

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМГ6 В ПРОЦЕСІ НАГРІВУ МЕТАЛУ ШВА

Л.М. Лобанов¹, М.О. Пашин¹, О.Л. Міходуй¹, П.В. Гончаров¹, А.В. Завдовсєв¹, П.Р. Устименко²

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

²НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Досліджено вплив термічної дії в процесі електродинамічної обробки (ЕДО) зварних з'єднань зі сплаву АМГ6 на їх напружено-деформовані стани. На базі співвідношень Прантля-Рейсса для руху пружнопластичного середовища при підвищених температурах розроблено математичну модель оцінки напруженого стану металевих матеріалів внаслідок їх взаємодії з електродом-індентором при ЕДО. На базі розробленої моделі проведено розрахункову оцінку впливу підвищених температур на залишкові напруження попередньо напруженої пластини зі сплаву АМГ6 в результаті ЕДО. Проводили верифікацію результатів розрахунку з використанням зварних пластин товщиною 2 мм зі сплаву АМГ6. Термічну дію здійснювали за рахунок супутнього ЕДО підігріву металу шва. Для оцінки впливу термічного потенціалу ЕДО на залишкові напруження виконували зварювання ТІГ зразків стикового з'єднання. Виконували ЕДО зразків при температурі $T_{\text{ЕДО}} = 20$ і 100 °С. Методом електронної спекл-інтерферометрії вимірювали значення поздовжньої компоненти (вздовж поздовжньої вісі шва) залишкових зварювальних напружень у центральному поперечному перерізі зразків до та після ЕДО. Термічний вплив при ЕДО забезпечували із застосуванням технологічного фена, а температуру нагріву контролювали інфрачервоним термометром. Встановлено, що нагрів зварного шва в процесі його ЕДО вздовж поздовжньої вісі стикового з'єднання забезпечує більші значення залишкових напружень стискування у центрі шва порівняно із обробкою при $T = 20$ °С. Бібліор. 9, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: електродинамічна обробка, зварні з'єднання, супутній нагрів, залишкові зварювальні напруження, алюмінієві сплави

Вступ. Використання енергії імпульсних електромагнітних полів (ІЕМП) для регулювання залишкових напружень у технологіях обробки конструкційних матеріалів є актуальним для сучасної промисловості. Одним із таких методів, що характеризується енергоефективністю і простою реалізацією, є електродинамічна обробка (ЕДО) зварних з'єднань [1].

Сучасним трендом інженерної практики є дослідження заходів, що направлені на підвищення ефективності ЕДО. Одним з таких є поєднання процесу ЕДО з підігрівом зони обробки. Наукові засади застосування термічного потенціалу при ЕДО базуються на результатах роботи [2], де показано, що нагрів попередньо розтягнутих тонких стрижнів із низьковуглецевої сталі сприяє підвищенню ефективності їх обробки ІЕМП для зниження рівня залишкових напружень. Враховуючи, що ефективність ЕДО визначається електроімпульсною складовою електродинамічної дії [3], термічна дія може інтенсифікувати механізми релаксації залишкових зварювальних напружень. Це має позитивно впливати на регулювання напружено-деформованих станів металів, сплавів та зварних з'єднань при їх ЕДО.

Метою роботи є дослідження впливу підігріву металу шва в процесі ЕДО на залишкові напру-

ження зварних з'єднань із алюмінієвого сплаву АМГ6.

За результатами досліджень із використанням ЕДО попередньо навантажених поздовжнім розтягом σ_x плоских зразків алюмінієвого сплаву АМГ6 встановлено, що максимальні показники ефективності обробки досягалися при величині σ_x , що є близькою до межі плинності $\sigma_{0,2}$ металу [4]. За критерій ефективності приймали дискретне зниження напружень розтягування σ_x зразка в результаті ЕДО. За умов, коли напруження σ_x не досягали або перевищували рівень $\sigma_{0,2}$, визначали зниження ефективності ЕДО у порівнянні з обробкою зразка при $\sigma_x = \sigma_{0,2}$. Наявність в активній зоні зварного з'єднання сплаву АМГ6 поля залишкових напружень розтягування, рівень яких є близьким до $\sigma_{0,2}$, створює передумови до ефективного застосування ЕДО для релаксації останніх [1]. Дослідження напружених станів зварних з'єднань зі сплаву АМГ6 після ЕДО за різних $T_{\text{ЕДО}}$ дозволило оцінити термічний потенціал в якості фактору підвищення ефективності обробки.

