

Олег Новомлинець, Сергій Олексієнко,  
Світлана Ющенко, Євген Половецький

## ПРЕЦИЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

**Актуальність теми дослідження.** Алюмінієві сплави широко застосовуються у конструкціях різних галузей індустрії, при виготовленні яких, крім забезпечення високої міцності нероз'ємних з'єднань у характерних вузлах, існує необхідність збереження їх проектної форми.

**Постановка проблеми.** Вирішення завдання прецизійного з'єднання алюмінієвих сплавів зварюванням тиском ускладнюється внаслідок їх високих термопластичних властивостей, тепло- та електропровідності, що потребує пошуку ефективних способів одержання виробів з низьким рівнем деформації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із перспективних способів прецизійного з'єднання алюмінієвих сплавів є електроконтактне зварювання через проміжні прошарки з алюмінієвої фольги, використання яких сприяє локалізації теплової енергії в контактній деталі, що зварюються, та зменшенню рівня деформації виробу.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Недослідженим залишається процес тепловиділення у контактній деталі, що зварюються, при електроконтактному стиковому зварюванні алюмінієвих сплавів через прошарки.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка прецизійного електроконтактного стикового зварювання алюмінієвих сплавів.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження процесу тепловиділення здійснювали розрахунковим шляхом з використанням скінченно-елементного моделювання. З'єднання прутків з алюмінієвого сплаву АД31 проводили за схемою електроконтактного стикового зварювання опором через проміжні прошарки з алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм на режимі: густина струму 300А/мм<sup>2</sup>, питомих тиск 8 МПа, час зварювання 0,5...0,7 с.

**Висновки.** Показано, що кількість теплоти, яка виділяється у стикі при електроконтактному стиковому зварюванні, залежить від кількості шарів у проміжному прошарку. Встановлено, що при зварюванні алюмінієвого сплаву АД31 на запропонованому режимі через 6 шарів фольги алюмінію АД0 товщиною 11 мкм міцність зварних з'єднань досягає 95 % міцності основного металу при деформації до 2 %.

**Ключові слова:** прецизійне зварювання тиском; алюміній; електроконтактне зварювання; проміжний прошарок; локалізація тепловиділення; зварне з'єднання; міцність.

Табл.: 2. Рис.: 6. Бібл.: 12.

**Постановка проблеми.** Деформація виробів має вирішальне значення при зварюванні тиском. Вирішення завдання прецизійного з'єднання алюмінію та його сплавів зварюванням тиском ускладнюється через притаманні їм високі термопластичні властивості, тепло- та електропровідність. Тому пошук нових ефективних засобів для прецизійного зварювання тиском алюмінієвих сплавів є актуальним завданням для виготовлення виробів з низьким рівнем деформації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] розглянуто фізичні основи прецизійного зварювання тиском. Вказується, що зварне з'єднання з залишковою пластичною деформацією, що не перевищує 2 % від товщини (діаметра) деталі, можна назвати прецизійним, якщо виконується умова геометричної точності:

$$-1 \leq T \leq +1, \quad (1)$$

де  $T$  – безрозмірний критерій геометричної точності з'єднання, який визначається співвідношенням:

$$T = (\Delta_0 - \varepsilon_e \pm j) j, \quad (2)$$

де  $\Delta_0$  – відносна залишкова деформація (осадка або вдавненість) зварного з'єднання;  $\varepsilon_e$  – врахована у припуску заготовки відносна вимушена деформація, за якої завершується процес утворення зварного з'єднання;  $j$  – відносний допуск на номінальний розмір зварного з'єднання для цього класу точності його виготовлення.

Для того щоб виконувалася умова прецизійності (1), необхідна умова:

$$(\Delta_0 - \varepsilon_e) \rightarrow 0. \quad (3)$$

Відносну вимушену деформацію можна виразити у безрозмірній формі:

$$\varepsilon_e = \varepsilon_k K_y J_n C^{-1}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon_k$  – показник повного зближення приконтактних шорстких поверхонь, за якого щільність у контакті наближається до одиниці; практично для реальних поверхонь  $\varepsilon_k = 0,3 \dots 0,6$ ;  $K_y$  і  $C$  – відповідно показники зміцнення і напруження у шорсткому шарі контакту; для реальних умов  $K_y = 1 \dots 10$ ;  $C = 4,6 \dots 9,2$ ;  $L_n$  – показник локальності нагріву,  $L_n = 1 \dots 0,1$ .

