

РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ СТАНІВ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМg61 ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛУ ШВА В ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ

Л.М. Лобанов¹, М.О. Пашин¹, О.Л. Миходуй¹, А.А. Гринюк¹, Є.В. Ілляшенко¹, П.В. Гончаров¹,
В.В. Савицький¹, Ю.М. Сидоренко², П.Р. Устименко²

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: mail@kpi.ua

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено розрахункову оцінку впливу ударної взаємодії електрода-індентора з зварною пластиною зі сплаву АМg61 при її електродинамічній обробці (ЕДО) в умовах підвищених температур. Рішення задачі проводилось в плоскій двовимірній лагранжевій постановці на базі розробленої раніше математичної моделі з використанням програми ANSYS/LS-DYNA. Рішення задачі проводилось в плоскій двовимірній лагранжевій постановці з використанням програми ANSYS/LS-DYNA. Термічний цикл зварювання задавали механічними характеристиками сплаву АМg61 при температурах 150 і 300 °С. Представлені результати розрахунку залишкових напружень при ударній дії електрода-індентора при кімнатній і підвищених температурах в попередньо напружених розтягнутим пластинах зі сплаву АМg61 товщиною 3 мм. Показано, що найбільш прийнятною (із досліджених значень температури) для виконання електродинамічної обробки сплаву АМg61 є температура 150 °С. По результатах досліджень встановлено, що електродинамічна обробка зразка зварного з'єднання у вигляді пластини, попередньо навантаженої пружним розтягуванням, призводить до переходу залишкових зварювальних напружень розтягу в напруження стискування. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: електродинамічна обробка, залишкові зварювальні напруження, алюмінієвий сплав, імпульс електричного струму, ударна взаємодія, кінцево-елементна модель, електрод-індентор, теорія пружно-пластичної течії, зварювання плавленням.

Вступ. Актуальність проблеми регулювання залишкових зварювальних напружень та деформацій в конструкціях із алюмінієвих сплавів зумовлена збільшенням їх використання у різних галузях машинобудування. Традиційні технології зменшення рівня залишкових зварювальних напружень, які базуються на механічному або термічному впливі на метал зварного з'єднання, пов'язані зі значними труднощами [1, 2].

Перспективним методом регулювання напружено-деформованих станів зварних конструкцій є електродинамічна обробка (ЕДО) зварних з'єднань, ефективність якої для підвищення точності та довговічності конструкцій із легких сплавів доведено у [3, 4]. При ЕДО метал зварного шва піддається об'ємному електродинамічному впливу, що ініціює електропластичний ефект (ЕПЕ) в зоні обробки і як наслідок – релаксацію залишкових зварювальних напружень [5].

Застосування ЕДО з урахуванням особливостей зварювального процесу є новим трендом інженерної практики, що сприяє розширенню можливостей методу. Актуальним є дослідження заходів, які направлені на підвищення ефективності про-

цесу ЕДО, одним з яких є супутній підігрів зони електроімпульсного впливу, що, згідно даних [6], стимулює механізми релаксації напружень розтягування зразків із низьковуглецевої сталі.

Реалізація технології ЕДО в процесі зварювання сприяє більш інтенсивній релаксації зварювальних напружень в результаті ЕДО у порівнянні з обробкою металу шва при кімнатній температурі. Слід зазначити, що до теперішнього часу не проводили теоретичних та експериментальних досліджень впливу тепла від джерела зварювального нагріву на ефективність застосування ЕДО як методу регулювання залишкових зварювальних напружень. Пошук оптимального режиму ЕДО в умовах зварювання пов'язаний з експериментальною оцінкою електрофізичних і механічних характеристик матеріалу, що обробляється. Альтернативним рішенням проблеми є математичне моделювання процесу ЕДО, яке дозволяє оцінювати еволюцію напружено-деформованих станів зварних з'єднань в результаті ЕДО [7–9]. Це є актуальним для оптимізації технології обробки металевих конструкцій в умовах їх зварювання.

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Пашин М.О – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>,
Миходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Ілляшенко Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9876-0320>,
Гончаров П.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1980-2340>

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Миходуй, А.А. Гринюк, Є.В. Ілляшенко, П.В. Гончаров, В.В. Савицький, Ю.М. Сидоренко, П.Р. Устименко, 2022

Метою роботи є розрахункова оцінка напружено-деформованих станів металевих матеріалів під впливом ЕДО в процесі зварювання (при підвищених температурах).

