

РОЗРАХУНКОВЕ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ТОВЩИНИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СПЛАВУ АМГ6 НА ЇХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ В ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ

Л.М. Лобанов¹, М.О. Пашин¹, О.Л. Міходуй¹, Н.Л. Тодорович¹, Ю.М. Сидоренко², П.Р. Устименко²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

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

Проведено розрахункове оцінювання ефективності впливу електродинамічної обробки (ЕДО) на напружений стан стикових зварних з'єднань пластин із алюмінієвого сплаву АМГ6 при зростанні їх товщини δ . Виконано математичне моделювання кінетики і залишкових напружених станів стикових зварних з'єднань $\delta = 2, 4$ і 8 мм в результаті їх ЕДО за різних значень температури T пластин, за яких проводили обробку. Значення вертикальної швидкості V_0 електрода-індентора (інструмента ЕДО) приймали $V_0 = 5$ м/с, що відповідає сучасним електрофізичним характеристикам обладнання для ЕДО. Задавали значення T , що відображали умови виконання ЕДО після зварювання ($T = 20$ °C) та в процесі зварювання плавленням ($T = 150$ і 300 °C). Розв'язок задачі проводили в тривимірній постановці із використанням програми ANSYS. Умови формування напружень в пластинах при ЕДО після та в процесі зварювання задавали механічними характеристиками сплаву АМГ6 при температурах $T = 20, 150$ і 300 °C без врахування охолодження. Представлені результати розрахунку залишкових напружень в зварних з'єднаннях. Показано, що за значення $T = 150$ °C виконання ЕДО забезпечує найбільш оптимальні залишкові напружені стани пластин в усьому дослідному діапазоні δ . Доведено, що ЕДО в процесі зварювання (при $T = 150$ °C) є більш ефективною у порівнянні із ЕДО металу після вистигання ($T = 20$ °C). Встановлено, що при ЕДО зварних з'єднань $\delta = 2...4$ мм формуються залишкові напруження стиску по усій товщині пластин, значення яких близькі до межі плинності сплаву АМГ6. При ЕДО зварних з'єднань $\delta = 8$ мм залишкові напруження стиску формуються на зовнішній поверхні пластин, а на зворотній – розтягу. Бібліогр. 11, табл. 2, рис. 5.

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

Вступ. Залишкові напруження негативно впливають на довговічність та корозійну стійкість зварних конструкцій із сплавів на основі алюмінію, тим самим знижуючи їх експлуатаційний ресурс. В світовій практиці спостерігається зростання об'ємів виготовлення таких конструкцій, що приходять на заміну виробам із високоміцних сталей. Враховуючи наведене, проблема зменшення залишкових напружень розтягу або формування напружень стиску в зварних з'єднаннях зі сплавів на основі алюмінію є актуальною. Традиційні технології керування залишковим напруженням станом (ЗНС) потребують застосування металоємного оснащення та (або) значних витрат енергії і не завжди відповідають вимогам сучасної інженерної практики [1, 2], яка потребує інноваційних енергозаощадливих підходів до виробництва.

Актуальність досліджень. Електродинамічна обробка (ЕДО) зварних з'єднань імпульсами електричного струму є інноваційним підходом до керування ЗНС зварних конструкцій, який базується на застосуванні імпульсних електромагнітних полів та їх похідних [3–6].

Доведено, що підігрів зони електроімпульсного впливу до температури T стимулює механізми релаксації ЗНС [7]. Це спонукає до розробки технологій застосування ЕДО у поєднанні із процесом зварювання. Експериментально доведено, що реалізація ЕДО при підвищеній T в процесі зварювання сприяє більш інтенсивній релаксації ЗНС в результаті ЕДО у порівнянні із обробкою металу шва при кімнатній T [8].

Але електрофізичні характеристики існуючого обладнання для ЕДО забезпечують значення накопиченої енергії E_c (значення E_c є визначальною характеристикою ефективності ЕДО) ємнісного накопичувача C , які не перевищують $1,0$ кДж. Це спонукає до оцінювання граничних можливостей застосування ЕДО, як засобу ефективного впливу на ЗНС зварних конструкцій. Як відомо з результатів попередніх експериментальних досліджень, ефективність ЕДО знижується зі зростанням товщини δ металу, що підлягає обробці [9]. До теперішнього часу не проводили теоретичного оцінювання впливу δ зварних з'єднань на ефективність ЕДО, в тому числі і при обробці металу за різних

Лобанов Л.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Пашин М.О. – <http://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Тодорович Н.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-3872-5790>, Сидоренко Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-8780-9459>, Устименко П.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-5318-2675>
© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, Н.Л. Тодорович, Ю.М. Сидоренко, П.Р. Устименко, 2024

значень T , до яких нагрівається метал в процесі зварювання. Результати таких досліджень дозволяють визначити найбільшу граничну δ зварних з'єднань, в межах якої ЕДО є ефективним регулятором ЗНС при існуючих можливостях устаткування для ЕДО, тобто за умови $E_C \leq 1$ кДж, що відповідає кінетичній енергії електрода-ударника зі швидкістю до 5 м/с. Шляхом вирішення проблеми є математичне моделювання, для початку, динамічної (ударної) складової ЕДО для визначення впливу різної δ зварних з'єднань на ЗНС після їх ЕДО в процесі та після зварювання. Це має сприяти оптимізації технології ЕДО шляхом визначення граничних можливостей її застосування для ефективного керування ЗНС зварних з'єднань.

