

# БЕЗДЕФОРМАЦІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ TIG СПЛАВУ АМГ6 ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛУ ШВА

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, В.М. Коржик<sup>1</sup>, М.О. Пащин<sup>1</sup>, О.Л. Миходуй<sup>1</sup>, А.А. Гринюк<sup>1</sup>, Є.В. Ілляшенко<sup>1</sup>, П.В. Гончаров<sup>1</sup>, П.Р. Устименко<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: mail@kpi.ua

Застосування ЕДО з урахуванням особливостей зварювального процесу є новим трендом інженерної практики, що сприяє розширенню можливостей методу. В той же час необхідною умовою реалізації процесу зварювання плавленням є розігрів металу шва з подальшим його вистиганням до кімнатної температури. Реалізація технології ЕДО в процесі зварювання сприяє більш інтенсивній релаксації зварювальних напружень в результаті ЕДО у порівнянні з обробкою металу шва при кімнатній температурі. По результатах досліджень встановлено, що електродинамічна обробка (ЕДО) зразків стикових зварних з'єднань призводить до переходу залишкових зварювальних напружень розтягу в стискання. Дослідна перевірка залишкового напружено-деформованого стану із застосуванням методу електронної спекл-інтерферометрії підтвердила результати математичного моделювання, а саме зниження напружень розтягування і зростання напружень стискування в шві після ЕДО при температурі  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  у порівнянні з ЕДО при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Доведено, що ЕДО зразків стикових з'єднань зі сплаву АМГ6 в процесі зварювання TIG підвищує точність їх виготовлення, що характеризується зниженням рівня їх залишкового поздовжнього жолоблення у порівнянні з ЕДО після зварювання. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 6.

*Ключові слова:* електродинамічна обробка, електродний пристрій, залишкові зварювальні напруження, алюмінієвий сплав, імпульс електричного струму, ударна взаємодія, електрод-індентор, мембранні напруження, зварювання неплавким електродом

**Вступ.** Залишкові зварювальні напруження негативно впливають на довговічність, корозійну стійкість та залишкові деформації тонколистових конструкцій із сплавів на основі алюмінію. В останні роки в світовій практиці спостерігається зростання об'ємів виготовлення таких конструкцій і тому проблема зменшення залишкових напружень розтягування набуває особливої актуальності. Традиційні методи оптимізації залишкових напружених станів, які потребують застосування металоємного оснащення та (або) значних витрат енергії, не відповідають вимогам сучасної інженерної практики [1, 2].

Розвиток високотехнологічних галузей промисловості стимулює впровадження енергозберігаючих технологій бедеформаційного зварювання сплавів на основі алюмінію. Використання імпульсних електромагнітних полів (ІЕМП) для оптимізації залишкових напружено-деформованих станів і механічних характеристик зварних з'єднань є сучасним трендом інженерної практики по заміні традиційних технологій металообробки на перспективні та енергоефективні [3, 4].

**Актуальність досліджень.** Одним із нових підходів до оптимізації залишкових напружених станів тонколистових конструкцій є електродинаміч-

на обробка (ЕДО) зварних з'єднань, яка базується на ефекті електропластичності (ЕПЕ), що виникає при проходженні імпульсу електричного струму (ІЕС) щільністю більш за  $1\text{ кА/мм}^2$  через метал виробу [5–7]. Внаслідок дії ЕПЕ в металі виникають пластичні деформації, які ініціюють механізми релаксації залишкових зварювальних напружень.

В роботах [8, 9] доведено, що супутній підігрів зони електроімпульсного впливу сприяє релаксації напружень розтягування. Це стимулює дослідження нових можливостей ЕДО, одним з яких є її застосування в процесі зварювання плавленням.

Слід зазначити, що до теперішнього часу не проводили оцінку впливу термічного циклу зварювання на особливості регулювання залишкових напружених станів під дією ЕДО.

Враховуючи наведене вище метою роботи є розробка наукових засад технології зварювання із застосуванням ЕДО для регулювання залишкових напружено-деформованих станів зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів.