Математична модель та обговорення результатів розрахунку. Моделювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань в результаті ЕДО в умовах підвищених температур виконано з використанням спрощеної двовимірної (2D) плоскої постановки. Розрахункова схема задачі про процес ударної взаємодії електрода-індентора з пластинами [7] представлена на рис. 1. Розв'язання задачі проводилося за допомогою програми ANSYS/LS-DYNA. Для побудови скінченно-елементної сітки задачі використовувався плоский двовимірний скінченний елемент у вигляді прямокутника SOLID162. Комп'ютерне моделювання проводили на базі лагранжевого підходу з використанням рухомої скінченно-елементної сітки, яка жорстко зв'язана з середовищем та деформується разом з ним [10, 11].

Наявність геометричної симетрії електрода 1 і пластини 2, що ударно взаємодіють, дозволяє розглядати у розрахунковій схемі лише половину їхнього перерізу з одночасним накладанням на схему граничних умов.

До цих умов відноситься накладання заборони на переміщення вузлів скінченно-елементної сітки (СЕС) тіл, що знаходяться на осі симетрії, в горизонтальному напрямку «X». Розглядали спірання зварного з'єднання на абсолютно жорстку основу 3 (рис. 1), яка у математичній постановці еквівалентна накладанню заборони на переміщення у вертикальному напрямку «Z» вузлам СЕС, які належать нижній поверхні пластини 2, що контактує зі столом 3.

Для чисельного моделювання використовували континуальну (неперервну) модель пружно-пластичного середовища (пластини), що досліджується. Це дозволило записати закони збереження маси, кількості руху та енергії у вигляді диференціальних рівнянь у частинних похідних. Для

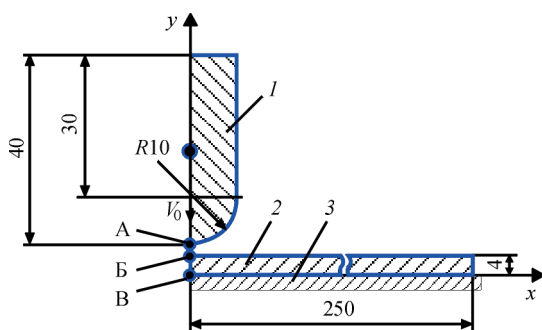


Рис. 1. Розрахункова схема процесу динамічного навантаження пластини при ЕДО: 1 – електрод-індентор, 2 – зразок, що обробляється, 3 – абсолютно жорстка основа; А – точка на зовнішній поверхні електрода-індентора, Б – точка на зовнішній поверхні пластини, В – точка на зворотній поверхні пластини, V_0 – швидкість руху електрода-індентора [11]

дослідження процесів, пов'язаних з великими пластичними деформаціями середовища, використовували теорію пластичної течії, розглядаючи пластичну деформацію твердого тіла як стан руху на базі відповідних співвідношень Прандтля-Рейсса [7].

В якості дослідного металевого матеріалу зварної пластини використовували сплав АМг61 системи Al–Mg.

В математичній постановці поведінку матеріалів пластини (алюмінієвий сплав АМг61) та електрода-індентора (мідь М1) під дією зовнішнього імпульсного навантаження описували за допомогою ідеальної пружно-пластичної моделі матеріалу [9–11]. Дана модель в бібліотеці матеріалів програми ANSYS/LS-DYNA має назву «PLASTIC-KINEMATIC».

Термічний вплив на пластину задавали варіацією значень модулю пружності E і межі плинності σ_T сплаву АМг61 при значеннях температури $T = 150$ і 300 °С. Механічні характеристики задіяних у моделюванні металевих матеріалів при різних значеннях температури T наведено у табл. 1.

Вибір значень T зумовлено моделюванням застосування ЕДО сумісно з процесом зварювання, де задані величини T відповідають розташуванню електрода-індентора вздовж лінії шва на відстані $L_{\text{ЕДО}}$ за джерелом зварювального нагріву (рис. 2). Моделювання напруженого стану виконували також для значень E і σ_T при $T = 20$ °С з метою порівняння ефективності ЕДО після вистигання шва (при $T = 20$ °С, рядок 1) та в процесі зварювання (при $T = 150$ та 300 °С, рядки 2, 3).