Метою роботи є розрахункова оцінка впливу товщини зварних з'єднань на їх ЗНС в результаті обробки ударною складовою ЕДО металу після та в процесі зварювання (при підвищених температурах).

Методика і розрахункова схема задачі. Об'єктом досліджень є процес чисельного розрахунку НДС модельних зварних з'єднань в результаті ударної обробки як складової ЕДО в умовах підвищених температур, який виконували в скінченно-елементній постановці за допомогою програми ANSYS/AUTODYN [10] у явному вигляді. Для побудови скінченно-елементної сітки (СЕС) задачі використовували тривимірний призматичний скінченний елемент SOLID164, а моделювання проводили із використанням рухомої СЕС, яка була жорстко зв'язана із середовищем та деформувалася разом з ним. Розрахункову схему та граничні умови задачі про процес ударної взаємодії електрода-індентора з пластиною, яку описано у роботі [8], наведено на рис. 1. Наявність геометричної симетрії електрода 1 і пластины 2, які динамічно взаємодіють, дозволяє розглядати у розрахунковій схемі лише їх четверту частину з обмеженням переміщення тіл на площинах симетрії.

В якості предмету дослідження використовували модель стикового зварного з'єднання зі сплаву АМг6 системи легування Al–Mg у вигляді попередньо напруженої пластины рівномірним одноосовим розтягом. Залишкові зварювальні напруження у площині пластины моделювали заданням значень поздовжньої компоненти σ_x (вздовж вісі x на рис. 1) напружень розтягу. Оскільки вплив ЕДО на напружений стан обробленої пластины є досить локальним за розміром, наприклад, до 10...15 мм, тому можна прийняти, що в зоні залишкових напружень розтягування при ЕДО ці напруження можна прийняти постійними. Застосована схема розрахунку є спрощеною, що не відтворює реальний розподіл залишкових напружень у зварному з'єднанні, але потребує мінімального часу розрахунку. По результатах порівняння σ_x в центрі шва (в зоні контактної взаємодії) після ЕДО за різних значень T можна вибрати температурний режим обробки, що забезпечує оптимальні залишкові напруження. Схема

розрахунку реальних розподілів напружень в поперечному перерізі зварного з'єднання із урахуванням активної зони – розтягу і реактивної – стиску буде реалізовано в подальших дослідженнях.

В математичній постановці поведінку матеріалів пластины (алюмінієвий сплав АМг6) та електрода-індентора (мідь М1) під дією зовнішнього імпульсного навантаження описували за допомогою ідеальної пружно-пластичної моделі матеріалу. Дана модель в бібліотеці матеріалів програми ANSYS/AUTODYN має назву «PLASTIC-KINEMATIC» [10]. Контактна взаємодія відбувалася без третя.

Розглядали взаємодію електрода-індентора із пластинами розмірами 300×200 мм і товщиною $\delta = 2, 4$ і 8 мм, які згідно прийнятій класифікації відносять до тонколистових конструкцій [11].

Вплив температури без врахування охолодження модельного зварного з'єднання описувався шляхом зміни таких механічних характеристик як модуль пружності E та межа плинності σ_T сплаву АМг6 при температурах $T = 150$ і 300 °С, де вибір значень T обґрунтовано у [8]. Моделювання виконували також для $T = 20$ °С з метою порівняння ефективності ЕДО після та в процесі зварювання. Значення компоненти σ_x залишкових зварювальних напружень відповідно приймали рівними σ_T сплаву АМг6 при $T = 20, 150$ і 300 °С. Механічні характеристики задіяних у моделюванні металевих матеріалів при $T = 20, 150$ і 300 °С наведено у табл. 1.

Задані значення T відповідають місцю розташування електрода-індентора вздовж лінії шва на відстані $L_{\text{ЕДО}}$ за джерелом зварювального нагріву (рис. 2).

За результатами попередніх експериментальних досліджень встановлено, що електрод-індентор отримував значення $V_0 = 5$ м/с (за умови $E_C = 1$ кДж), а його температура в процесі зварювання не перевищувала 20 °С [8]. Тому властивості електрода-індентора при його контактній взаємодії з пластиною задавали виключно для $T = 20$ °С (табл. 1).