Враховуючи дані роботи [9] можна зазначити, що ЕДО в умовах нагріву металу шва є більш ефективною (у порівнянні з ЕДО без підігріву) для зниження залишкових напружень у зварних пластинах із алюмінієвого сплаву. При тому, як

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Коржик В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>,

Пащин 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>,

© Л.М. Лобанов, В.М. Коржик, М.О. Пащин, О.Л. Миходуй, А.А. Гринюк, Є.В. Ілляшенко, П.В. Гончаров, П.Р. Устименко, 2022

відзначено вище, джерелом такого нагріву може бути тепло вистигаючого зварного з'єднання.

Апаратурне забезпечення способу зводиться до організації синхронного переміщення зварювального пальника (ЗП) та електродного пристрою для ЕДО (ЕП ЕДО), що конструктивно об'єднані у моноблок із пристроєм фіксації їх взаємного розташування. На рис. 1 подано конструктивні варіанти схем портального типу із моноблоковою компоновкою ЕП ЕДО та ЗП. Конструктивні варіанти переміщення електрода забезпечують надійний електричний контакт електрода з металом шва в момент електродинамічної дії. Контактна взаємодія ЕП ЕДО з металом шва може здійснюватись на базі механічного приводу за допомогою ексцентрика (рис. 1, *а*) або електричного – з використанням лінійного соленоїду переміщення (рис. 1, *б*). Кожна зі схем рис. 1 має переваги та недоліки, обговорення яких виходить за межі даної роботи.

Застосування схем дозволяє забезпечити оптимальну відстань  $L_{\text{ЕДО}}$  між ЕП ЕДО та ЗП. Моноблок включає ЕП ЕДО – 3 та ЗП – 1, які встановлені вздовж зварного з'єднання на відстані  $L_{\text{ЕДО}}$  між 1 та 3 (рис. 1, *а*). Значення  $L_{\text{ЕДО}}$  задає температуру нагріву  $T_{\text{ЕДО}}$  зони обробки в умовах дії термічного циклу зварювання. Мережі живлення для зварювання та ЕДО формуються незалежно та окремо одна від одної.

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. Згідно результатів моделювання, оптимальним значенням  $T_{\text{ЕДО}}$  при ЕДО сплаву АМгб є 150 °С [10–13].

**Методика і результати експериментальних досліджень впливу термічного циклу зварювання, що є сумісним із ЕДО, на залишкові напружено-деформовані стани стикових з'єднань сплаву АМгб1.**

Для реалізації технології ЕДО в процесі зварювання виготовлено апаратурний комплекс для автоматичного зварювання ТІГ алюмінієвих сплавів, що є сумісним із процесом ЕДО (рис. 2). Складові комплексу конструктивно об'єднані в моноблок.

Для оцінки ефективності ЕДО в процесі зварювання із застосуванням методу електронної спекл-інтерферометрії [14] проводили порівняльні дослідження залишкових напружено-деформованих станів зварних пластин зі сплаву АМгб1, виконаних при застосуванні ЕДО після та в процесі зварювання, тобто при значеннях  $T$  відповідно 20 і 150 °С. Проводили експериментальне оцінювання поздовжньої (вздовж лінії шва) компоненти  $\sigma_x$  (рис. 3, *а*) залишкових зварювальних напружень та прогинів  $f_x$  поздовжніх кромek зразків за допомогою штангенциркуля та струганої лінійки [5].

Для дослідження термічного впливу на ефективність ЕДО були виготовлені зразки стикових зварних з'єднань пластин зі сплаву АМгб1 розміром 450×200×3 мм (рис. 3). Зразки були зварені з двох пластин розмірами 450×100×3 мм методом ТІГ у середовищі аргону на режимі, наведеному у табл. 1 в умовах спірання на жорстку основу. В якості присадного матеріалу використовували дрiт марки ER5356.