По результатах попередніх експериментальних досліджень встановлено, що електрод-індентор отримував значення $V_0 = 5$ м/с, а його температура в процесі зварювання не перевищувала 20 °С

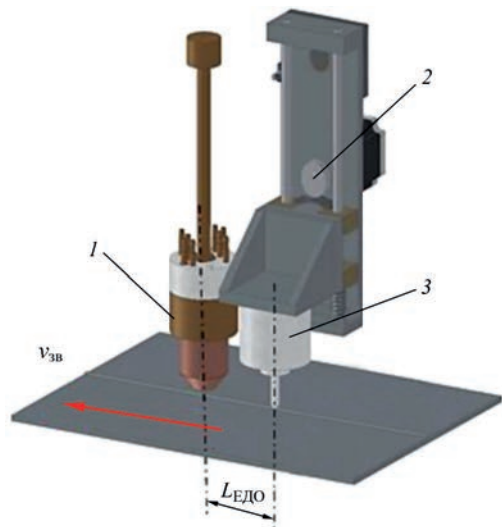


Рис. 2. Схема ЕДО у процесі зварювання: $v_{\text{зв}}$ – напрямок зварювання; 1 – пальник для зварювання; 2 – ексцентрик; 3 – електродний пристрій ЕДО; $L_{\text{ЕДО}}$ – відстань між вісями електродів для зварювання і ЕДО

Таблиця 1. Механічні характеристики структурних елементів моделі ЕДО сплаву АМг61 в процесі зварювання

Номер	Структурний елемент моделі	Матеріал	Щільність ρ , кг/м ³	Коефіцієнт Пуассона, μ	T , °C	Модуль пружності E , ГПа	Межа текучості σ_T , МПа	Відносне подовження δ , %
1	Пластина 300 × 200 × 3 мм	АМг61	2640	0,34	20	71	150	22
150					60	120	40	
300					55	50	55	
4	Електрод діаметром 15 мм	М1	8940	0,35	20	128	300	6

[7]. Тому властивості електрода-індентора при його контактній взаємодії з пластиною задавали виключно для $T = 20\text{ °C}$ (табл. 1, рядок 4).

Вибір значень T зумовлено результатами роботи [12], де досліджено механізм дії ЕДО на релаксацію напружень $\Delta\sigma$ плоских зразків сплаву АМг61 при їх навантаженні поздовжнім (вздовж головної вісі зразка) розтягуванням σ_0 . У роботі показано, що максимальні значення $\Delta\sigma$, які визначали ефективність обробки, досягалися при розтягуванні зразків до $\sigma_0 = \sigma_T$.

Зварювальний нагрів створює термічне розширення металу в зоні обробки. Згідно даних табл. 1, при зростанні T значення пружності σ_T сплаву АМг61 зменшуються, а пластичності δ – зростають. Це, базуючись на результатах [12], сприяє інтенсифікації процесу релаксації $\Delta\sigma$ залишкових зварювальних напружень за менших значень σ_T при сталому рівні енергії $E_{\text{ЕДО}}$ електродинамічної дії. Тобто при $E_{\text{ЕДО}} = \text{const}$ значення $\Delta\sigma$ мають зворотню залежність від σ_T . Механізми релаксації базуються на синергії ефекту електропластичності і суперпозиції хвилі пружних напружень від ЕДО з полем залишкових зварювальних напружень [3, 12].

Обґрунтування вибору діапазону T базували на наступних положеннях. При $T = 150\text{ °C}$ (табл. 1, рядок 2) сплав АМг61 зберігає пружні

властивості, що робить домінуючим вклад пружної хвилі напружень в релаксацію напружених станів у порівнянні з електропластичною складовою. При $T = 300\text{ °C}$ (табл. 1, рядок 3) спостерігається зворотня картина, тобто сплав АМг61 має високу пластичність при малій пружності. Це робить домінуючою пластичну складову в процесі релаксації напружень. Моделювання напружених станів за різних значень T дозволяє оптимізувати умови термічного впливу на дію ЕДО в процесі зварювання.

Зварювальні напруження у площині пластили моделювали завданням значень поздовжньої σ_x (вздовж вісі x на рис. 1) та поперечної σ_y (по нормалі до вісі x) компонент напружень розтягування. Значення σ_x і σ_y відповідно приймали рівними σ_T та $0,5\sigma_T$ сплаву АМг61 при $T = 20, 150$ і 300 °C . Результатом моделювання є розподіл компонент σ_x і σ_y тимчасових та залишкових напружень по товщині пластили у точках Б, В та між ними після її динамічного навантаження вздовж осі z , як показано на рис. 3. Моделювали розподіл тимчасових та залишкових σ_x і σ_y на відстані 5 мм від лінії Б-В на обох поверхнях пластили та між ними. Це дозволило визначити характер розповсюдження дії ЕДО від лінії Б-В по товщині пластили.