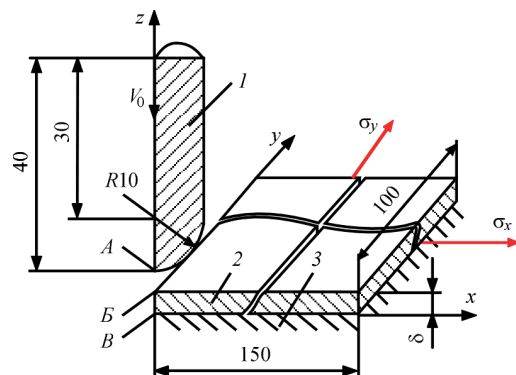


Рис. 1. Розрахункова схема процесу динамічного навантаження пластины при ЕДО: 1 – електрод-індентор; 2 – зразок, що обробляється; 3 – абсолютно жорстка основа; А – точка на зовнішній поверхні електрода-індентора; В – точка на зовнішній поверхні пластины; В – точка на зворотній поверхні пластины; V_0 – швидкість руху електрода-індентора [8]; x, y, z – вісі координат

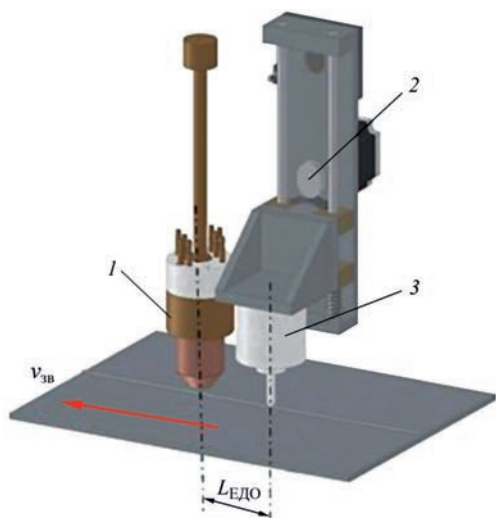


Рис. 2. Схема ЕДО у процесі зварювання, де $V_{зв}$ – напрямк зварювання; 1 – пальник для зварювання; 2 – система динамічного навантаження електрода ЕДО; 3 – електродний пристрій ЕДО; $L_{ЕДО}$ – відстань між вісями електродів для зварювання і ЕДО [8]

Результати моделювання та їх обговорення. Як відомо, компонента σ_x має значно більший вплив на ЗНС зварних з’єднань у порівнянні із σ_y [11]. В результаті моделювання отримані аксонометричні поверхні розподілу компоненти σ_x напружень (миттєві напруження) по товщині металу в момент завершення контактної взаємодії при $T = 20, 150$ і 300 °С електрода-індентора з пластиною $\delta = 2$ мм (рис. 3), $\delta = 4$ мм (рис. 4) та $\delta = 8$ мм (рис. 5) вздовж лінії удару (ЛУ) в точках Б і В (рис. 1), а також на вісі X на відстані 5 мм (рис. 3, а) від ЛУ для оцінки розподілу напружень вздовж центральної лінії шва.

Аналізуючи в цілому результати рис. 3–5, слід зазначити, що після ЕДО при $T = 150$ °С і 300 °С в пластинах формуються напруження, які дещо перевищують значення $\sigma_T = f(T^\circ\text{C})$ (табл. 1). Але результати моделювання дозволяють (у якісному відношенні) порівняти ЗНС пластин $\delta = 2 \dots 8$ мм після ЕДО за різних T і визначити оптимальне значення T , за якого досягається найбільша ефективність дії ЕДО на ЗНС зварних з’єднань. Можна бачити домінування миттєвих напружень σ_x стиску вздовж ЛУ в усьому розглянутому діапазоні δ і T . На відстані 5 мм від ЛУ дещо інша картина. Так, якщо для компонент σ_x в діапазоні $\delta = 2 \dots 4$ мм при усіх значеннях T домінують напруження стиску, то для $\delta = 8$ мм характерна зміна знаку напружень по товщині пластини від стиску у т. Б до розтягу у т. В.