Моделювання напружених станів пластин зі сплаву АМГ6 від ударної дії електродом-індентора при ЕДО в умовах їх нагріву. Враховуючи наведене вище, слід зазначити, що ЕДО із сумісним нагрівом зони обробки може бути ефективною у

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Пашин М.О – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>,

Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, П.В. Гончаров, А.В. Завдовсєв, П.Р. Устименко, 2022

порівнянні з ЕДО без підігріву для зниження залишкових зварювальних напружень. Пошук оптимального режиму ЕДО пов'язаний з експериментальною оцінкою великої кількості параметрів процесу. Альтернативним рішенням є математичне моделювання процесу ЕДО, яке дозволяє проводити оцінку зміни напружено-деформованого стану зварних з'єднань після обробки в умовах підвищених температур, яке до теперішнього часу не проводили.

На базі роботи [5] було проведено математичне моделювання впливу температури $T_{\text{ЕДО}}$ на напружені стани зварних пластин із алюмінієвого сплаву АМг6 в результаті ударної дії електрода-індентора. Створення динамічного тиску на поверхнях пластин, що обробляються ЕДО, проводили за схемою (рис. 1). Зразок 4, що обробляється ЕДО, у вигляді зварної пластини розташований на робочому столі 5. Після запуску контактором K розрядного циклу ємності C на індуктор 1 останній формує магнітне поле відповідної потужності, під дією якого диск 2 із ферромагнітного матеріалу разом з електродом-індентором 3 отримують різні значення початкової швидкості руху V_0 в напрямку робочого стола 5. Значення V_0 були встановлені на основі попередніх досліджень. Ударна взаємодія електрода-індентора ЕДО з поверхнею пластин призводить до формування в них різного рівня залишкових напружень та деформацій в залежності від значення V_0 .

Створення математичної моделі динамічної складової ЕДО в умовах підвищених температур проводили з використанням спрощеної двовимірної (2D) плоскої постановки. Розрахункова схема задачі про процес ударної взаємодії електрода-індентора з пластинами [5, 6] представлена на рис. 2. Наявність описаної вище геометричної симетрії тіл, що ударно взаємодіють, дозволяє розглядати лише половину їхнього перерізу з одночасним накладанням на неї відповідних граничних умов. До цих умов відноситься накладання заборони на переміщення вузлів скінченно-елементної сітки

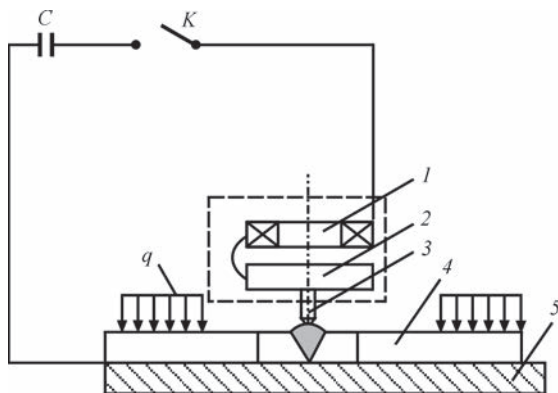


Рис. 1. Схема ЕДО пластин: 1 – індуктор; 2 – диск; 3 – рухомий електрод-індентор; 4 – зразок, що обробляється; 5 – робочий стіл; q – навантаження, що фіксує зразок [5]

(СЕС) тіл, що знаходяться на вісі симетрії, в горизонтальному напрямку «X». Наявність в схемі електродинамічної обробки пластин робочого стола 5 (рис. 1) доцільно замінити спіранням на абсолютно жорстку основу 3 (рис. 2), яка у математичній постановці буде еквівалентна накладанню заборони на переміщення у вертикальному напрямку «Y» вузлам СЕС, які належать нижній поверхні пластини, що контактує зі столом.