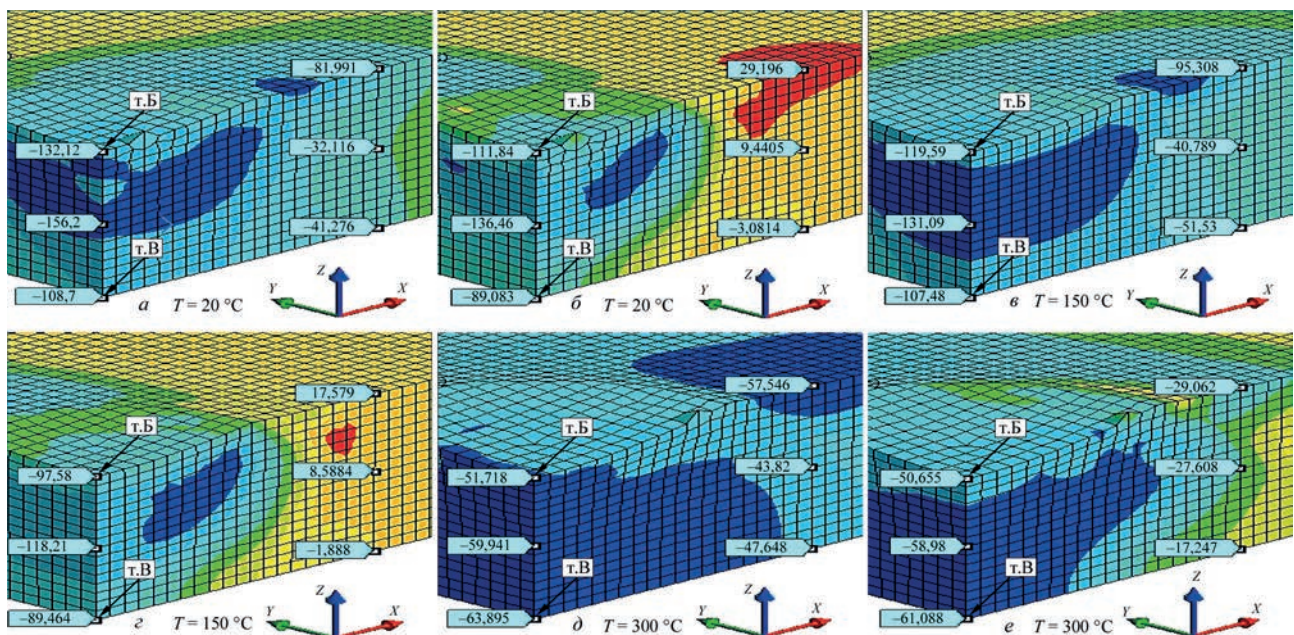


Рис. 3. Миттєві картини розрахункового розподілу значень (МПа) компонент напружень σ_x , σ_y у пластині зі сплаву АМг61 $\delta = 3$ мм в момент завершення дії ЕДО по лінії між точками Б і В (рис. 2) та на відстані 5 мм від лінії Б-В: а – σ_x при $T = 20\text{ °C}$; б – σ_y при $T = 20\text{ °C}$; в – σ_x при $T = 150\text{ °C}$; г – σ_y при $T = 150\text{ °C}$; д – σ_x при $T = 300\text{ °C}$; е – σ_y при $T = 300\text{ °C}$

Розглядали розподіли напружень σ_x і σ_y по лінії Б-В (рис. 3) та на відстані 5 мм від неї після ЕДО при $T = 20, 150$ і 300 °С.

На рис. 3 представлені результати моделювання розподілу напружень σ_x і σ_y у вигляді аксонометричних поверхонь у перерізі пластин $\delta = 3$ мм в момент завершення (миттєві картини) контактної дії ЕДО при температурі $T = 20, 150$ і 300 °С. На рис. 3 наведено значення напружень вздовж лінії між т. Б та т. В та на відстані 5 мм від лінії Б-В. Аналізуючи в цілому результати рис. 3, можна бачити домінування напружень стискування в усьому розглянутому діапазоні температур як на відрізьку БВ (тобто вздовж лінії контактної дії), так і на відстані 5 мм від неї.

Температурний вплив на пластини зі сплаву АМг61 в умовах контактної взаємодії з індентором викликає певні особливості формування напружених станів зразків, що будуть розглянуті нижче.

На рис. 4 представлені розподіли напружень σ_x вздовж лінії між точками Б і В (рис. 1) пластин сплаву АМг61 $\delta = 3$ мм після ЕДО при варіації температурного впливу T . Доцільність дослідження компоненти σ_x пов'язана з її домінуючим впливом на експлуатаційні характеристики зварних з'єднань [2].