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

Номер	Структурний елемент моделі	Матеріал	Щільність ρ , кг/м ³	Коефіцієнт Пуассона μ	T , °С	Модуль пружності E , ГПа	Межа плинності σ_p , МПа	Відносн. подовж. δ , %
1	Пластина 300×200×2...8 мм	АМгб	2640	0,34	20	71	150	22
2					150	60	120	40
3					300	55	50	55
4	Електрод діаметром 15 мм	М1	8940	0,35	20	128	300	6

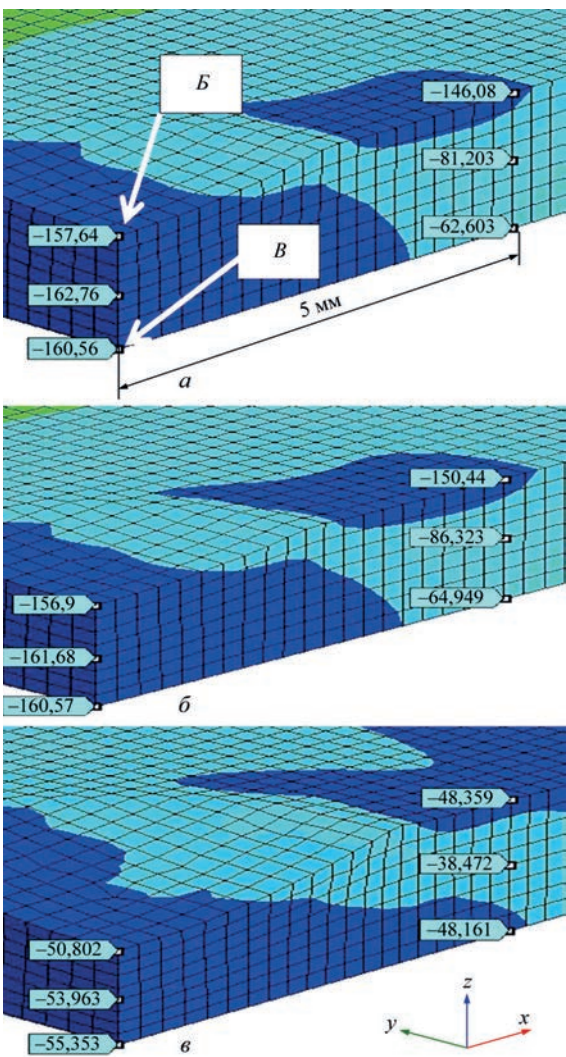


Рис. 3. Миттєві картини розподілу значень (МПа) компонент напружень σ_x у пластині зі сплаву АМгб $\delta = 2$ мм в момент завершення дії ЕДО по лінії удару (ЛУ) між точками Б і В (рис. 2) та на відстані 5 мм від лінії Б-В: а – σ_x при $T = 20$ °С; б – σ_x при $T = 150$ °С; в – σ_x при $T = 300$ °С

На рис. 3 наведено результати розрахунку миттєвих розподілів σ_x у пластинах $\delta = 2$ мм. Можна бачити, що вздовж ЛУ компоненти σ_x є виключно напруженнями стиску на контактній (т. Б) і зворотній (т. В) поверхнях пластин. Значення напружень вздовж ЛУ досягають $\sigma_T = f(T^\circ\text{C})$ для сплаву АМгб при $T = 20$ °С (рис. 3, а) і 300 °С (рис. 3, в) та зростають до $1,3\sigma_T$ при 150 °С (рис. 3, б). На відстані 5 мм від ЛУ значення σ_x стиску знижуються від σ_T на зовнішній поверхні до $0,4\sigma_T$ – на зворотній при $T = 20$ °С (рис. 3, а), від $1,25$ до $0,5\sigma_T$ – при $T = 150$ °С (рис. 3, б) та є близькими до σ_T при 300 °С на обох поверхнях (рис. 3, в).

Порівнюючи миттєві розподіли компоненти σ_x при $T = 20, 150$ і 300 °C, яка є домінуючою при формуванні залишкових зварювальних напружень, слід зазначити, що оптимальною температурою для ЕДО є 150 °C, за якої досягається максимальний рівень напружень стиску (миттєвих) в момент завершення контактної взаємодії.

На рис. 4 наведено результати розрахунку миттєвих розподілів σ_x у пластинах $\delta = 4$ мм. Можна бачити деякі відмінності у розподілах напружень від попередніх результатів ($\delta = 2$ мм), які пов'язані зі збільшенням товщини оброблених пластин. Так, вздовж ЛУ та на відстані 5 мм від неї значення σ_x стиску у загальному випадку менші, ніж при $\delta = 2$ мм.

Компоненти σ_x стиску вздовж ЛУ (від т. *Б* до т. *В*) досягають значень відповідно від $0,9\sigma_T$ до $0,7\sigma_T$ для сплаву АМг6 при $T = 20$ °C (рис. 4, *а*), $1,1\sigma_T$ при 150 °C (рис. 4, *б*, *з*), тобто менших, ніж для $\delta = 2$ мм. При $T = 300$ °C розподіли σ_x стиску близькі до σ_T (рис. 4, *д*, *е*), як і для пластин $\delta = 2$ мм. Навіть на зворотній поверхні значення σ_x стиску зростають до $1,2\sigma_T$. При співставленні значень напружень σ_x при $T = 20$ і 150 °C (рис. 4, *а*, *б*) можна бачити, що як і для пластин $\delta = 2$ мм, нагрів до 150 °C сприяє більшим миттєвим напруженням у порівнянні із ЕДО при $T = 20$ °C. Але подальше зростання температури контактної взаємодії до 300 °C не викликає помітних відмінностей миттєвого напруженого стану у порівнянні із отриманими при нижчих значеннях T .