Зразок № 1 виконували без застосування ЕДО. Зразок № 2 (рис. 3, *а*) було зварено без обробки та піддано ЕДО після зварювання при  $T = 20$  °С. На зразку № 3 ЕДО виконували в процесі зварювання при  $T = 150$  °С. ЕДО Зразків № 2 і 3 виконували при аналогічних значеннях параметрів режиму

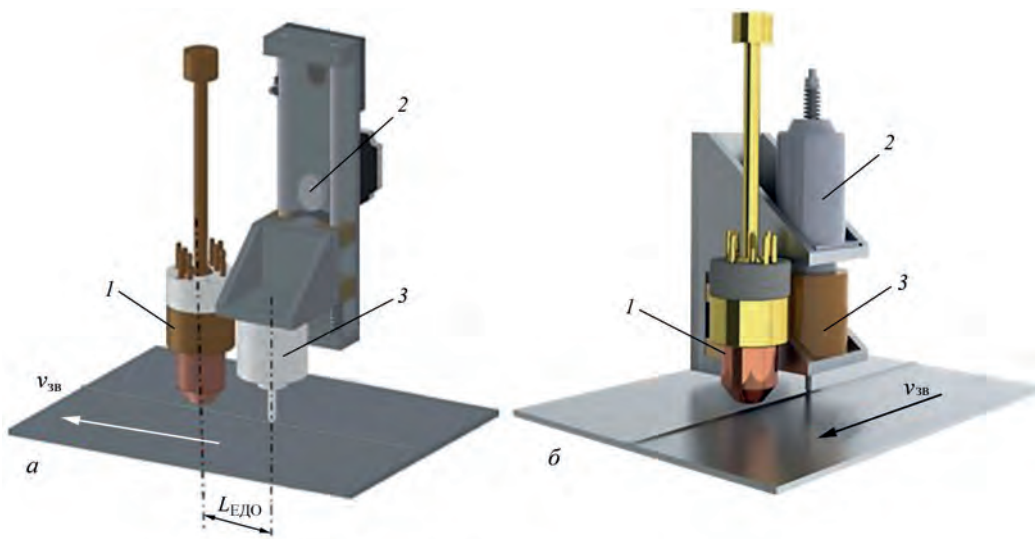


Рис. 1. Варіанти конструктивних схем ЕДО у процесі зварювання з моноблоковою компоновкою робочих органів: *а* – притиснення ЕП ЕДО до металу шва із застосуванням ексцентрика 2; *б* – притиснення ЕП ЕДО до металу шва із застосуванням лінійного соленоїду переміщення 2 ( $v_{\text{зв}}$  – напрямок зварювання, 1 – ЗП, 3 – ЕП ЕДО)

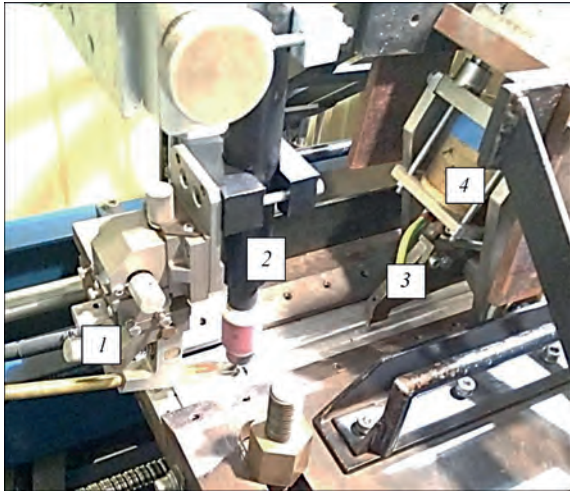


Рис. 2. Апаратний комплекс для автоматичного зварювання TIG, яке є сумісним із ЕДО зварного шва: 1 – система для подання присадного дроту; 2 – пальник для зварювання; 3 – електродний пристрій; 4 – лінійний соленоїд переміщення електрода ЕДО обробки, що забезпечували енергію однократної електродинамічної дії на рівні 1 кДж.

Глибина  $h$  точкових зон (лунок) дії ЕДО і висота підсилення шва склали відповідно 0,2 та 0,6 мм. Таким чином, глибина  $h$  лунок не перевищувала висоту підсилення шва, тобто не зменшувала площу робочого перерізу зварного з'єднання. Це виключає негативний вплив лунок на механічні характеристики зварних з'єднань [5, 6]. Відстань між точковими зонами дії ЕДО складала 5,0 мм (рис. 3, а).