Формула (4) дозволяє оцінювати вимушену деформацію з урахуванням крайових граничних умов при різних способах зварювання тиском [1].

Наприклад, при зварюванні тиском з загальним рівномірним нагріванням всієї деталі ( $L_n = 1$ ) і стисненні деталей без деформаційного зміцнення шорсткого шару в контакті ( $K_y \leq 1$ ), а також за умови  $\varepsilon_k = 0,5$  (механічна обробка поверхонь) і  $C = 5$  (повільне стиснення деталей):

$$\varepsilon_s = 0,5 \cdot 10 \cdot 1 / 5 = 0,1 (10\%).$$

Якщо стиснення деталей проводять при кімнатній температурі ( $L_n = 1$ ) з максимальним зміцненням шорсткого шару в контакті, тобто при  $C = 10$ ;  $K_y = 10$ , то  $\varepsilon_s$  досягає свого максимального значення (холодне зварювання):

$$\varepsilon_s = 0,5 \cdot 10 \cdot 1 / 10 = 0,5 (50\%)$$

Формула (3) показує, що локалізувати осадку деталей зварюванням тиском можна чотирма основними прийомами [1]:

– зменшенням деформаційного зміцнення шорсткого шару в контакті ( $K_y \rightarrow 1$ ) шляхом уповільненого стиснення деталей при високих температурах нагріву (контактне зварювання за способом А. М. Ігнат'єва, дифузійне зварювання у вакуумі, газопресове зварювання; у цих випадках  $\varepsilon_s < 8\%$ );

– різким збільшенням напруженого стану в шорсткому шарі контакту ( $C \gg 10$ ) шляхом створення чисто контактного напруження (зварювання вибухом, зварювання імпульсом магнітної енергії; у цьому випадку  $\varepsilon_s \rightarrow 1\%$ );

– створенням чистого контактного локального нагріву деталей;

– контактуванням деталей з критичною швидкістю деформування, за якої завдяки дії механізму порогової та непорогової (дифузійної) повзучості знеміцнення в шорсткому шарі матеріалу контакту переважає над його деформаційним зміцненням.

Таким чином, виходячи з цієї методики, нам видається можливим досягти ефекту прецизійності при зварюванні тиском шляхом зменшення об'єму розплавленого металу, зниження зусилля стиску та зростання температури у зоні контакту шляхом короткоімпульсного дозованого вкладення енергії.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Недослідженим залишається процес тепловиділення у контакті деталей, що зварюються, та його вплив на міцність і рівень деформації при електроконтактному стиковому зварюванні алюмінію та його сплавів через прошарки.

**Мета статті.** Метою цієї роботи є розробка прецизійного електроконтактного стикового зварювання алюмінієвих сплавів.

**Виклад основного матеріалу.** Необхідною умовою, що забезпечує утворення прецизійного з'єднання при електроконтактному зварюванні, є зосередження тепловиділення у приконтактній зоні з'єднання та збільшення опору в контакті деталь–деталь. Саме контактний опір між деталями є ключовим фактором у нагріві деталей при електроконтактному зварюванні, оскільки залежить від стану поверхні та зварювального тиску й у 2–3 рази перевищує опір самих деталей [2].

Ефективним засобом інтенсифікації процесу тепловиділення у контакті деталей і, відповідно, зменшення деформації виробів, при електроконтактному зварюванні алюмінію та його сплавів є використання тонких проміжних прошарків з матеріалу, що має високий електричний опір та близький до основного металу хімічний склад [3; 4].

Розміщення такого прошарку з декількох шарів фольги дозволяє зосередити тепло-виділення у зоні з'єднання внаслідок утворення між прошарком та деталями більшої кількості контактних опорів, на яких локалізується виділення теплової енергії значної величини при проходженні електричного струму. Це дозволяє збільшити контактний опір, температуру в контакті деталь–деталь, зменшити час нагріву та рівень залишкових деформацій за рахунок зниження об'єму розплавленого металу та утворення зв'язків між матеріалом проміжного шару й основним металом.

