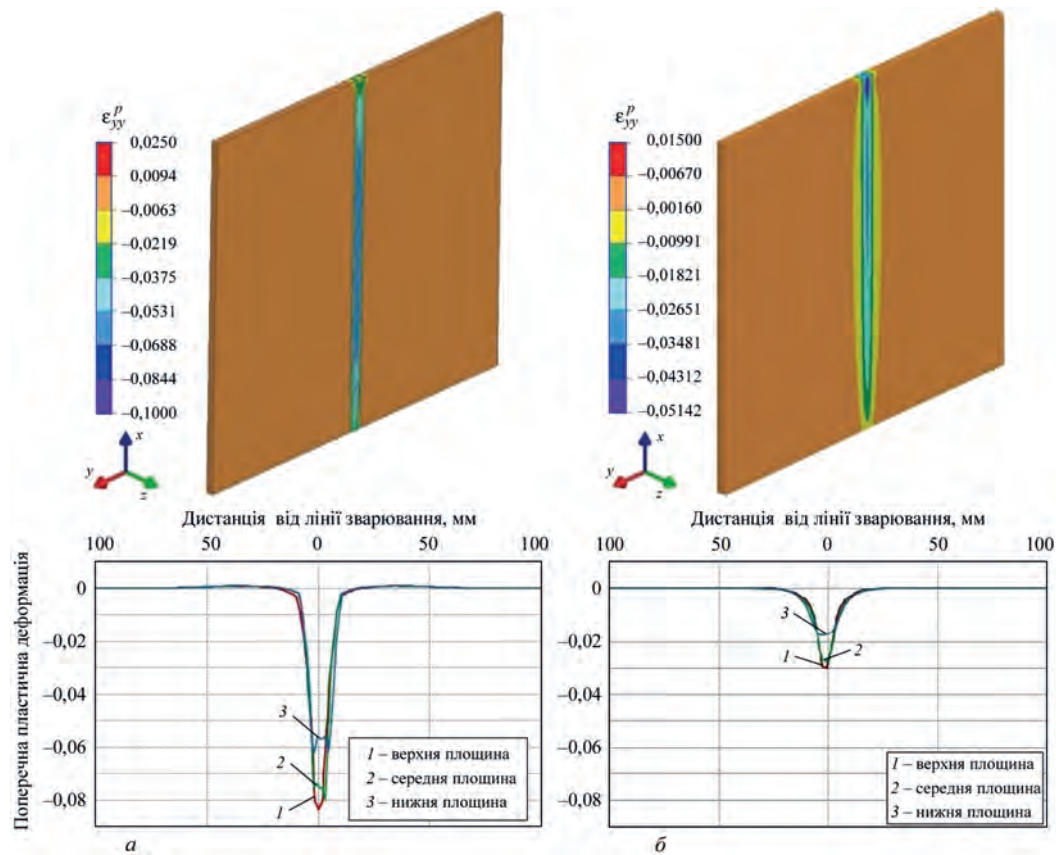


Рис. 5. Результати чисельного розрахунку розподілу поперечних пластичних деформацій для стикових зварних з'єднань у моделі дугового зварювання (а) пластини розміром 500×500 мм,  $\delta = 8$  мм та моделі ЗТП (б) пластини розміром 300×300 мм,  $\delta = 8$  мм