На рис. 3, б зображено співставлення залишкових прогинів  $f_x$  поздовжніх кромки зразків № 1–3. Можна бачити, що ЕДО після та в процесі зварювання зменшує значення  $f_x$  відповідно у 1,8 та 3,7 разів. Даний факт можна пояснити як релаксацією залишкових напружень внаслідок ЕДО, так і

«жорсткою» фіксацією пластин. Це виключало їх вертикальне переміщення в процесі зварювання і сприяло формуванню залишкових пластичних деформацій розтягування в шві. Результатом взаємодії останніх із залишковими деформаціями стискування від зварювання було зниження прогинів  $f_x$ .

Розподіли залишкових напружень  $\sigma_x$  зразків № 1–3 наведено на рис. 4–6, для яких є характерними деякі загальні особливості. Так, у вихідному стані значення  $\sigma_x$  в центрі шва є меншими на зовнішньому боці пластини (крива 1 – Верх) у порівнянні зі зворотнім боком зразка (крива 3 – Низ). Це можна пояснити більш інтенсивним тепловідведенням з відкритої зовнішньої поверхні зразка у порівнянні із зворотньою, що контактує із абсолютно жорсткою основою – зварювальним столом, який є тепловим екраном. Напівширина зони пікових значень залишкових  $\sigma_x$  розтягування у зразках № 1–3 не перевищувала 15 мм. Враховуючи той факт, що в усіх експериментах виконували ЕДО центру шва, у подальшому у зразках проводили порівняльне оцінювання напружених станів зони, яка була піддана обробці.

У вихідному стані значення  $\sigma_x$  розтягування в центрі шва зразка № 1 досягали відповідно 50 та 130 МПа на зовнішньому (крива 1 – Верх) і зворотньому (крива 3 – Низ) боках пластини (рис. 4). Проводили оцінювання мембранних напружень  $\langle \sigma_x \rangle$  без урахування складової вигину (крива 2). Величини  $\langle \sigma_x \rangle$  розраховували як середнє між експериментально визначеними  $\sigma_x$  на кривих 1 та 2. Значення  $\langle \sigma_x \rangle$  в центрі шва не перевищували 90 МПа.

Після ЕДО при  $T = 20^\circ\text{C}$  значення  $\sigma_x$  в центрі шва зразка № 2 досягали відповідно -75 і 100 МПа на зовнішньому (крива 1 – Верх) і зворотньому

Таблиця 1. Режим зварювання TIG зразків зварних з'єднань зі сплаву АМг61

| Напруга дуги $U_d, \text{В}$ | Струм дуги $I_d, \text{А}$ | Швидкість зварювання $v_{зв}, \text{мм/с}$ | Швидкість подання дроту $v_{дл}, \text{мм/с}$ | Швидкість подання аргону $v_{ар}, \text{л/мін}$ | Діаметр присадного дроту $d, \text{мм}$ |
|------------------------------|----------------------------|--|---|---|---|
| 16,2                         | 160                        | 3,3  | 23,3  | 15  | 1,2                                     |

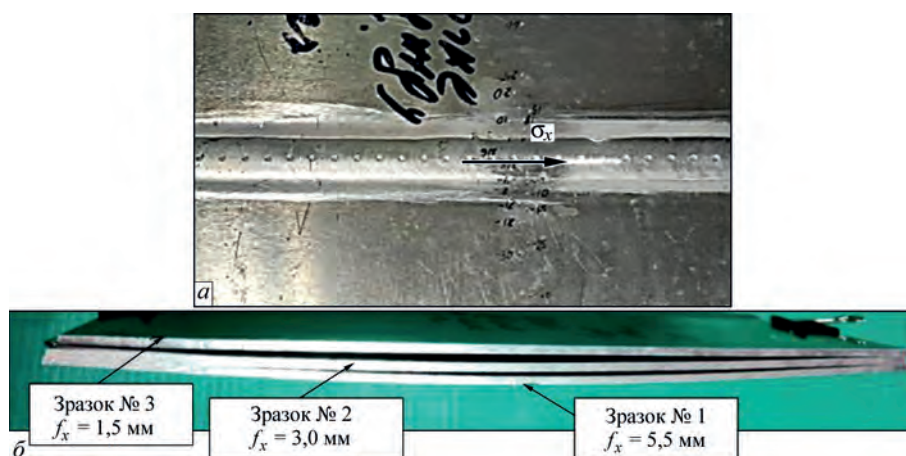


Рис. 3. Зовнішній вигляд зразків № 1–3: а – зразок № 2, де на шві розташовані точкові зони ЕДО, стрілкою вказано напрямок дії компоненти напружень  $\sigma_x$ ; б – поздовжні прогини  $f_x$  кромки зразків № 1–3