Електроконтактне зварювання ґрунтується на використанні джоулевого тепла. Загальна кількість теплоти, що виділяється електричним струмом у провіднику, визначається за законом Джоуля-Ленца, Дж [2; 5]:

$$Q = I^2 R t, \tag{5}$$

де  $R$  – омичний опір провідника;  $I$  – струм;  $t$  – час.

Загальний опір зварювального ланцюга при електроконтактному зварюванні складається із опору  $R_d$  ділянок основного металу, що нагріваються, опору контакту між деталями  $R_k$  та опору контакту між електродом і деталлю  $R_{ед}$ , Ом [2; 5]:

$$R = 2R_d + R_k + 2R_{ед}. \tag{6}$$

При стиковому зварюванні контактний опір між електродом та деталями відносно низький і практично не впливає на нагрів зони з'єднання [5].

Власний опір деталей визначається за формулою, Ом [2; 5]:

$$2R_d = \frac{2\rho_0 l_0}{S}, \tag{7}$$

де  $\rho_0$  – питомий електричний опір металу;  $2l_0$  – установочна довжина деталей;  $S$  – площа поперечного перерізу деталей.

Теоретично встановлена та експериментально підтверджена залежність між тиском, прикладеним до контакту, та його електричним опором [6]:

$$R_k = \frac{r_k}{P^\alpha}, \tag{8}$$

де  $P$  – зусилля, що діє в контакті, кг;  $r_k$  – одиничний контактний опір при зусиллі  $P = 1$  кг;  $\alpha$  – експериментальний коефіцієнт, змінюється у межах 0,5...1,0.

Одиничний опір  $r_k$  залежить від марки металу і стану його поверхні, та, як правило, зменшується для м'яких металів та матеріалів з високою теплопровідністю. Для алюмінієвих сплавів  $r_k$  змінюється в межах 0,001...0,002 Ом, а коефіцієнт  $\alpha$  від 0,75 до 0,85 [6].

Кількість теплоти, що виділяється в контакті між деталями за секунду під час стикового зварювання, визначається за формулою [7]:

$$q = m_1 \cdot I^2 R_k, \tag{9}$$

де  $m_1$  – коефіцієнт, що враховує зміну контактного опору у процесі нагріву контакту,  $m_1 \approx 0,4$ .

Для дослідження процесу тепловиділення у зоні контакту при електроконтактному стиковому зварюванні (ЕКСЗ) опором алюмінієвого сплаву марки АД31 через проміжний прошарок з алюмінієвої фольги АД0 було проведено розрахунок кількості теплової енергії, що виділяється на контактному опорі та в об'ємі деталей. Вхідні дані для розрахунку наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Вхідні дані для розрахунку теплової енергії, що виділяється у стику при ЕКСЗ

Діаметр деталі $d$ , мм	Довжина вильоту $l_0$ , мм	Питомий тиск $p$ , МПа	Питомий електричний опір $\rho_0$ , Ом·м	Струм $I$ , А
12	15	8	$3,44 \cdot 10^{-8}$	8000

Для зручності розрахунку було використано припущення, що об'єм металу, в якому здійснюється виділення тепла на контактному опорі, – це об'єм металу в шорсткій поверхні. Відомо, що у шорстких поверхонь при токарній підготовці на деталей величина  $R_a \approx 2,5$  мкм [8], а висота нерівностей контактуючих поверхонь становить  $2R_a$  [9]. При цьому повнота заповнення контактуючих поверхонь металом  $C_x$  становить  $(0,2 \dots 0,4)$  від вихідної концентрації  $C_0$  (рис. 1, а) [9]. Після змінання шорсткої поверхні розрахункову схему можна представити у вигляді, зображеному на рис. 1, б, де  $V_{ш}$  – об'єм металу шорсткої зони, деформованого до повного змінання мікрорівностей.