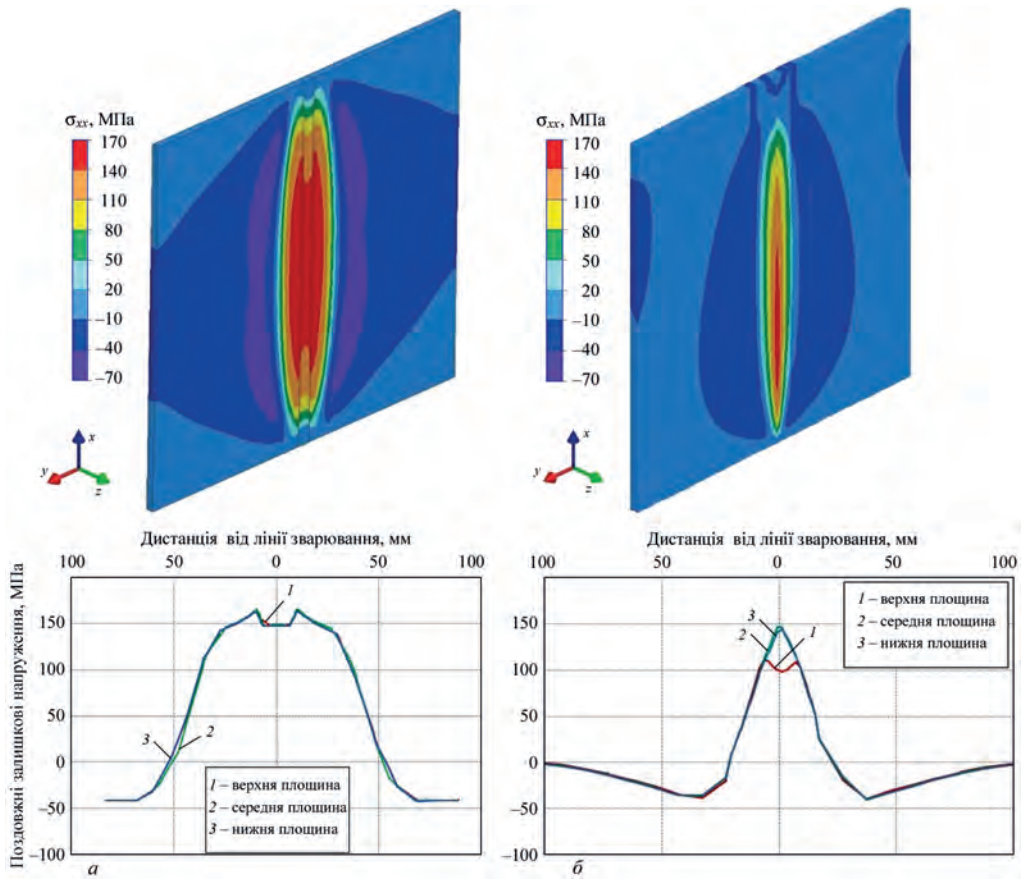


Рис. 6. Результати чисельного розрахунку розподілу поздовжніх залишкових напружень для стикових зварних з'єднань у моделі дугового зварювання (а) і моделі ЗТП (б)