(крива 3 – Низ) боках пластини (рис. 5). Таким чином, після ЕДО  $\sigma_x$  розтягування в зоні контакту трансформувалися у стискування, а на протилежному боці пластини  $\sigma_x$  розтягування зменшилися на 20 %. Мембранні напруження  $\langle \sigma_x \rangle$  розтягування в центрі шва не перевищували 12 МПа, тобто знизилися до 90 %. Аналізуючи дані рис. 5 можна бачити, що ЕДО при  $T = 20^\circ\text{C}$  здійснює домінуючий вплив на напружений стан контактної поверхні пластини і суттєво менший – на значення  $\sigma_x$  на зворотньому боці зразка № 2.

Після ЕДО при  $T = 150^\circ\text{C}$  значення  $\sigma_x$  в центрі шва зразка № 2 досягали відповідно  $-100$  і  $10$  МПа на зовнішньому (крива 1 – Верх) і зворотньому (крива 3 – Низ) боках пластини. Таким чином, після ЕДО  $\sigma_x$  розтягування в зоні контакту трансформувалися у стискування, а на зворотньому боці  $\sigma_x$  розтягування зменшилися більш ніж на 90 %. Мембранні напруження  $\langle \sigma_x \rangle$  стискування в центрі шва досягли  $-50$  МПа, тобто після ЕДО змінили знак. Аналізуючи дані рис. 6 можна бачити, що ЕДО при  $T = 150^\circ\text{C}$  здійснює суттєвий вплив на напружений стан контактної і зворотньої поверхні зразка № 3.

Результати моделювання [10] та експериментальних досліджень залишкових напружень  $\sigma_x$  у зразках № 1–3 узагальнені в порівняльній табл. 2. Слід зазначити, що в якісному відношенні експе-

риментальні дані підтверджують результати математичного моделювання залишкових напружених станів пластин зі сплаву АМг61 після ЕДО при температурах  $T = 20$  та  $150^\circ\text{C}$ .

Порівнювали експериментальні результати оцінки напружень  $\sigma_x$  у зразка № 1 (рядок 1) із зразками № 2 (рядок 2) та № 3 (рядок 4). Слід зазначити, що ЕДО сприяє переходу напружень розтягування у стиснення в зоні контакту, а термічний вплив сприяє підвищенню значень  $\sigma_x$ .

ЕДО при  $T = 20^\circ\text{C}$  сприяє трансформації  $\sigma_x$  розтягування в зоні контакту у стиснення (стовпчик 3), що видно при порівнянні рядків 1 і 2. Термічний вплив інтенсифікує релаксаційні механізми, задіяні ЕДО, що сприяє формуванню більших за величиною  $\sigma_x$  стиснення (порівняння рядків 2 і 4).

ЕДО при  $T = 20^\circ\text{C}$  сприяє зниженню напружень розтягування сплаву АМг61 біля жорсткої основи (стовпчик 4), що видно при порівнянні рядків 1 і 2. Термічний вплив інтенсифікує релаксаційні механізми, задіяні ЕДО ( порівняння рядків 2 і 4).

При відповідному порівнянні рядків 2 і 3 та 4 і 5 можна бачити, що моделювання дає більші значення напружень після ЕДО, ніж експерименти. Це пояснюється неврахуванням (при моделюванні) конвективного тепловідведення з поверхні зразків, яке може понижувати характеристики супутнього нагріву пластин, що сприяє зменшенню (відносно розрахунку) ефективності ЕДО. В зоні контакту (стовпчик 3) розраховані  $\sigma_x$  в  $1,4\dots 1,7$  рази більші за експериментальні. При тому як розраховані, так і експериментальні  $\sigma_x$  є стиснення. Якщо при моделюванні термічний вплив підвищує значення  $\sigma_x$  стиснення до 8 % (порівняння рядків 3 і 5), то в експерименті – до 30 % (рядки 2 і 4) при менших абсолютних значеннях останніх.