Прийемо, що частка об'єму металу в шорсткій поверхні становить  $(0,4) C_0$ . Тоді величина деформації після змінання шорсткої поверхні дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_2}{l_1} = \frac{2R_a - 0,4 \cdot 2R_a}{2R_a} = 0,6.$$

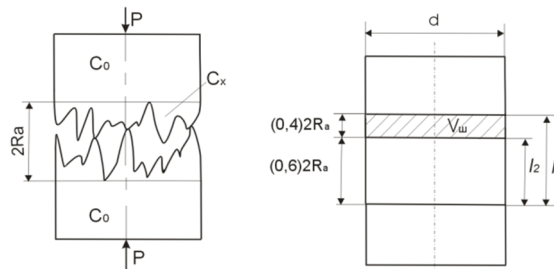


Рис. 1. Схема контактування до (а) та після (б) змінання шорстких поверхонь

Як вказано у роботі [10], для розрахунку кількості теплоти на ранній стадії нагріву приконтатне джерело вважають миттєвим і прикладеним у момент початку нагріву  $t = 0$ . При цьому теплота за критичної швидкості деформування  $v = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  [1] у контакті деталей протягом його змінання виділяється за час:

$$t = \frac{v}{\varepsilon} = \frac{10^{-2}}{0,6} = 0,017, \text{ с}.$$

Контактний опір для алюмінієвих механічно очищених токарною обробкою поверхонь, розрахований за виразом (8) при зусиллі стиску 90 кг,  $r_k = 0,0015$  Ом та  $\alpha = 0,8$ , становить:

$$R_k = \frac{r_k}{P^\alpha} = \frac{0,0015}{90^{0,8}} = 40 \cdot 10^{-6}, \text{ Ом}.$$

Тоді, враховуючи, що контактних опорів при розміщенні між деталями двох шарів фольги виникає три, за виразом (9) одержимо:

$$q = m_1 I^2 3R_k = 0,4 \cdot 8000^2 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 3,07 \cdot 10^3, \text{ Вт}.$$

При стиковому ЕКЗ опором теплота, що виділяється у контакті між торцями деталей по мірі нагрівання з'єднання, швидко зменшується [2], тому після досягнення часу  $t > 0,017$  с теплота виділяється тільки в об'ємі деталей на їх власному електричному опорі  $2R_d$ .

Враховуючи, що площа поперечного перерізу деталі дорівнює  $(\pi \cdot d^2)/4 = (\pi \cdot 0,012^2)/4 = 113 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , власний опір деталей, визначений за формулою (7):

$$2R_d = 2 \frac{\rho_0 l_0}{S} = 2 \cdot \frac{3,44 \cdot 10^{-8} \cdot 0,015}{113 \cdot 10^{-6}} = 9,125 \cdot 10^{-6}, \text{ Ом}.$$

Кількість теплоти, що виділяється в об'ємі деталей у початковий момент виділення в них тепла при проходженні електричного струму, можна визначити за формулою:

$$Q = I^2 2R_d = 8000^2 \cdot 2 \cdot 9,125 \cdot 10^{-6} = 1168 \text{ Вт}.$$

Аналогічний розрахунок було проведено для випадку стикового ЕКЗ через чотири та шість шарів алюмінієвої фольги. Результати розрахунків наведені у табл. 2.

Таблиця 2

*Кількість теплової енергії при ЕКСЗ опором алюмінієвого сплаву АД31 через прошарок*

Величина	2 шари	4 шари	6 шарів
$q, \times 10^3$ Вт	3,07	5,12	7,17
Q, Вт	1168		

Отримані результати було використано для скінченно-елементного моделювання процесу нагріву при електроконтактному стиковому зварюванню опором алюмінієвого сплаву АД31 через два, чотири та шість шарів алюмінієвої фольги у проміжному прошарку.

Розрахункова схема стержня для моделювання тепловиділення у процесі нагріву під час зварювання двох циліндричних стержнів зі сплаву АД31 діаметром 12 мм через проміжний прошарок, що складається з двох шарів алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм, зображена на рис. 2. Розрахункові схеми для моделювання процесу нагріву при зварюванні через чотири та шість прошарків аналогічні. Результати скінченно-елементного моделювання представлено на рис. 3.