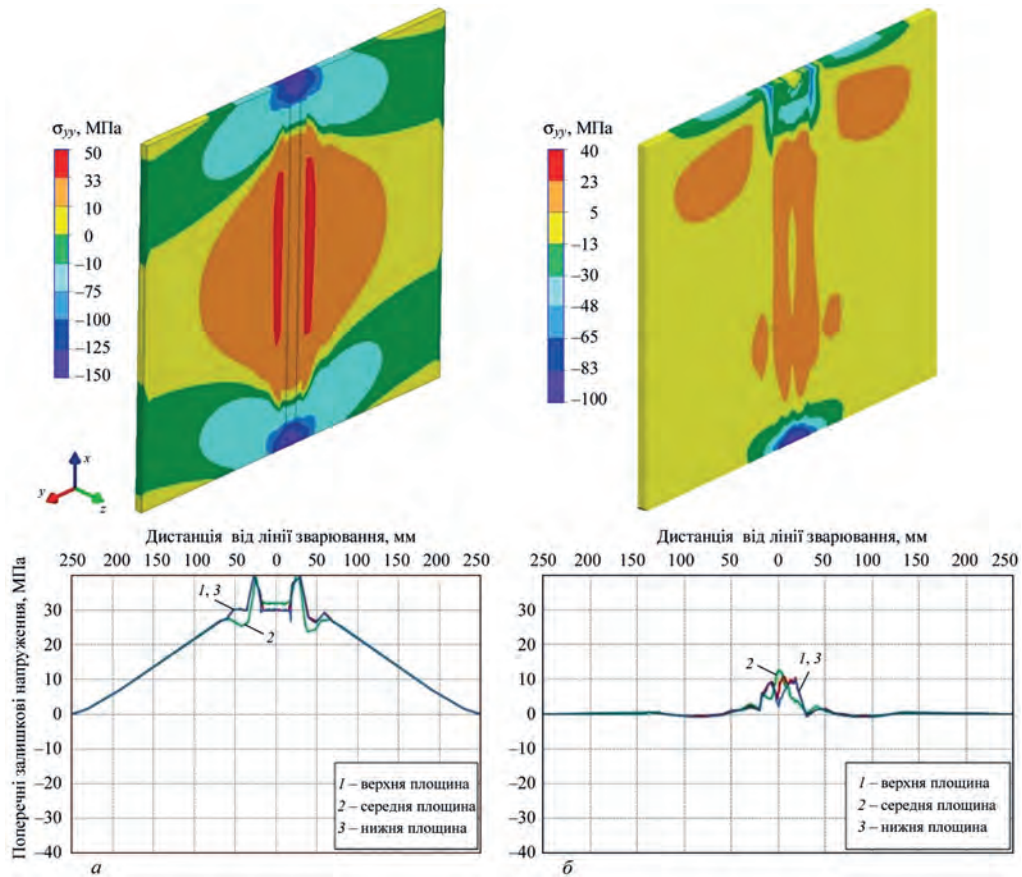


Рис. 7. Результати чисельного розрахунку розподілу поперечних залишкових напружень для стикових зварних з'єднань моделі дугового зварювання (а) і моделі ЗТП (б)

часткове зниження тепловиділення від тертя в результаті перемішування матеріалу і додаткового тепловиділення від пластичних деформацій матеріалу. Врахування цих факторів, можливо, дозволить більш адекватно визначати тепловиділення в моделі джерела нагрівання, але значно підвищить складність математичної моделі. Проте є один фактор, який обов'язково треба враховувати при моделюванні ЗТП стосовно алюмінієвих сплавів – це ефект знеміцнювання, тобто деградація механічних властивостей алюмінієвого сплаву в зоні термічного впливу. Тому при подальшому вдосконаленні розробленої моделі доцільно проаналізувати врахування зазначених факторів.

## Висновки

1. Розроблено розрахункову модель на основі підходів термопружнопластичного аналізу для чисельного визначення залишкових напружень та деформацій в зоні зварних стикових з'єднань з алюмінієвих сплавів, виконаних ЗТП. Основними особливостями моделі являються:

- тепловиділення від тертя робочого інструмента відносно матеріалу з'єднання;
- специфічні для ЗТП умови жорсткого закріплення елементів з'єднання;
- послідовне простеження за часом термомоделювання процесів у матеріалі з'єднання від початку нагрівання до повного охолодження.

2. Отримані за допомогою розробленої моделі розрахункові результати при зварюванні пластин товщиною 8 мм зі сплаву АМг6 підтверджують висновки інших дослідників, що при ЗТП алюмінієвих сплавів утворюються небажані залишкові напруження і деформації, але вони можуть мати нижчий рівень, ніж при традиційних дугових способах зварювання. Поздовжня компонента залишкових пластичних деформацій при ЗТП близька за величиною, але розподілена в більш вузькій зоні, ніж при дуговому зварюванні, тому інтегральна величина визначеної поздовжньої усадки приблизно в 3 рази нижче. Поперечна компонента залишкових пластичних деформацій при ЗТП за величиною в 3 рази нижче, ніж при дуговому зварюванні. Залишкові поздовжні напруження при ЗТП за максимальною величиною розтягуючих напружень (до 150 МПа) приблизно дорівнюють залишковим поздовжнім напруженням при дуговому зварюванні, але зона розтягуючих напружень при ЗТП значно (в 3 рази) вузьче. Залишкові поперечні напруження при ЗТП (до 14 МПа) значно нижчі за абсолютною величиною, ніж при дуговому зварюванні (до 40 МПа).

3. Для подальшого підвищення точності прогнозування розробленої моделі доцільно проана-

лізувати врахування таких факторів: залежності коефіцієнта тертя від температури матеріалу, відведення тепла в робочий інструмент і оснащення для закріплення, зниження тепловиділення від тертя за рахунок перемішування матеріалу, додаткового тепловиділення від пластичних деформацій матеріалу, а також деградації механічних властивостей алюмінієвого сплаву (знеміцнювання) під час зварювального нагрівання.