Інший характер розподілу  $\sigma_x$  біля спирання пластини на жорстку основу (стовпчик 4). Якщо в експериментах  $\sigma_x$  після ЕДО є розтягування (рядки 2 і 4), то в розрахунку – стискування (рядки 3 і 5). Тобто по результатах порівняння експериментальних даних ефективність ЕДО як засобу регу-

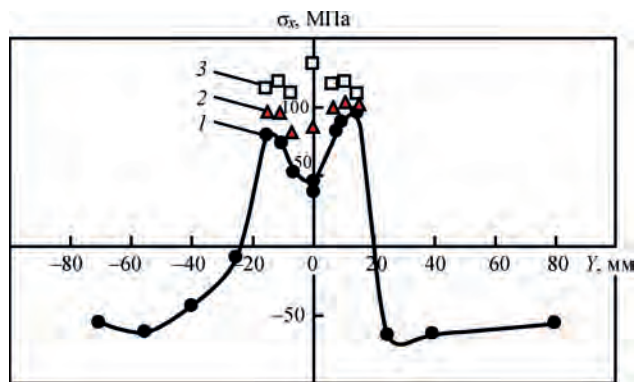


Рис. 4. Розподіл напружень  $\sigma_x$  у центральному поперечному перерізі зразка № 1: крива 1 – Верх; 2 – мембранні напруження; 3 – Низ

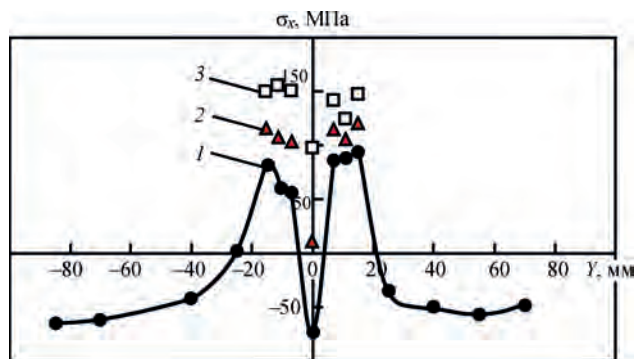


Рис. 5. Розподіл напружень  $\sigma_x$  у центральному поперечному перерізі зразка № 2: крива 1 – Верх; 2 – мембранні напруження; 3 – Низ

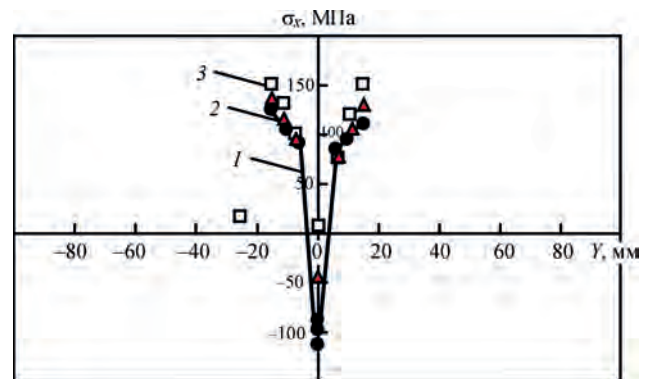


Рис. 6. Розподіл напружень  $\sigma_x$  у центральному поперечному перерізі зразка № 3: крива 1 – Верх; 2 – мембранні напруження; 3 – Низ

Таблиця 2. Результати експериментальних досліджень залишкових зварювальних напружень  $\sigma_x$  у зразках № 1–3

| Номер | Характеристика зразка                         |                      | $\sigma_x$ , МПа<br>Верх | $\sigma_x$ , МПа<br>Низ | $\langle \sigma_x \rangle$ , МПа |
|-------|---|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 1     | 2   |                      | 3                        | 4                       | 5                                |
| 1     | Зразок № 1<br>Без ЕДО                         | Експеримент (рис. 4) | 50                       | 130                     | 90                               |
| 2     |   | Експеримент (рис. 5) | -75                      | 100                     | 12                               |
| 3     | Зразок № 2<br>ЕДО при $T = 20^\circ\text{C}$  | Моделювання          | -132                     | -109                    | -156                             |
| 4     |   | Експеримент (рис. 6) | -100                     | 10                      | -45                              |
| 5     | Зразок № 3<br>ЕДО при $T = 150^\circ\text{C}$ | Моделювання          | -142                     | -127                    | -155                             |