Для чисельного моделювання використовували континуальну модель середовища, що досліджується. Це дозволило записати закони збереження маси, кількості руху та енергії у вигляді диференціальних рівнянь у частинних похідних [5]. В математичній постановці поведінка матеріалів пластини (алюмінієвий сплав АМг6) та електрода-індентора (мідь М1) під дією зовнішнього імпульсного навантаження описували за допомогою ідеальної пружнопластичної реологічної моделі матеріалу, яка в бібліотеці матеріалів програми ANSYS/LS-DYNA має назву «PLASTIC-KINEMATIC». Вплив підвищених (вище кімнатної) температур $T_{\text{ЕДО}}$ задавали значеннями модулю пружності E і межі плинності $\sigma_{0,2}$ при $T_{\text{ЕДО}} = 20$ і 100 °С.

Залишкові зварювальні напруження моделювали завданням поздовжньої (вздовж вісі X на рис. 2) компоненти напружень розтягування σ_x , значення яких приймали рівними $\sigma_{0,2}$ сплаву АМг6 при відповідних температурах. Моделювали нормальну контактну взаємодію напівсферичного циліндричного електрода-індентора діаметром 15 мм (діаметр сфери 30 мм) масою 102,5 г із мідного сплаву М1 із пластиною зі сплаву АМг6 розмірами $250 \times 250 \times 2$ мм. Механічні характеристики пластини та індентора, що контактено взаємодіють, наведено у табл. 1. Електрод-індентор отримує значення $V_0 = 5$ м/с, яке було визначено на основі попередніх досліджень [5]. Підсумковий розрахунковий розподіл компонент залишкових напружень σ_x у пластинах визначали по лінії удару (напрямок V_0 на рис. 2).

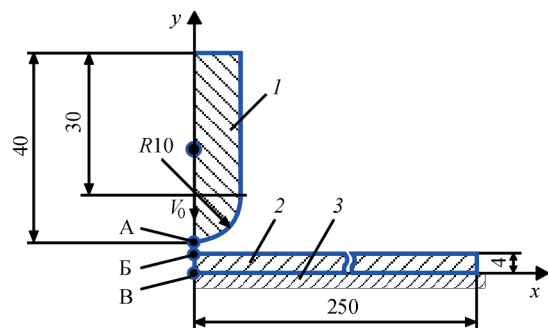


Рис. 2. Розрахункова схема процесу динамічного навантаження пластин, що обробляються ЕДО: 1 – електрод-індентор; 2 – зразок, що обробляється; 3 – абсолютно жорстка основа; А – точка на зовнішній поверхні електрода-індентора; Б – точка на зовнішній поверхні пластини; В – точка на зворотній поверхні пластини [5]

Таблиця 1. Механічні характеристики пластини зі сплаву АМг6 і індентора зі сплаву М1

Номер п/п	Матеріал	$T, ^\circ\text{C}$	Густина ρ , кг/м ³	Модуль пружності E , ГПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа
1	АМг6	20	2640	71	0,34	150
2	АМг6	100	2640	65	0,34	130
3	М1	20	8940	128	0,35	300

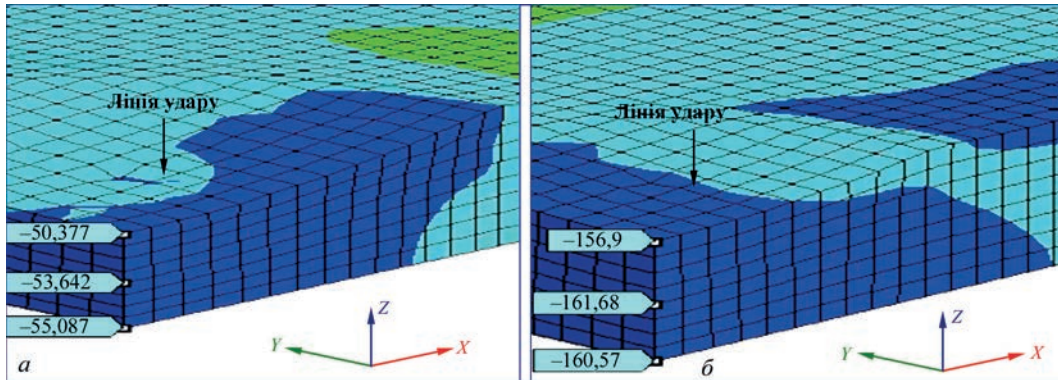


Рис. 3. Підсумковий розрахунковий розподіл залишкових напружень σ_x , МПа вздовж лінії удару у пластині зі сплаву АМг6 $\delta = 2$ мм після ЕДО при різних значеннях $T_{\text{ЕДО}}$: а – 20; б – 100 °С

На рис. 3 наведено результати моделювання залишкових розподілів поздовжньої (вздовж зварного шва) компоненти напружень σ_x по лінії удару у пластинках $\delta = 2$ мм. Можна бачити, що по лінії удару напруження стиску σ_x на контактній і зворотній поверхнях пластин досягають $0,3\sigma_T$ сплаву АМг6 при $T = 20$ °С (а) і близькі до σ_T при $T = 100$ °С (б).