Компонента σ_x стиску при $T = 20$ °C на відстані 5 мм від ЛУ досягає значень від $0,54\sigma_T$ на зовнішній до $0,27\sigma_T$ на зворотній поверхнях пластини (рис. 4, *а*). Напруження σ_x стиску на відстані 5 мм від ЛУ досягають значень від $0,79\sigma_T$ на зовнішній до $0,42\sigma_T$ на зворотній поверхнях сплаву АМг6 при $T = 150$ °C (рис. 4, *б*). Максимальних значень миттєвих напружень досягають при 300 °C. Так, компонента σ_x стиску на відстані 5 мм від ЛУ досягає значень від $1,4\sigma_T$ на зовнішній до $0,94\sigma_T$ на зворотній поверхнях сплаву АМг6 при $T = 300$ °C (рис. 4, *в*).

На рис. 5 наведено результати розрахунку миттєвих розподілів σ_x у пластинах $\delta = 8$ мм, які суттєво відрізняються від напружених станів пластин $\delta = 2$ і 4 мм. Можна бачити, що як по ЛУ, так і на відстані 5 мм від неї σ_x переходять від напружень стиску на зовнішній поверхні до розтягу на зворотній в усьому дослідженому діапазоні температур.

Так, при $T = 20$ °C значення σ_x по ЛУ змінюються від $0,48\sigma_T$ стиску на зовнішній поверхні до σ_T розтягу на протилежній, а на відстані 5 мм від ЛУ – від $0,46\sigma_T$ стиску на зовнішній до $0,6\sigma_T$ розтягу на протилежній (рис. 5, *а*). При $T = 150$ °C значення σ_x по ЛУ змінюються від $0,64\sigma_T$ стиску на зовнішній поверхні до $1,2\sigma_T$ розтягу на протилежній, а на відстані 5 мм від ЛУ – від $0,9\sigma_T$

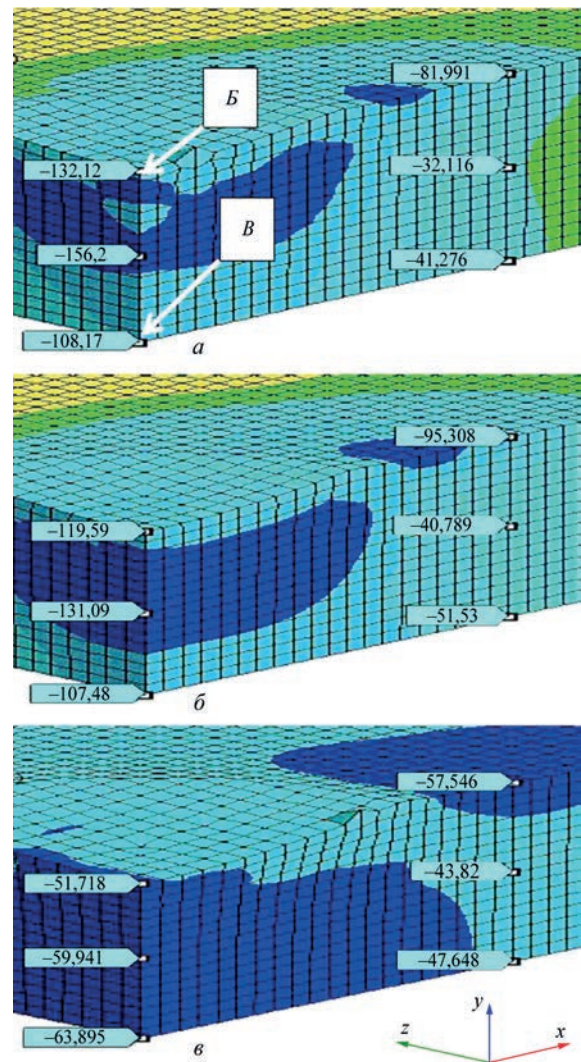


Рис. 4. Миттєві картини розрахункового розподілу значень (МПа) компонент напружень σ_x у пластині зі сплаву АМг6 $\delta = 4$ мм в момент завершення дії ЕДО по лінії удару (ЛУ) між точками *Б* і *В* та на відстані 5 мм від лінії *Б-В*: *а* – σ_x при $T = 20$ °C; *б* – σ_x при $T = 150$ °C; *в* – σ_x при $T = 300$ °C

стиску на зовнішній до $0,76\sigma_T$ розтягу на протилежній (рис. 5, *б*).