## Список літератури

1. İpekçioğlu G., Akçam Ö., Çamlı G. (2018) Effect of plate thickness on weld speed in friction stir welding of AA6061-T6 Al-alloy plates. *The Paton welding J.*, **12**, 7–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.08>
2. Krasnovsky K., Khokhlova Yu.A. and Khokhlov M.A. (2019) Influence of tool shape for friction stir welding on physicomaterial properties of zones of welds of aluminum alloy EN AW 6082-T6., *Ibid.*, **7**, 7–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.07.02>
3. Riahi, M., Nazari, H. (2011) Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation. *Int. J. Adv. Manuf. Techn.*, **55**, 143–15. DOI 10.1007/s00170-010-3038-z
4. Ferro, P., Bonollo, F. (2010) A Semi-analytical Thermal Model for Friction Stir Welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **41**, 440–449. DOI: 10.1007/s11661-009-0104-y
5. Майстренко А.Л., Нестеренков В.М., Дутка В.А. и др. Моделирование тепловых процессов для улучшения структуры металлов и сплавов методом трения с перемешиванием. *Сборник трудов Седьмой Международной конференции, 15–19 сентября 2014 г., Одесса, Украина.*
6. Aziz Saad B., Dewan Mohammad W., Huggett D.J. et al. (2016) Impact of Friction Stir Welding (FSW) Process Parameters on Thermal Modeling and Heat Generation of Aluminum. *Acta Metall. Sin.* DOI 10.1007/s40195-016-0466-2
7. Andrade, D.G., Leitão, C., Dialami, N. et al. (2020) Modelling torque and temperature in friction stir welding of aluminium alloys. *Int. J. Mech. Sciences*, **182**. Doi.org/10.1016/j.ijmesci.2020.105725
8. Dresbach Christian, Marinus J. van Enkhuizen, Ulises Alfaro Mercado, Stefan Reh. (2014) Simulation of thermal behavior during friction stir welding process for predicting residual stresses. *CEAS Aeronaut J.* DOI 10.1007/s13272-014-0145-9
9. Meyghani, B., Awang, M., Emamian, S., Khalid Nor M. (2017) Developing a Finite Element Model for Thermal Analysis of Friction Stir Welding by Calculating Temperature Dependent Friction Coefficient. *2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Mech., Manuf. and Process Plant Engin.*, 107–126. DOI 10.1007/978-981-10-4232-4\_9
10. Махненко О.В. (2008) Комбинированное применение метода термопластичности и метода функции усадки для изучения процесса тепловой правки судостроительных панелей. *Математичні методи та фізико-механічні науки*, **51**, **4**, 193–201.
11. Nandan, R., Roy, G.G., Lienert, T.J., DebRoy, T. (2007) Three-Dimensional Heat and Material Flow during Friction Stir Welding of Mild Steel. *Acta Materialia*, **55**, 883–895. DOI 10.1016/j.actamat.2006.09.009
12. Ищенко А.Я., Подбельников С.В., Покляцкий А.Г. (2007) Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор). *Автоматическая сварка*, **11**, 32–38.
13. Махненко В.И. (1976) *Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций*. Киев, Наукова думка.
14. Белецкий В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение)*. Киев, Коминтех.

References

- İpekoğlu G., Akçam Ö., Çamlı G. (2018) Effect of plate thickness on weld speed in friction stir welding of AA6061-T6 Al-alloy plates. *The Paton welding J.*, **12**, 7–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.08>
- Krasnovsky K., Khokhlova Yu.A. and Khokhlov M.A. (2019) Influence of tool shape for friction stir welding on physicochemical properties of zones of welds of aluminium alloy EN AW 6082-T6. *Ibid.*, **7**, 7–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.07.02>
- Riahi, M., Nazari, H. (2011) Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation. *Int. J. Adv. Manuf. Techn.*, **55**, 143–15. DOI 10.1007/s00170-010-3038-z
- Ferro, P., Bonollo, F. (2010) A semi-analytical thermal model for friction stir welding. *Metallurg. and Mater. Transact. A*, **41**, 440–449. DOI: 10.1007/s11661-009-0104-y
- Majstrenko, A.L., Nesterenkov, V.M., Dutka, V.A. et al. (2014) Modeling of thermal processes for improvement of structure of metals and alloys by friction stir welding. In: *Proc. of 7<sup>th</sup> Int. Conf. (Ukraine, Odessa, 15-19 September)*.
- Aziz Saad, B., Dewan Mohammad, W., Huggett, D.J. et al. (2016) Impact of friction stir welding (FSW) process parameters on thermal modeling and heat generation of aluminum. *Acta Metall. Sin.* DOI 10.1007/s40195-016-0466-2
- Andrade, D.G., Leitão, C., Dialami, N. et al. (2020) Modeling torque and temperature in friction stir welding of aluminium alloys. *Int. J. Mech. Sciences*, **182**. Doi.org/10.1016/j.ijmeecsci.2020.105725
- Dresbach Christian, Marinus J. van Enkhuizen, Ulises Alfaro Mercado, Stefan Reh. (2014) Simulation of thermal behavior during friction stir welding process for predicting residual stresses. *CEAS Aeronaut J.* DOI 10.1007/s13272-014-0145-9
- Meyghani, B., Awang, M., Emamian, S., Khalid Nor M. (2017) Developing a finite element model for thermal analysis of friction stir welding by calculating temperature dependent friction coefficient. In: *2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Mech., Manuf. and Process Plant Engin.*, 107–126. DOI 10.1007/978-981-10-4232-4\_9
- Makhnenko, O.V. (2008) Combined application of method of thermoplasticity and method of shrinkage function for studying of hot straightening of shipbuilding panels. *Matematychni Metody ta Fizyko-Mekhanichni Polia*, **51**(4), 193–201 [in Russian].
- Nandan, R., Roy, G.G., Lienert, T.J., DebRoy, T. (2007) Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel. *Acta Materialia*, **55**, 883–895. DOI 10.1016/j.actamat.2006.09.009
- Ishchenko, A.Ya., Podielnikov, S.V., Poklyatsky, A.G. (2007) Friction stir welding of aluminium alloys (Review). *The Paton Welding J.*, **11**, 25-30.
- Makhnenko, V.I. (1976) *Calculation methods for study of kinetics of welding stresses and strains*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
- Beletskij, V.M., Krivov, G.A. (2005) *Aluminium alloys (composition, properties, technology, application)*. Kyiv, Comintekh [in Russian].