На рис. 4, а, б можна бачити, що поблизу середини площини пластини ($z = \delta/2$) має місце зростання значень σ_x по відношенню до напружень в т. Б і т. В. Це пояснюється ефектом відбиття хвилі напружень при ЕДО від абсолютно жорсткої основи 3 (див. рис. 2). Математичну модель механізму відбиття та верифікацію результатів розрахунку при $T = 20$ °С розглянуто у роботі [11].

З використанням даних табл. 1 проводили аналіз не абсолютних значень напружень σ_x і σ_y , а зведених відносно σ_T . Це, враховуючи залежність $\sigma_T = f(T)$, дозволило провести коректну порівняльну оцінку впливу варіації значень T на ефективність ЕДО.

При 20 °С по лінії Б-В значення σ_x і σ_y напружень стискування у т. Б більші, ніж у т. В (рис. 3, а, б). Так, у т. Б σ_x досягає значень $-0,88 \sigma_T$, а у т. В $-0,75 \sigma_T$, а σ_y у т. Б досягає $-0,74 \sigma_T$ та $-0,6 \sigma_T$ у т. В. На ділянці перерізу, що відповідає половині товщини пластини (в подальшому – ділянка $\delta/2$) σ_x і σ_y досягають значень відповідно $-\sigma_T$ (рис. 4, а для σ_x) та $-0,9 \sigma_T$. Тобто під максимальний вплив напружень σ_x і σ_y стискування після ЕДО при $T = 20$ °С підлягає ділянка поблизу середини площини пластини ($z = \delta/2$).

При віддаленні від лінії Б-В на 5 мм має місце зниження напружень та зміна характеру їх розподілу по товщині пластини (рис. 3, а, б). Так, σ_x стискування досягають $-0,55 \sigma_T$ в т. Б та $-0,27 \sigma_T$ – в т. В. На ділянці $\delta/2$ σ_x досягають $-0,2 \sigma_T$. При тому

σ_y на віддаленні у 5 мм від лінії Б-В є розтягуючими, які досягають $0,2 \sigma_T$ у т. Б, монотонно знижуються до $0,06 \sigma_T$ у т. В/2 і майже до нуля – у т. В.

Підвищення температури обробки до 150 °С (рис.3, в, г) позитивно впливає (у порівнянні з $T = 20$ °С) на величину і характер розповсюдження напружень стиску у перерізі пластини. При тому область дії напружень σ_x стиску по перерізу пластини дещо більша у порівнянні із областю дії при $T = 20$ °С (рис. 3, а, б). У т. Б σ_x і σ_y стискування, як і при $T = 20$ °С, більші, ніж на зворотній. Так, у т. Б значення σ_x і σ_y досягають відповідно $-\sigma_T$ і $-0,8 \sigma_T$ сплаву АМг61 при $T = 150$ °С та $-0,95$ і $-0,77 \sigma_T$ при вистиганні до $T = 20$ °С (рис. 4, б для σ_x). У т. В/2 значення σ_x і σ_y досягають $-\sigma_T$ для температур 150 і 20 °С. У т. В σ_x досягають значень $-0,85 \sigma_T$, а $\sigma_y = -0,71 \sigma_T$ при $T = 150$ °С та $\sigma_x = -0,89 \sigma_T$, а $\sigma_y = -0,74 \sigma_T$ при $T = 20$ °С (рис. 4, б для σ_x).

На віддаленні 5 мм від лінії Б-В, як і у попередньому випадку, напруження стиску на лицьовій стороні пластини більші за абсолютною величиною, ніж з боку опорної плити. При $T = 150$ °С максимальні значення σ_x стискування у т. Б досягають $-0,8 \sigma_T$ (рис. 3, в) і при вистиганні до 20 °С