Обладнання і методика експериментальних досліджень. З метою верифікації результатів математичного моделювання проводили ЕДО зразків стикових зварних з'єднань розміром $250 \times 250 \times 2$ мм із центральним швом. Перед зварюванням зразки жорстко закріплювали на збиральному столі притискними планками уздовж поздовжніх країв, що зварюються, на відстані 20 мм від них згідно схеми рис. 1. Зварні з'єднання виконували автоматичним зварюванням ТІГ при значеннях напруги, струму і швидкості процесу відповідно $U_d = 20,1$ В, $I_d = 115$ А і $V_{\text{зв}} = 5$ мм/с. В якості присадки використовували дріт марки ER5356 ESAB діаметром 1,6 мм, який подавали в зону дуги зі швидкістю $V_{\text{пд}} = 33$ мм/с.

Після зварювання і повного остигання зразків методом електронної спекл-інтерферометрії [7] до та після ЕДО визначали значення σ_x залишкових зварювальних напружень в центрі шва, на лінії сплавлення та на відстані 10 мм від центру шва.

ЕДО зразків в ручному режимі при напрузі заряду і ємності конденсатора відповідно $U_3 = 500$ В і $C = 5140$ мкФ проводили вздовж поздовжньої вісі зварного шва (рис. 4).

На першому етапі досліджень виконували оцінку вихідного залишкового напруженого стану зварної пластини № 1, яку згодом піддавали ЕДО при $T_{\text{ЕДО}} = 20$ °С. На другому після оцінки початкового напруженого стану пластини № 2 її піддавали ЕДО при $T_{\text{ЕДО}} = 100$ °С.

Термічний вплив на зразки виконували технологічним феном BOSCH 660 LCD, а температуру $T_{\text{ЕДО}}$ контролювали інфрачервоним термометром марки GT-810. Схему ЕДО в умовах супутнього підігріву наведено на рис. 4, а, процес ЕДО і зону обробки зварних з'єднань при $T_{\text{ЕДО}} = 100$ °С – відповідно на рис. 4, б, в.

Обговорення результатів експериментів. Розподіл σ_x у центральному поперечному перерізі зразків стикових з'єднань без ЕДО та після її застосування при $T_{\text{ЕДО}} = 20$ і 100 °С наведено на рис. 5. Можна бачити, що ЕДО позитивно впливає на розподіл напружень σ_x дослідних зразків, змінюючи їх від розтягування до стиску в центрі шва та на лінії сплавлення. Так, пікові значення напружень σ_x розтягування у вихідному стані (до ЕДО) у центрі шва, на лінії сплавлення і на відстані 10 мм від центру шва досягали відповідно 60, 90 і 50 МПа (рис. 5, а).

Після ЕДО при $T_{\text{ЕДО}} = 20$ °С (рис. 5, б) напруження σ_x трансформувалися у стискування, а їх пікові значення у центрі шва, на лінії сплавлення і на відстані 10 мм від центру шва досягали відповідно -35 , -25 і -5 МПа.

Після ЕДО при $T_{\text{ЕДО}} = 100$ °С (рис. 5, в) σ_x стиску у центрі шва і на лінії сплавлення не перевищували -80 і -1 МПа. На відстані 10 мм від центру шва σ_x розтягування досягали 40 МПа, тобто суттєво не змінювалися у порівнянні із вихідним станом, що можна бачити при порівнянні стовпчиків 3 відповідно на рис. 5, а, в.

Виходячи з наведеного, можна зазначити, що підігрів металу шва в процесі ЕДО сприяє підвищенню градієнта розподілу σ_x в поперечному перерізі зразка, зростанню значень σ_x стиску в центрі шва (стовпчик 1 на рис. 5, а–в).