MATHEMATICAL MODEL OF DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES AND STRAINS IN FRICTION STIR WELDING OF ALUMINIUM ALLOY

B.R. Tsaryk, O.F. Muzhichenko, O.V. Makhnenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

A rather simple and efficient mathematical model of the process of friction stir welding (FSW) was developed, which is focused on fast determination of residual welding stresses and strains with engineering precision. The model is based on application of the method of thermoelastoplastic deformation of the material, which is used at modeling of arc welding, but instead of the model of arc heat source a model of heat evolution from the working tool friction against the material of the joint element was developed. The model also takes into account the conditions specific to FSW of rigid restraint of the joint elements during welding. The developed FSW model was used to conduct calculations of a butt joint of plates from AMg6 aluminium alloy and to present the results of the characteristic distribution of residual stresses and plastic strains, compared to arc welding of the butt joint. Calculation results derived using the developed model confirm the conclusions of other researchers that at FSW of aluminium alloys undesirable residual stresses and strains also form, but they are lower than with the traditional arc welding methods. Developed model can be effectively used for on-line calculation definition of residual stresses and plastic deformations in the zone of welded joints produced by FSW, with the purpose of further assessment of welded joint strength or prediction of general deformations of large-sized structures. Ways of further improvement of the developed model were outlined with the purpose of further increase of prediction accuracy, also by allowing for degradation of mechanical properties (softening) the aluminium alloy during heating. 14 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: friction stir welding, aluminium alloy, residual stresses, plastic deformation, mathematical modeling

Надійшла до редакції 09.06.2022

НОВА КНИГА



**Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. Аргондугове та електронно-променеве зварювання псевдо-β титанового сплаву ВТ19.** — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2022. — 128 с.

В монографії розглянуто особливості зварювання псевдо-β титанових сплавів методами аргон-дугового (АДЗ) та електронно-променевого (ЕПЗ) зварювання. Методами математичного моделювання визначено вплив термічного циклу зварювання на фазовий склад металу зварного шва і зони термічного впливу зварного з'єднання при АДЗ вольфрамовим електродом псевдо-β титанового сплаву ВТ19. Побудовано діаграму анізотермічних перетворень при охолодженні псевдо-β титанового сплаву та розрахунково-експериментальним методом визначено залежність залишкової кількості β-фази від швидкості охолодження. Розроблено технологію АДЗ із застосуванням присадного дроту або безкисневих флюсів та технологію ЕПЗ с попереднім підігрівом і локальною термічною обробкою. Встановлено залежність міцності з'єднань сплаву ВТ19, виконаних ЕПЗ, від кількості β-фази в металі шва. Наведено результати досліджень впливу різних видів пічної термічної обробки зварних з'єднань сплаву ВТ19 на їх структурно-фазовий склад та механічні характеристики. Застосування зазначених технологій зварювання сприятиме більш широкому використанню зварних конструкцій з псевдо-β титанових сплавів в енергетичному та хімічному машинобудуванні, а також в авіакосмічній галузі промисловості. Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також студентів металургійних спеціальностей.

Книгу можна замовити в редакції журналу.