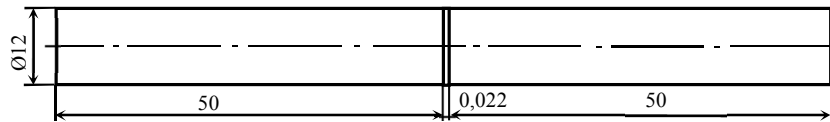


Рис. 2. Розрахункова схема стержня

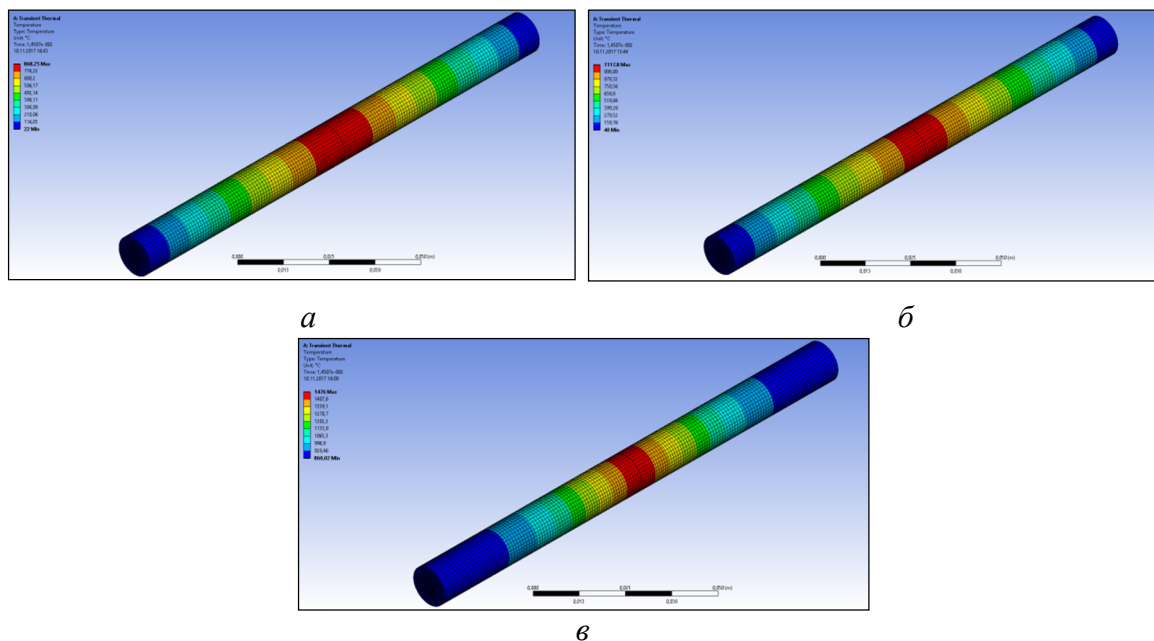


Рис. 3. Розподілення температури вздовж стержня при ЕКСЗ опором алюмінієвого сплаву АД31 залежно від кількості шарів фольги:  
а – 2 прошарки; б – 4 прошарки; в – 6 прошарків

Як показали результати моделювання, зі збільшенням кількості шарів фольги у початковий момент нагріву відбувається більше тепловиділення деталей у більш вузькій приконтактній зоні порівняно з використанням меншої кількості шарів (рис. 4).

Зростання температури в контакті пов'язується зі збільшенням кількості контактних опорів, що виникають між шарами фольги. Зменшення зони температурного впливу можна пояснити тим, що з підвищенням температури теплопровідність алюмінію зменшується.