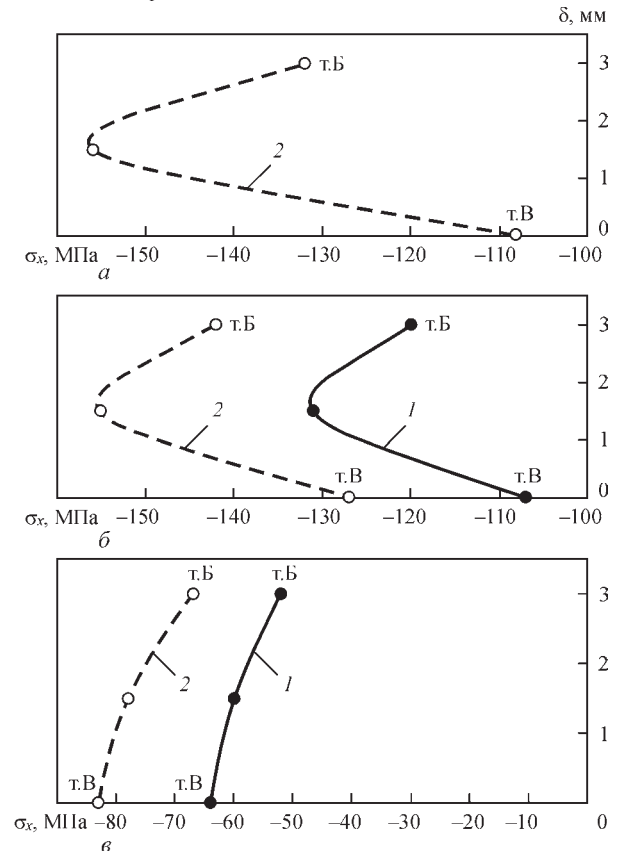


Рис. 4. Напруження σ_x вздовж лінії між точками Б і В (рис. 2) пластин сплаву АМг61 $\delta = 3$ мм після ЕДО при температурі T та вистиганні до $T = 20$ °С, де крива 1 – σ_x (миттєві) в момент завершення контактної взаємодії при підвищених температурах, крива 2 – σ_x при кімнатній температурі: а – $T = 20$ °С; б – 150 ; в – 300

Таблиця 2. Відносні величини компонент σ_x і σ_y напружень в пластині сплаву АМг61 $\delta = 3$ мм після ЕДО при варіації значень температури T її супутнього підігріву

Номер	$T, ^\circ\text{C}$	Лінія Б-В						5 мм від лінії Б-В					
		σ_x			σ_y			σ_x			σ_y		
		т. Б $x\sigma_T$	т. $\delta/2$ $x\sigma_T$	т. В $x\sigma_T$	т. Б $x\sigma_T$	$\delta/2$ $x\sigma_T$	т. В $x\sigma_T$	5 мм від т. Б $x\sigma_T$	5 мм від $\delta/2$ $x\sigma_T$	5 мм від т. В $x\sigma_T$	5 мм від т. Б $x\sigma_T$	5 мм від $\delta/2$ $x\sigma_T$	5 мм від т. В $x\sigma_T$
1	20	-0,88	-1,0	-0,75	-0,74	-0,9	-0,6	-0,55	-0,2	-0,27	0,2	0,06	0
2	150	-1,0	-1,0	-0,85	-0,8	-1,0	-0,71	-0,8	-0,34	-0,43	0,15	0,07	0
3	20 Після вистигання від $T = 150^\circ\text{C}$	-0,95	-1,0	-0,89	-0,77	-1,0	-0,74	-0,75	-0,34	-0,43	0,15	0,07	0
4	300	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-0,88	-1,0	-0,6	-0,54	-0,34
5	20 Після вистигання від $T = 300^\circ\text{C}$	-0,44	-0,54	-0,5	-0,44	-0,54	-0,5	-0,49	-0,38	-0,41	-0,24	-0,24	-0,14

сягають $-0,75\sigma_T$. При $T = 150$ і 20°C максимальні значення σ_y розтягування на контактній поверхні досягають $0,15\sigma_T$. На ділянці $\delta/2$ значення σ_x стискування досягають $-0,34\sigma_T$, а σ_y розтягування відповідно $0,07\sigma_T$ для температур 150 і 20°C . У т. В σ_x стискування досягають $-0,43\sigma_T$, а σ_y близькі до нуля в розглянутому діапазоні температур. Розповсюдження σ_y по перерізу пластини дещо збільшується у порівнянні з результатами рис. 3, б. При порівнянні значень σ_x на віддаленні 5 мм від лінії Б-В при $T = 20$ і 150°C можна бачити, що термічний вплив сприяє формуванню більших напружень стискування, ніж після ЕДО при кімнатній температурі.

При порівнянні з ЕДО при $T = 20^\circ\text{C}$ можна бачити, що підвищення температури обробки до 300°C (рис. 3, д, е) сприяє розповсюдженню напружень стискування по товщині пластини та зменшенням їх значень у порівнянні з результатами при $T = 20$ і 150°C (рис. 3, а-г). У т. Б значення σ_x і σ_y напружень стискування, на відміну від попередніх варіантів, менші, ніж в т. В і досягають $-\sigma_T$ при $T = 300^\circ\text{C}$ та $-0,44\sigma_T$ при вистиганні до $T = 20^\circ\text{C}$ (рис. 4, в для σ_x). В т. $\delta/2$ σ_x і σ_y стискування досягають значень $-\sigma_T$ для $T = 300^\circ\text{C}$ та $-0,54\sigma_T$ для $T = 20^\circ\text{C}$. У т. В σ_x і σ_y стискування досягають $-\sigma_T$ при $T = 300^\circ\text{C}$ та $0,5\sigma_T$ при $T = 20^\circ\text{C}$. При тому область дії напружень σ_x (рис. 3, д) по перерізу пластини втричі збільшується у порівнянні з варіантом ЕДО при $T = 20^\circ\text{C}$ (рис. 3, а).