Нагрів шва до температури $T_{\text{ЕДО}} = 100$ °С забезпечує термопружну деформацію ϵ_T подовжен-

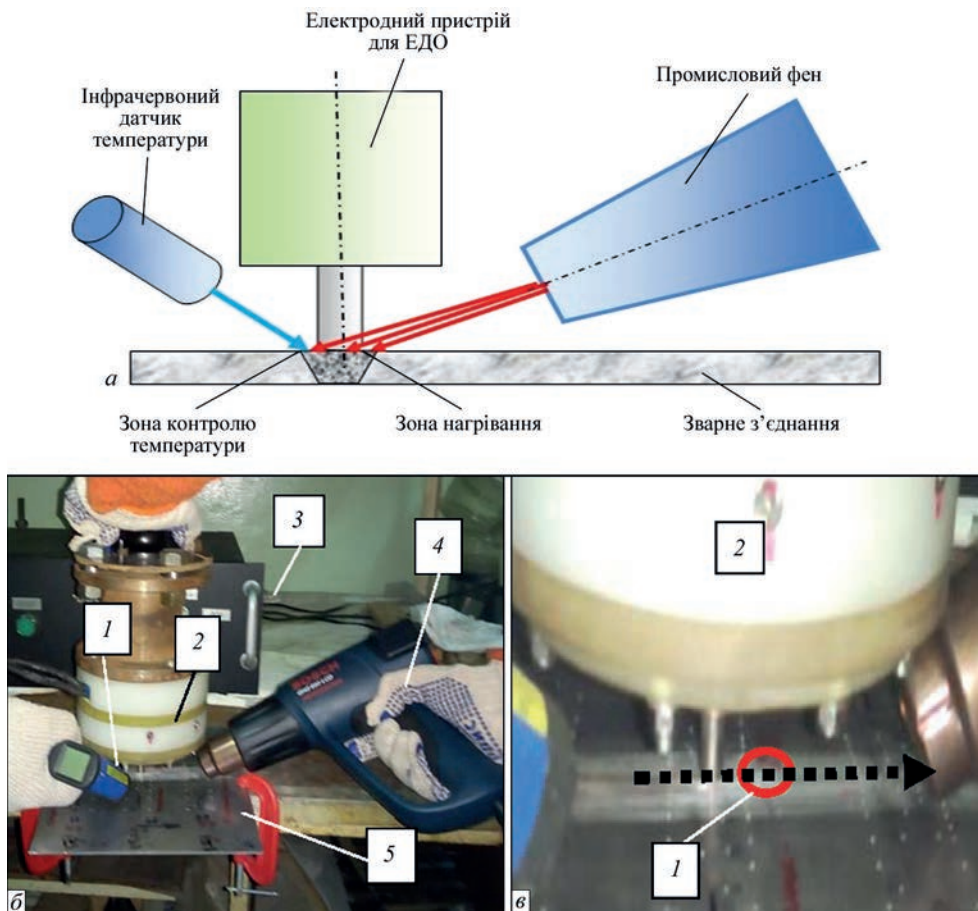


Рис. 4. Методика верифікації впливу супутнього підігріву на ефективність ЕДО зварних з'єднань: а – схема проведення досліджень; б – процес ЕДО зварних з'єднань в умовах підвищеної температури (1 – датчик температури; 2 – електродний пристрій для ЕДО; 3 – джерело живлення ЕДО; 4 – промисловий фен; 5 – зразок зварного з'єднання); в – розташування електродного пристрою 2 відносно зони обробки 1, де стрілкою вказано напрямок обробки вздовж лінії шва

ня сплаву АМгб в зоні шва, за якої метал досягає межі плинності $\sigma_{0,2}$, величина якої є меншою у порівнянні із $\sigma_{0,2}$ при $T_{\text{ЕДО}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Зменшення $\sigma_{0,2}$ при $T_{\text{ЕДО}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ зумовлює зниження залишкових напружень за рахунок зростання рівня пластичної деформації розтягування металу шва, що є результатом електропластичного деформування останнього згідно механізму, наведеному у [1, 3, 4]. Також має місце підвищення пластичності сплаву АМгб при нагріві, яке характеризується зростанням величини відносного подовження δ відповідно із 22 % при $T_{\text{ЕДО}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ до 34 % при $T_{\text{ЕДО}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ [8]. Це сприяє зростанню щільності електричного контакту пари «індентор-метал» за їх взаємодії при $T_{\text{ЕДО}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ порівняно із ЕДО при $T_{\text{ЕДО}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Наслідком цього є більш інтенсивне (порівняно з ЕДО при $T_{\text{ЕДО}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) пластичне деформування металу в зоні контакту завдяки ефекту електропластичності [9]. Це робить свій внесок у формування локальних пластичних деформацій розтягу, наслідком чого є підвищення напружень стиску в зоні обробки.