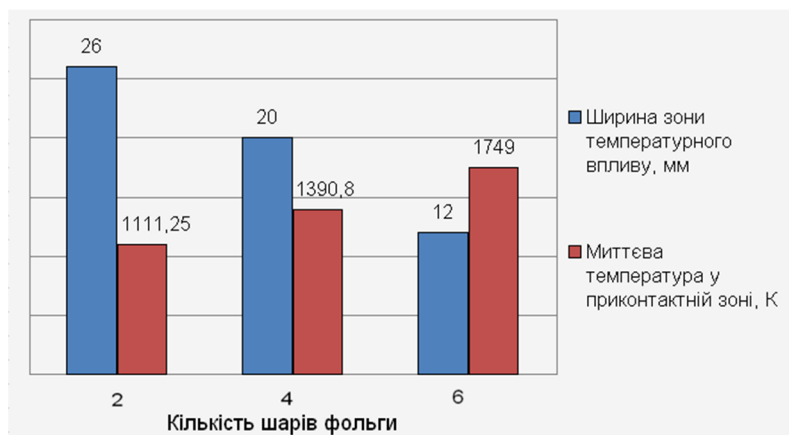


Рис. 4. Результати моделювання процесу нагріву при ЕКЗ через прошарок

Для експериментального дослідження використовували прутки діаметром 6 мм з алюмінієвого сплаву марки АД31. Електроконтактне стикове зварювання опором проводили на машині МС-802У на режимі, який є максимально жорстким для цього типу машин:  $j = 300 \text{ А/мм}^2$ ;  $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$ ;  $t_{зв} = 0,5...0,7 \text{ с}$ . Було досліджено вплив кількості тонких прошарків з алюмінію АД0 завтовшки 11 мкм на міцність зварних з'єднань на розтяг (рис. 5). Необхідно зазначити, що при зварюванні заготовок на вказаних режимах напряму нероз'ємне з'єднання не утворюється взагалі.

Встановлено, що при зварюванні прутків з алюмінію АД31 через 6 шарів алюмінієвої фольги міцність зварних з'єднань досягає 250 МПа, що становить 95 % міцності основного матеріалу. При цьому рівень деформації основного матеріалу не перевищує 2 %.

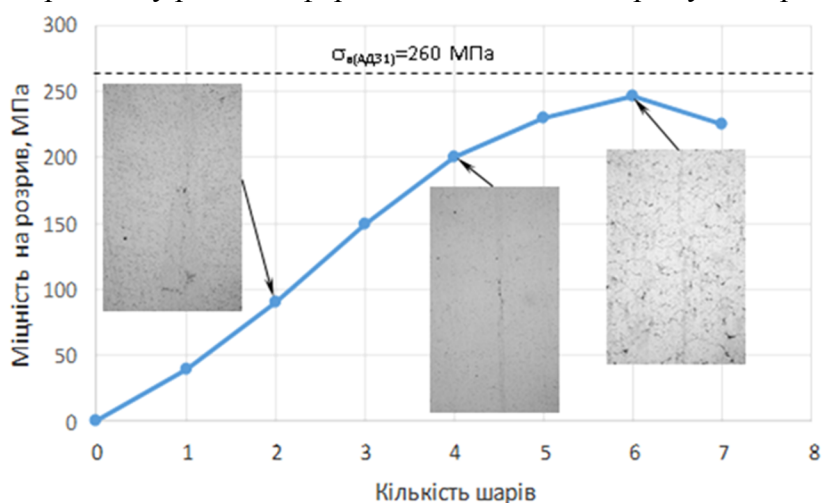


Рис. 5. Вплив кількості шарів фольги з алюмінію на міцність зварних з'єднань АД31+АД31, отриманих електроконтактним стиковим зварюванням опором на режимі:  $j = 300 \text{ А/мм}^2$ ;  $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$ ;  $t_{зв} = 0,5...0,7 \text{ с}$

Той факт, що оптимальна кількість шарів у тонких прошарках з алюмінію для стикового ЕКЗ опором сплаву АД31 становила 6 шарів, а в роботах [4; 11] при точковому ЕКЗ алюмінію АМц оптимальна кількість проміжних шарів з алюмінієвої фольги – 4, дозволяє стверджувати, що вибір кількості шарів (тобто вибір величини контактного опору) залежить для кожного конкретного випадку від співвідношення контактного опору деталь–деталь та щільності зварювального струму для утворення максимального рівня теплової енергії в стику.

Проведено дослідження мікроструктури та вимірювання мікротвердості зварних з'єднань, отриманих на оптимальних режимах через 6 шарів проміжних тонких прошарків (рис. 6).