На віддаленні 5 мм від лінії Б-В, як і у попередніх варіантах розрахунку, визначається зниження напружень (рис. 3, д, е). Так, максимальні значення σ_x стискування в т. Б досягають $-\sigma_T$ при $T = 300^\circ\text{C}$. При вистиганні до $T = 20^\circ\text{C}$ σ_x стискування в т. Б досягають $-0,49\sigma_T$ (рис. 4, в). Напруження σ_y на віддаленні 5 мм від лінії Б-В є стискаючими по товщині пластини в діапазоні T від 300 до 20°C . На поверхні біля т. Б при $T = 300^\circ\text{C}$ σ_y досягають $-0,6\sigma_T$ та при $T = 20^\circ\text{C}$ відповідно $-0,24\sigma_T$.

У т. $\delta/2$ σ_x стискування досягають $-0,88\sigma_T$ при $T = 300^\circ\text{C}$ та $-0,38\sigma_T$ при $T = 20^\circ\text{C}$ (рис. 4, в). У т. $\delta/2$ σ_y стискування досягають значень $-0,54\sigma_T$ при $T = 300^\circ\text{C}$ та $-0,24\sigma_T$ при $T = 20^\circ\text{C}$. На поверхні біля т. В σ_x стискування при $T = 300^\circ\text{C}$ досягають $-\sigma_T$, а при $T = 20^\circ\text{C}$ має місце їх зниження до $-0,41\sigma_T$ (рис. 4, в). На поверхні біля т. В σ_y стискування при $T = 300^\circ\text{C}$ досягають $-0,34\sigma_T$, а при $T = 20^\circ\text{C}$ також має місце їх зниження до $-0,14\sigma_T$. Також розповсюдження σ_y по перерізу пластини суттєво збільшується у порівнянні з результатами рис. 3, б. При порівнянні значень σ_y на віддаленні 5 мм від лінії Б-В при $T = 20$ і 300°C слід зазначити, що термічна дія сприяє розширенню області дії напружень стиску при зменшенні їх значень.

Описані вище результати моделювання узагальнено в табл. 2. При порівнянні рядків 1 і 2 та 1 і 4 можна бачити, що термічна дія, яка є супутньою ЕДО, ініціює більші миттєві значення напружень (по відношенню до σ_T) при підвищених температурах у порівнянні із σ_x і σ_y при $T = 20^\circ\text{C}$. Це сприяє формуванню більш високих напружень стискування при вистиганні пластини у порівнянні з напруженим станом після ЕДО при $T = 20^\circ\text{C}$. При порівнянні рядків 1 і 3 можна бачити, що ЕДО пластин сплаву АМг61 $\delta = 3$ мм в умовах їх термопружного нагріву (при $T = 150^\circ\text{C}$) є більш ефективною, ніж при $T = 20^\circ\text{C}$. Але при ЕДО за температури термопластичності ($T = 300^\circ\text{C}$) високі значення миттєвих напружень, що співставні з σ_x і σ_y при $T = 150^\circ\text{C}$ (відповідно рядки 4 і 2), формують суттєво нижчі залишкові напруження стискування, що видно при порівнянні рядків 3 та 5. Даний факт можна пояснити тим, що за низьких значень σ_T при $T = 300^\circ\text{C}$ (табл. 1, рядок 3) релаксаційні процеси проходять менш інтенсивно, ніж при пружному нагріві до $T = 150^\circ\text{C}$, що свідчить про домінування пружної складової в формуванні напружено-деформованих станів при ЕДО. Це підтверджують результати роботи [12], в якій доведено, що найбільш ефективною є ЕДО плоских зразків сплаву АМг6,

що були попередньо розтягнуті до σ_T . Тобто, попередній нагрів зразків до $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$ згідно [12], сприяє максимальній ефективності ЕДО.

Висновки

1. Доведено, що застосування електродинамічної обробки (ЕДО) металу шва, яка виконується в єдиному процесі синхронно зі зварюванням плавленням, є більш ефективним у порівнянні з роздільною ЕДО після зварювання, що виражається в більш оптимальному залишковому напружено-деформованому стані готового зварного з'єднання.