Підтвердженням більш високого градієнта розподілу σ_x в умовах підігріву є зіставлення значень $\Delta\sigma$ при $T_{\text{ЕДО}} = 150$ і $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Величину $\Delta\sigma$ визначали

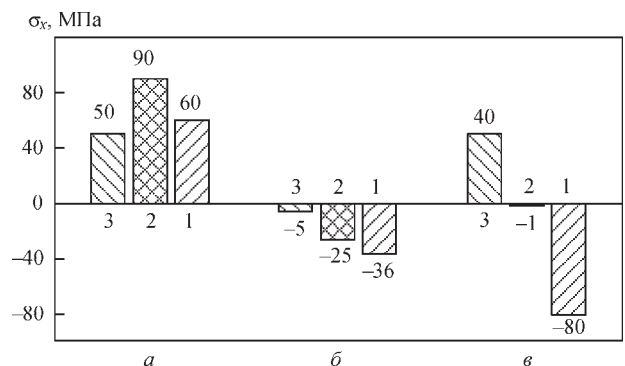


Рис. 5. Розподіл σ_x у центральному поперечному перерізі зразків стикових з'єднань: а – без застосування ЕДО; б – після ЕДО при $T_{\text{ЕДО}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; в – після ЕДО при $T_{\text{ЕДО}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ (1 – центр шва; 2 – лінія сплавлення; 3 – на відстані 10 мм від центра шва)

як абсолютну різницю напружень між значеннями σ_x у центрі шва і на лінії сплавлення зразків у вихідному стані (без ЕДО) та після обробки за різних $T_{\text{ЕДО}}$. Отримані значення $\Delta\sigma$ на різних ділянках шва при варіації $T_{\text{ЕДО}}$ наведено в табл. 2.

Із даних табл. 2 можна бачити, що ЕДО при $T_{\text{ЕДО}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ є більш ефективною (у порівнянні з ЕДО при $T_{\text{ЕДО}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) для підвищення рівня напружень стиску у центрі шва. Але для лінії сплав-

Таблиця 2. Значення $\Delta\sigma$ у центрі шва і на лінії сплавлення зразків зварних з'єднань зі сплав АМг6

Номер п/п	$T_{\text{ЕДО}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta\sigma$, МПа	
		Центр шва	Лінія сплавлення
1	20	95	115
2	100	140	91

лення має місце зворотна картина. Таким чином, ЕДО при підвищених температурах сприяє зростанню градієнта розповсюдження електродинамічного впливу на залишкові напружені стани зварних з'єднань. Зазначимо, що при циклічному навантаженні, де вплив залишкових напружень є вагомим, ніж при статичному, руйнування зварних з'єднань здебільшого проходить по лінії сплавлення. Отже, оптимальною схемою ЕДО слід вважати обробку по лінії сплавлення при $T_{\text{ЕДО}} = 150 ^\circ\text{C}$, але для цього необхідні подальші дослідження.

Враховуючи наведене, слід зазначити, що термічний потенціал є одним із вагомих чинників оптимізації напружених станів зварних з'єднань зі сплав АМг6 при ЕДО, але оптимізація схеми і параметрів електродинамічних дій потребує подальших досліджень.

Висновки

1. Обґрунтовано доцільність застосування супутнього підігріву зварного з'єднання зі сплав АМг6 при його електродинамічній обробці. Показано, що термічна дія в цілому позитивно впливає на ефективність ЕДО зварних з'єднань порівняно з їх обробкою за кімнатної температури.

2. Розроблено експериментальну методику, на базі якої проведено дослідження з оцінки впливу сумісного з ЕДО підігріву зони обробки на напружений стан зварних пластин при ЕДО.

3. Встановлено, що ЕДО центра зварного з'єднання в умовах його супутнього підігріву є більш ефективною для регулювання залишкових напружень у центрі шва і менш ефективною по лінії сплавлення порівняно з ЕДО без підігріву.