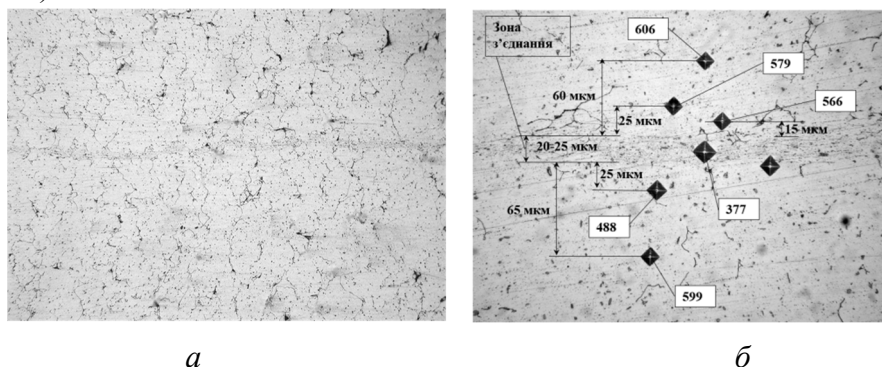


Рис. 6. Мікроструктура (а,  $\times 250$ ) та мікротвердість (б,  $\times 500$ ) зони з'єднання АД31+АД31, отриманого електроконтактним стиковим зварюванням опором на режимі:  $j = 300 \text{ А/мм}^2$ ;  $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$ ;  $t_{зв} = 0,5...0,7 \text{ с}$ , через 6 шарів фольги з алюмінію товщиною 11 мкм (оптична мікроскопія)

З фотознімки на рис. 6, б видно, що ширина зона взаємного розплавлення становить величину близько 20...25 мкм, що свідчить про високий ступінь локалізації теплової енергії в стику. При цьому мікротвердість зони контакту на 25...30 % менше мікротвердості основного металу, що, як відомо, позитивно позначається на працездатності зварних з'єднань.

Таким чином, проведені дослідження підтверджують ефективність використання для прецизійного електроконтактного зварювання тонких проміжних прошарків з матеріалу з високим електричним опором, близького за хімічним складом до основного.

На основі проведених досліджень нами був запропонований спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок [12].

**Висновки і пропозиції.** Встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової енергії в стику при електроконтактному стиковому зварюванні є використання тонких проміжних прошарків з алюмінієвої фольги. Показано, що регулювати кількість теплоти, яка виділяється у стику при електроконтактному зварюванні, можна за рахунок зміни кількості шарів у прошарку.

Запропоновано спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок. Показано, що при стиковому зварюванні опором прутків із алюмінієвого сплаву АД31 на режимі  $j = 300 \text{ А/мм}^2$ ;  $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$ ;  $t_{зв} = 0,5...0,7 \text{ с}$  через 6 шарів з фольги алюмінію АД0 завтовшки 11 мкм, міцність зварних з'єднань досягає 95 % міцності основного матеріалу при деформації не більше 2 %.

#### Список використаних джерел

1. Банов М. Д. Специальные способы сварки и резки : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / М. Д. Банов, В. В. Масаков, Н. П. Плюснина. – М. : Академия, 2009. – 207 с.
2. Гуляев А. И. Технология и оборудование контактной сварки / А. И. Гуляев. – М. : Машиностроение, 1985. – 254 с.
3. Пат. 89671 UA, МПК51 В23К 11/10. Спосіб електроконтактного точкового зварювання металевих деталей через прошарок / Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, Ю. В. Фальченко, Л. В. Петрушинець; заявник і власник Чернігівський національний технологічний університет. – № u201314308; заявл. 09.12.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.
4. Прецизійне електроконтактне точкове зварювання металевих матеріалів / О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, І. В. Завальна, Є. В. Половецький // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2014. – № 2. – С. 104–111.

5. *Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для машиностроительных вузов* / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев и др. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
6. *Кочергин К. А. Контактная сварка* / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение, 1987. – 240 с.
7. *Кочергин К. А. Сварка давлением* / К. А. Кочергин. – М. : Машиностроение. 1972. – 215 с.
8. *Мартыненко О. В. Точность в машиностроении : учеб. пособие* / О. В. Мартыненко. – Волгоград : РПК “Политехник”, 2005. – 62 с.
9. *Ковшиков Е. К. Новое в технологии диффузионного соединения материалов : учеб. пособие* / Е. К. Ковшиков, Г. А. Маслов. – М. : Машиностроение, 1990. – 64 с.
10. *Гельман А. С. Технология контактной электросварки* / А. С. Гельман. – М. : Машгиз, 1952. – 368 с.
11. *Дослідження процесів масоперенесення при прецизійному електроконтактному зварюванні алюмінію* / В. Мазанко, О. Новомлинець, С. Олексієнко, С. Ющенко // *Технічні науки та технології: науковий журнал*. – 2017. – № 2 (8). – С. 75–81.
12. *Пат. 117001 UA, МПК51 В23К 20/16. Спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок* / Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, Є. В. Половецький, І. О. Прибитько, І. В. Нагорна; заявник і власник Чернігівський національний технологічний університет. – № u201613635; заявл. 30.12.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл. № 11.