2. На базі розробленої раніше математичної моделі ударної взаємодії електрода-індентора з зварною пластиною зі сплаву АМг61 проведено чисельна розрахункова оцінка її напружених станів в результаті ЕДО при підвищених температурах.

3. З використанням математичної моделі механізму ударної взаємодії електрода-індентора зі зварною пластиною при ЕДО в умовах підвищених температур у плоскій двовимірній постановці виконано моделювання напружень при ударній пружно-пластичній дії електрода-індентора при температурі 20, 150 і 300 °C в пластині сплаву АМг61 товщиною 3 мм. Встановлено, що найбільш задовільний (із досліджених) напружений стан відповідає ЕДО при температурі 150 °C.

Список літератури/References

1. Madi, Y., Besson, J. (2014) *Effect of residual stresses on brittle fracture*. Mat. ECRS-9. UTT, Troyes, France.

2. Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*, Pergamon Press, Oxford, United Kingdom.

3. Lobanov, L.M., Pashchyn, N.A., Kondratenko, I.P. 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. *Materials Performance and Characterization*, 7, 4. <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>. ISSN 2379-1365

4. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Tymoshenko, O.M. et al. (2020) Increase in the life of welded joints of AMg6 aluminum alloy. *The Paton Welding J.*, 4, 2–8. <https://doi.org/10.37434/as2020.04.01>

5. Conrad H., Sprecher A. (1989) *The electroplastic effect in metals*. Elsevier Science Publishers B.V., Dislocations in Solids Ed. by F.R.N. Nabarro, pp. 500–529.

6. Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. (2004) High-Density Pulse Current-Induced Unsteady Stress-Strain State in a Long Rod. *Strength of Materials*, 36, 377–381. <https://doi.org/10.1023/B:STOM.0000041538.10830.34>

7. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mykhodui, O.L., Sydorenko, Yu.M. (2017) Effect of the Indenting Electrode Impact on the Stress-Strain State of an AMg6 Alloy on Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials*, 49, 3, 369–380. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9877-1>

8. Sydorenko, Y.M., Pashchyn, M.O., Mykhodui, O.L. et al. (2020) Effect of Pulse Current on Residual Stresses in AMg6 Aluminum Alloy in Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials*, 52, 5, 731–737. DOI: 10.1007/s11223-020-00226-2

9. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L., Sidorenko, Y.M. (2018) Electric Pulse Component Effect on the Stress State of AMg6 Aluminum Alloy Welded Joints Under Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials*, 50, 2, 246–253. DOI: 10.1007/s11223-017-9862-8 10.

10. <http://www.ansys.com/>

11. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (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.

12. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., 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>

CALCULATION EVALUATION OF STRESS-STRAINED STATES OF WELDED JOINTS OF ALUMINIUM AMg61 ALLOY UNDER THE ACTION OF ELECTRODYNAMIC TREATMENT OF WELD METAL IN THE PROCESS OF FUSION WELDING

L.M. Lobanov¹, M.O. Pashchyn¹, O.L. Mikhodui¹, A.A. Hryniuk¹, E.V. Ilyashenko¹, P.V. Goncharov¹, V.V. Savitsky¹, Yu.M. Sydorenko², P.R. Ustyomenko²

¹NTUU «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky». 03056, Kyiv, Peremohy Ave., 37. E-mail: mail@kpi.ua
²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

The calculation evaluation of effect of impact interaction of electrode-indenter with a welded plate of AMg61 alloy at its electrodynamic treatment (EDT) in the conditions of elevated temperatures was carried out. The solution of the problem was carried out in a flat two-dimensional Lagrangian statement based on a previously developed mathematical model using ANSYS/LS-DYNA software. The thermal cycle of welding was set by mechanical characteristics of AMg61 alloy at temperatures of 150 and 300 °C. The results of the calculation of residual stresses during impact action of electrode-indenter at room and elevated temperatures in preliminary tensioned plates of AMg61 alloy of 3 mm thickness were presented. It is shown that the most acceptable temperature (from the studied temperature values) for the electrodynamic treatment of AMg61 alloy is 150 °C. Based on the results of the studies, it was found that the electrodynamic treatment of welded joint specimen in the form of a plate preliminary loaded with elastic tension leads to the transition of residual welding tensile stresses into compression stresses. 12 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: electrodynamic treatment, residual welding stresses, aluminium alloy, electric current pulse, impact interaction, finite-element model, electrode-indenter; elastic-plastic flow theory, fusion welding.

Надійшла до редакції
23.06.2022