При збільшенні T до 300 °C метал при ЕДО зазнає інтенсивної пружно-пластичної течії, яку можна пояснити високотемпературним нагрівом значного об'єму (у порівнянні із $\delta = 2...4$ мм) металу в зоні контакту. Так, значення σ_x стиску на поверхні контакту (т. *Б*) та розтягу на зворотній поверхні (т. *В*) пластини вздовж ЛУ та на відстані 5 мм від ЛУ перевищують σ_T (рис. 5, *в*).

В табл. 2 представлено узагальнені результати моделювання ЗНС компоненти σ_x вздовж ЛУ та на відстані 5 мм від ЛУ для пластин $\delta = 2...8$ мм після ЕДО при різних T . Значення напружень надані у відносному вигляді стосовно $\sigma_T = f(T)$ (табл. 1), які відповідають значенню T , за якого проводили розрахунок контактної взаємодії. В рядках 1, 4 та 7 наведено значення компоненти σ_x ЗНС пластин відповідно $\delta = 2, 4$ та 8 мм після ЕДО при $T = 20$ °C. В рядках 2, 5 і 8 – залишкові σ_x для

$\delta = 2, 4$ і 8 мм після вистигання від $T = 150$ °С до 20 °С, а в $3, 6$ і 9 – аналогічно після вистигання від $T = 300$ до $T = 20$ °С.

При порівнянні між собою даних рядків $1, 4$ і 7 для $T = 20$ °С, рядків $2, 5$ і 8 для $T = 150$ °С та рядків $3, 6$ і 9 для 300 °С, можна бачити, що ЕДО пластин $\delta = 2...4$ мм при $T = 20...300$ °С вздовж

ЛУ сприяє формуванню σ_x стиску. Але вплив обробки суттєво зменшується при зростанні δ до 8 мм, що сприяє зменшенню пікових значень напружень стиску та переходу від стиску на контактній (в т. *Б*) до розтягу на зворотній в (т. *В*) поверхнях.

Для ділянки « 5 мм від ЛУ» дещо інша картина. Так, вже при зростанні δ від 2 до 4 мм значення σ_x стиску зменшуються майже вдвічі від зовнішньої поверхні – т. *Б* до зворотної – т. *В*. Таким чином, при зростанні δ знижується вплив ЕДО на метал зварного з'єднання біля лінії сплавлення. Збільшення δ до 8 мм визначає зменшення пікових напружень σ_x стиску у порівнянні із $\delta = 2...4$ мм та формуванням напружень розтягу на ділянках $\delta/2$ та на зворотній поверхні в т. *В*.

Узагальнюючи наведені дані, слід зазначити, що для $\delta = 2...4$ мм оптимальним значенням T застосування ЕДО є 150 °С, за якої сплав АМг6 ще суттєво не втрачає пружних властивостей (див. табл. 1).

Але для $\delta = 8$ мм дія T не має такого помітного впливу на ефективність ЕДО для корегування ЗНС (при заданому значенні V_0), як для $\delta = 2...4$ мм. При порівнянні рядків $7, 8$ і 9 можна бачити незначну відмінність значень σ_x , які отримано в результаті ЕДО при $T = 20...300$ °С для $\delta = 2...4$ мм.

Базуючись на результатах рис. 3–5 і табл. 2, слід зазначити, що при заданій вертикальній швидкості V_0 електрода-індентора (рис. 1) одностороння ЕДО сприяє формуванню ЗНС стиску на обох поверхнях зварних з'єднань пластин сплаву АМг6 $\delta = 2...4$ мм на відміну від $\delta = 8$ мм, де на зворотній поверхні формуються напруження розтягу. Таким чином, при $V_0 = 5$ м/с доцільно проводити двосторонню ЕДО пластин сплаву АМг6 $\delta = 8$ мм для отримання ЗНС стиску з обох боків зварних з'єднань.

Отримані результати можна пояснити тим фактом, що ЕДО при $T = 150$ °С ініціює формування більших за значенням відносних миттєвих σ_x у порівнянні із напруженнями при $T = 20$ °С. Це сприяє формуванню більш високих ЗНС стиску при вистиганні пластини у порівнянні із ЗНС після ЕДО при $T = 20$ °С. Наведені результати можна пояснити тим, що при $T = 150$ °С сплав АМг6 ще не