лювання  $\sigma_x$  на зворотньому боці – Низ є меншою у порівнянні із зовнішнім боком – Верх. Але на боці Низ суттєво зростає вплив термічної дії, яка сприяє зниженню  $\sigma_x$  розтягування на 70 % за ЕДО при  $T = 150^\circ\text{C}$  у порівнянні із  $T = 20^\circ\text{C}$  (відповідне порівняння рядків 4 і 2).

Таким чином, суттєве зниження  $\langle \sigma_x \rangle$  (стовпчик 5) при дії нагріву визначається релаксацією напружень біля жорсткої основи – Низ (порівняння рядків 2 і 4). При моделюванні зниження  $\sigma_x$  сягає лише 16 % (порівняння рядків 3 і 5), що пояснюється неврахуванням конвективного тепловідводу, про що було доведено вище.

Враховуючи результати рис. 4–6 і табл. 2 можна зробити висновок, що термічна дія, яка супутня ЕДО, є ефективним регуляторним фактором впливу на напружено-деформовані стани зварних з'єднань зі сплавів на основі алюмінію з метою їх оптимізації.

Залишкові напруження стискування уповільнюють розповсюдження втомного руйнування металу зварних з'єднань [5, 6]. Базуючись на представлених вище даних слід вважати, що ЕДО в процесі зварювання є перспективним засобом оптимізації напружено-деформованих станів і підвищення точності тонколистових зварних конструкцій із алюмінієвих сплавів. Дана технологія може бути застосована у промислових умовах для бездеформаційного зварювання тонкостінних оболонкових і панельних конструкцій аерокосмічної техніки, до аеродинамічних характеристик і напружених станів яких традиційно застосовуються жорсткі вимоги. Використання ЕДО в процесі зварювання сприятиме скороченню часу виготовлення виробів та подовженню їх ресурсу.

**Висновки**

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

2. Дослідна перевірка залишкового напружено-деформованого стану із застосуванням методу електронної спекл-інтерферометрії підтвердила ре-

зультати математичного моделювання, а саме зниження напружень розтягування і зростання напружень стискування в шві після ЕДО при температурі  $T = 150^\circ\text{C}$  у порівнянні з ЕДО при  $T = 20^\circ\text{C}$ .

3. Доведено, що ЕДО зразків стикових з'єднань зі сплаву АМг61 в процесі зварювання підвищує точність їх виготовлення, що характеризується зниженням рівня їх залишкового поздовжнього жолоблення у порівнянні з ЕДО після зварювання.

4. Встановлено, що ЕДО зразків стикових з'єднань зі сплаву АМг6 (1561) в процесі дугового зварювання неплавким електродом сприяє оптимізації їх напружених станів, яка характеризується зниженням залишкових зварювальних напружень розтягування в шві до 70 % у порівнянні з ЕДО після зварювання.

**Список літератури/References**

- Madi, Y., Besson, J. (2014) *Effect of residual stresses on brittle fracture*. Mat. ECRS-9. UTT, Troyes, France.
- Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*, Pergamon Press, Oxford, United Kingdom.
- Shao, Quan, Kang, Jijie, Xing, Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr2Ni4A steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 476, 218–224.
- Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A., et al. (2011) Redistribution of residual welding stresses in pulsed electro-magnetic treatment. *Strength of Materials*, 43(3), 326–331. DOI: 10.1007/s11223-011-9300-2
- 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
- Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Tymoshenko, O.M. et al. (2020) Increase in the life of welded joints of AMg6 aluminum alloy. *TPWJ*, 4, 2–8. <https://doi.org/10.37434/as2020.04.01>
- Conrad, H., Sprecher, A. (1989) *The electroplastic effect in metals*. Elsevier Science Publishers B.V., Dislocations in Solids Ed. by F.R.N. Nabarro.
- 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>
- Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhoduj, O.L. et al. (2022) Electrodynamic treatment of welded joints of aluminium AMg6 alloy in the process of heating the weld metal. *Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)*, 4, 3–7. <https://doi.org/10.37434/as2022.04.01>
- Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhoduj, 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>