ELECTRODYNAMIC TREATMENT OF WELDED JOINTS OF ALUMINIUM AMg6 ALLOY IN THE PROCESS OF HEATING THE WELD METAL

L.M. Lobanov¹, M.O. Pashchyn¹, O.L. Mikhoduj¹, P.V. Goncharov¹, A.V. Zavdoveev¹, P.R. Ustyenko²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²NTUU «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky». 03056, Kyiv, Peremohy Ave., 37

The effect of thermal action in the process of electrodynamic treatment (EDT) of welded joints of AMg6 alloy on their stress-strained states was investigated. Based on the of the Prandtl-Reuss ratio for the movement of elastic-plastic environment at elevated temperatures, a mathematical model of evaluation of stress state of metal materials was developed as a result of their interaction with the electrode-indenter at EDT. On the basis of the developed model, a calculated evaluation of the effect of elevated temperatures on residual stresses of a preliminary strained plate of AMg6 alloy as a result of EDT was carried out. The verification of the results of the calculation with the use of welded plates of AMg6 alloy of 2 mm thickness was carried out. Thermal action was carried out with the help of the accompanying EDT preheating of the weld metal. To evaluate the effect of the thermal potential of EDT on residual stresses, TIG welding of butt-joint specimens was performed. EDT of specimens at the temperature $T_{\text{EDT}} = 20$ and $100 ^\circ\text{C}$ was performed. Applying the method of electron speckle-interferometry, the values of the longitudinal component (along the longitudinal axis of the weld) of residual welding stresses in the central cross-section of the specimens before and after EDT were measured. Thermal impact on EDT was provided with the use of a heat gun, and the heating temperature was controlled by an infrared thermometer. It was revealed that heating of the weld in the process of its EDT along the longitudinal axis of a butt joint provides greater values of residual compression stresses in the centre of the weld as compared to the treatment at $T = 20 ^\circ\text{C}$. 9 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: electrodynamic treatment, welded joints, accompanying heating, residual welding stresses, aluminium alloys

Надійшла до редакції 22.02.2022

Список літератури/References

- Lobanov, L., Kondratenko, I., Zhiltsov, A. et al. (2018) Development of post-weld electrodynamic treatment using electric current pulses for control of stress-strain states and improvement of life of welded structures. *Mater. Performance and Characterization*, 7, 4, 941–955. <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>. ISSN 2379-1365.
- Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А. (2004) Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсами электрического тока высокой плотности. *Пробл. прочности*, 4, 60–67. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I., Mameev, I.A. (2004) Nonstationary stress-strain state in long rod caused by pulses of high density electric current. *Problemy Prochnosti*, 4, 60–67 [in Russian].
- Lobanov, L.M., Pashin, N.A., Mikhodui, O.L., Sidorenko, Yu.M. (2018) Electric Pulse Component Effect on the Stress State of AMg6 Aluminum Alloy Welded Joints Under Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials, March*, 50, 2, 246–253. <https://doi.org/10.1007/s11223-018-9965-x>
- Lobanov, L.M., Pashin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*, 44, 472–479. <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>
- Lobanov, L.M., Pashin, N.A., Mikhodui, O.L., Sidorenko, Yu.M. (2017) Effect of the Indenting Electrode Impact on the Stress-Strain State of an AMg6 Alloy on Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials, May*, 49, 3, 369–380.
- Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L., Goncharov, P.V., Sydorenko, Yu.M. and Ustyenko, P.R. (2021) Modeling of stress-strain states of AMg6 alloy due to impact action of electrode-indenter in electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, 6, 2-11. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.06.01>
- Lobanov, L.M., Pashin, N.A., Mikhodui, O.L., Khokhlova, J.A. (2016) Investigation of residual stress in welded joints of heat-resistant magnesium alloy ML10 after electrodynamic treatment. *Journal of Magnesium and Alloys*, 4, 77–82.
- Фридляндер И.Н. (1974) *Алюминиевые сплавы: Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов*. Москва, Металлургия. Fridlyander, I.N. (1974) *Aluminium alloys: Structure and properties of semi-finished products from aluminium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
- Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей*. Киев, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. Strizhalo, V.A., Novogrudskiy, L.S., Vorobiov, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures taking into account the impact of electromagnetic fields*. Kyiv, IPS [in Russian].