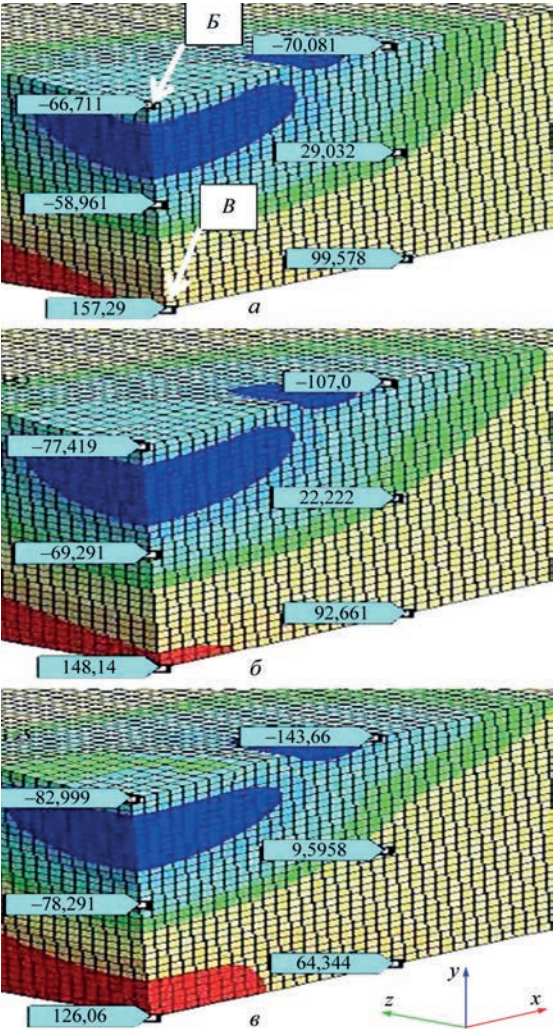


Рис. 5. Миттєві картини розрахункового розподілу значень (МПа) компонент напружень σ_x, σ_y у пластині зі сплаву АМг6 $\delta = 8$ мм в момент завершення дії ЕДО по лінії між точками *Б* і *В* (рис. 2) та на відстані 5 мм від лінії *Б–Б*: *а* – σ_x при $T = 20$ °С; *б* – σ_x при $T = 150$ °С; *в* – σ_x при $T = 300$ °С

Таблиця 2. Відносні* значення ЗНС компоненти σ_x в стикових з'єднаннях зі сплаву АМг6 $\delta = 2; 4$ та 8 мм після їх ЕДО в умовах нагріву до $T = 20, 150$ і 300 °С

Номер	$\delta, \text{мм}$	$T, ^\circ\text{C}$	Значення $\sigma_x \times \sigma_t$ в точках вздовж лінії <i>Б–В</i>			Значення $\sigma_x \times \sigma_t$ в точках на відстані 5 мм від лінії <i>Б–В</i>		
			Б	$\delta/2$	В	Б	$\delta/2$	В
1	2	ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}^*$	–1	–1	–1	–1	–0,5	–0,4
2		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–1,2	–1,26	–1,23	–1,16	–0,66	–0,5
3		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	–0,43	–0,45	–0,46	–0,4	–0,32	–0,4
4	4	ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}^*$	–0,88	–1,0	–0,72	–0,54	–0,2	–0,27
5		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–0,93	–1,0	–0,83	–0,73	–0,34	–0,43
6		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	–0,44	–0,5	–0,54	–0,49	–0,38	–0,41
7	8	ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}^*$	–0,48	–0,4	1	–0,46	0,2	0,6
8		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–0,59	–0,53	1,15	–0,83	0,17	0,72
9		ЗНС при $20\text{ }^\circ\text{C}$ після ЕДО при $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–0,7	–0,66	1,0	–1,2	0	0,5

Примітка. * – наведено значення ЗНС відносно $\sigma_t = f(T, ^\circ\text{C})$ у табл. 1.

втрачає пружних властивостей, а термічний вплив додатково стимулює механізми релаксації напружень, що підтверджують дані [7]. Але при ЕДО за температури $T = 300^\circ\text{C}$ миттєві напруження, значення яких є нижчими, ніж при $T = 150^\circ\text{C}$, відповідно сприяють формуванню менших ЗНС стиску (у порівнянні із ЗНС після ЕДО при $T = 150^\circ\text{C}$).

Наведені результати розрахунків показали, що ЕДО металу зварного з'єднання $\delta = 2 \dots 8$ мм зі сплаву АМг6, яку виконували при $T = 150^\circ\text{C}$ (що моделює обробку в єдиному процесі синхронно із зварюванням плавленням), є більш ефективною у порівнянні із ЕДО при $T = 300^\circ\text{C}$ або із роздільною ЕДО після зварювання (що відповідає ЕДО при $T = 20^\circ\text{C}$). Ефективність ЕДО визначається формуванням більших за значеннями ЗНС стиску отриманого зварного з'єднання. При тому для формування ЗНС стиску по товщині зварних з'єднань $\delta = 2 \dots 4$ мм достатньо провести односторонню ЕДО (при заданому значенні V_0), а для $\delta = 8$ мм – двосторонню.