11. 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. *Ibid*, 52(5), 731–737. DOI: 10.1007/s11223-020-00226-2
12. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhoduj, O.L., Sydorenko Yu.M. (2018) Electric Pulse Component Effect on the Stress State of AMg6 Aluminum Alloy Welded Joints Under Electrodynamic Treatment. *Ibid*, 50(2), 246–253. DOI: 10.1007/s11223-017-9862-8
13. Лобанов Л.М., Пашчин М.О., Миходуй О.Л. та ін. (2022) Розрахункова оцінка напружено-деформованих станів зварних з'єднань із алюмінієвого сплаву АМг61 під дією електродинамічної обробки металу шва в процесі зварювання плавленням. *Автоматичне зварювання*, 7, 3–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.07.01>
14. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhoduj, O.L., Khokhlova J.A. (2016) Investigation of residual stresses in welded joints of heat-resistant magnesium alloy ML10 after electrodynamic treatment. *Journal of Magnesium and Alloys*, 4, 2, 77–82. DOI: 10.1016/j.jma.2016.04.005

## DEFORMATION-FREE TIG WELDING OF AMg6 ALLOY WITH APPLICATION OF ELECTRODYNAMIC TREATMENT OF WELD METAL

L.M. Lobanov<sup>1</sup>, V.M. Korzhik<sup>1</sup>, M.O. Pashchin<sup>1</sup>, O.L. Mikhodui<sup>1</sup>, A.A. Grynyuk<sup>1</sup>, E.V. Ilyashenko<sup>1</sup>, P.V. Goncharov<sup>1</sup>, P.R. Ustyenko<sup>2</sup>

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

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 6/2 Dashavska Str., 03506, Kyiv. E-mail: [mail@kpi.ua](mailto:mail@kpi.ua)

Application of electrodynamic treatment (EDT), taking into account the welding process peculiarities, is a new trend in engineering practice, enhancing the process capabilities. At the same time, a necessary condition for realization of fusion welding process, is heating of the weld metal with its further cooling to room temperature. Realization of EDT technology during welding promotes more intensive relaxation of welding stresses as a result of EDT, compared to weld metal treatment at room temperature. Proceeding from investigation results it was found that EDT of butt welded joint samples leads to transition of residual tensile welding stresses into compressive stresses. Experimental verification of the residual stress-strain state with application of the method of electron speckle interferometry confirmed the results of mathematical modeling, namely lowering of tensile stresses and increase of compressive stresses in the weld after EDT at temperature  $T = 150$  °C, compared to EDT at  $T = 20$  °C. It was proved that EDT of samples of butt joints from AMg6 alloy during TIG welding improves their production accuracy that is characterized by lowering of the level of their residual longitudinal grooving, compared to postweld EDT. 14 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

**Keywords:** electrodynamic treatment, electrode device, residual welding stresses, aluminium alloy, electric current pulse, impact interaction, indenter-electrode, membrane stresses, nonconsumable-electrode welding

Надійшла до редакції 21.06.2022

## ПЕРЕДПЛАТА 2023

| Журнали   | Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн. |         |         |      |
|---|---|---------|---------|------|
|   | місяць  | квартал | півроку | рік  |
| «Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.                     | 280   | 840     | 1680    | 3360 |
| «Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.                    | –   | 280     | 560     | 1120 |
| «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475. | –   | 280     | 560     | 1120 |
| «The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.                | 560   | 1680    | 3360    | 6720 |

\*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

\*\* Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогам передплатних агентств «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр», «АС Медіа» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

### Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

### Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>  
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>  
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>  
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>  
 На сайті видавництва у 2022 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2020 рр.



### ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
 03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11  
 Тел./факс: 38044 205-23-90  
 E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
<https://patonpublishinghouse.com>