Висновки

1. На базі розробленої математичної моделі динамічної взаємодії електрода-індентора із стиковим зварним з'єднанням зі сплаву АМг6 $\delta = 2 \dots 8$ мм проведено чисельну розрахункову оцінку впливу δ на кінетику напружень і ЗНС пластин в результаті електродинамічної обробки (ЕДО) при підвищених температурах.

2. За результатами розрахунків доведено, що застосування ЕДО металу шва сплаву АМг6 $\delta = 2 \dots 8$ мм, яка виконується при $T = 150^\circ\text{C}$ (умова моделювання ЕДО в єдиному процесі синхронно із зварюванням плавленням) сприяє формуванню більших за значеннями ЗНС стиску у порівнянні

із ЕДО при $T = 300^\circ\text{C}$ або роздільною ЕДО після зварювання при $T = 20^\circ\text{C}$.

3. При тому для формування ЗНС стиску по товщині зварних з'єднань $\delta = 2 \dots 4$ мм достатньо провести односторонню ЕДО (при заданому значенні швидкості V_0 контакту), а для $\delta = 8$ мм – двосторонню.

Список літератури/References

1. Madi, Y., Besson, J. (2014) *Effect of residual stresses on brittle fracture*. Mat. ECRS-9. UTT, Troyes, France.
2. (2022) Welding and technical diagnostics for the recovery of the economy of Ukraine: *Abstracts of reports science conf.* Kyiv: International Association «Welding».
3. 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. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9862-8>
4. Sydorenko, Y.M., Pashchin, 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. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00226-2>
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, 500–529.
6. Shao, Quan, Kang, Jiajie, Xing, Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr2Ni4A steel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 476, 218–224.
7. 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>
8. Lobanov, L.M., Pashchin, M.O., Mykhodui, O.L. et al. (2022) Stress-Strain State of Welded Joints of AMg6 Alloy after Electrodynamic Treatment During Welding. *Strength of Materials*, 54, 6, 983–996. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>
9. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Efficiency of electrodynamic treatment of welded joints of AMg6 alloy of different thickness. *The Paton Welding J.*, 3, 6–10.
10. <http://www.ansys.com/>.
11. Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*. Pergamon Press, Oxford, United Kingdom.

COMPUTATIONAL EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE THICKNESS OF WELDED JOINTS OF AMg6 ALLOY ON THEIR STRESS-STRAIN STATE AFTER ELECTRODYNAMIC TREATMENT IN THE PROCESS OF WELDING

Lobanov L.M.¹, Pashchin M.O.¹, Mikhodui O.L.¹, Todorovych N.L.¹, Sydorenko Yu.M.², Ustylenko P.R.²

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

E-mail: svarka2000@ukr.net

²NTUU «Kyiv Igor Sikorsky Polytechnic Institute. 37 Beresteisky Ave., 03056, Kyiv.

A calculated evaluation of the efficiency of electrodynamic treatment (EDT) effect on the stress state of butt-welded joints of plates made of aluminium AMg6 alloy with an increase in their thickness δ was carried out. Mathematical modelling of the kinetics and residual stress states of butt-welded joints $\delta = 2, 4$ and 8 mm as a result of their EDT at different values of the temperature T of the plates, at which the treatment was carried out was performed. The value of the vertical velocity V_0 of the indenter electrode (EDT tool) was taken as $V_0 = 5$ m/s, which corresponds to the modern electrophysical characteristics of the equipment for EDT. The T value was set, reflecting the conditions of EDT after welding ($T = 20^\circ\text{C}$) and during fusion welding ($T = 150$ and 300°C). The problem was solved in a three-dimensional formulation using the ANSYS program. The conditions for the formation of stresses in the plates at EDT after and during welding were determined by the mechanical characteristics of the AMg6 alloy at temperatures $T = 20, 150$, and 300°C without taking cooling into account. The results of the calculation of kinetics and residual stresses in welded joints are presented. It is shown that for a value of $T = 150^\circ\text{C}$, EDT provides the most optimal residual stress states of the plates in the entire experimental range δ . It was proven that EDT in the welding process (at $T = 150^\circ\text{C}$) is more efficient compared to EDT of metal after cooling ($T = 20^\circ\text{C}$). It was established that at EDT of welded joints $\delta = 2 - 4$ mm, residual compressive stresses are formed over the entire thickness of the plates, the values of which are close to the yield strength of the AMg6 alloy. At EDT of welded joints $\delta = 8$ mm, residual compressive stresses are formed on the outer surface of the plates, and on the back side – tensile ones. 11 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Key words: electrodynamic treatment, residual welding stresses, aluminium alloy, electric current pulse, shock interaction, finite-element model, electrode-indenter, theory of elastic-plastic flow, fusion welding

Надійшла до редакції 13.11.2023

Отримано у переглянутому вигляді 19.02.2024

Прийнято 07.03.2024