### References

1. Banov, M.D., Masakov, V.V. & Pliusnina, N.P. (2009). *Spetsialnye sposoby svarki i rezki [Special methods of welding and cutting]*. Moscow: Academia (in Russian).
2. Guliaiev, A.I. (1985). *Tekhnologiya i oborudovanie kontaktnoi svarki [Technology and equipment of resistance welding]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
3. Kharchenko, G.K., Novomlynets, O.O., Falchenko, Yu.V., & Petrushinets, L.V. (2014). *Sposib elektrokontaknoho tochkovoho zvariuvannia metalevykh detalej cherez prosharok [The method of resistance spot welding of metal parts through interlayer]*. UA Patent No. 89671.
4. Novomlynets, O.O., Oleksiienko, S.V., Zavalna, I.V. & Polovetskyi, Ye.V. (2014). *Pretsyziine elektrokontaktne tochkove zvariuvannia metalevykh materialiv [High-precision electrocontact spot welding of metallic materials]*. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tehnolohichnoho universytetu – Visnyk of Chernihiv State Technological University*, no. 2, pp. 104–111 (in Ukrainian).
5. Orlov, B.D., Chakalev, A.A. & Dmitriev, Yu.V. (1986). *Tekhnologiya i oborudovanie kontaktnoi svarki [Technology and equipment of resistance welding]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
6. Kochergin, K.A. (1987). *Kontaktnaia svarka [Resistance welding]*. Leningrad: Mashinostroenie (in Russian).
7. Kochergin, K.A. (1972). *Svarka davleniem [Pressure welding]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
8. Martynenko, O.V. (2005). *Tochnost v mashinostroenii [Precision in mechanical engineering]*. Volgograd: RPK “Politekhnik” (in Russian).
9. Kovshikov, E. K. & Maslov, G. A. (1990). *Novoe v tekhnologii diffuzionnogo soedineniia materialov [New in technologies of diffusion bonding of materials]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
10. Gelman, A.S. (1952). *Tekhnologiya kontaktnoi elektrosvarki [Technology of electric resistance welding]*. Moscow: Mashgiz (in Russian).
11. Mazanko, V., Novomlynets, O., Oleksiinko, S. & Yushchenko, S. (2017). *Doslidzhennia protsesiv masopereenesennia pry elektrokontaktному zvariuvanni aliuminiu [Investigation of mass transfer processes during high-precision electric resistance welding of aluminium]*. *Tekhnichni nauky ta tehnolohii. – Technical sciences and technology*, no. 2 (8), pp. 75–81 (in Ukrainian).
12. Kharchenko, G.K., Novomlynets, O.O., Oleksiienko, S.V., Yushchenko, S.M., Polovetskyi, Ye.V., Prybytko, I.O., Nahorna, I.V. (2016). *Sposib elektrokontaknoho stykovoho zvariuvannia oporom aliuminiu ta yoho splaviv [The method of resistance butt welding of aluminium and its alloys through interlayer]*. UA Patent No. 13635.



Oleg Novomlynets, Serhii Oleksiienko,  
Svitlana Yushchenko, Evgen Polovetskiy

### PRECISION PRESSURE WELDING OF ALUMINIUM ALLOYS

**Urgency of the research.** Aluminum alloys are widespread materials in constructions of different branches of industry. Apart from ensuring the strength of permanent joints in typical units of constructions, their production requires to retain their designed form.

**Target setting.** Precision joining of aluminum alloys by pressure welding is complicated owing to their high thermoplastic properties, heat- and electro conductivity. It requires the search of effective methods for obtaining products with low deformation level.

**Actual scientific researches and issues analysis.** One of perspective joining methods of aluminium alloys is precision electric resistance welding through intermediate layers of aluminium foil. Their application promotes to localization of heat energy in the contact of welded components and decrease of product deformation level.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Heat release process in the contact of welded components during electric resistance butt-welding of aluminum alloys through interlayers remains unstudied.

**The research objective.** Aim of this paper is the development of precision electric resistance welding of aluminium alloys.

**The statement of basic materials.** The investigation of heat release process has been carried out by estimated way with using of finite-element modeling. The joining of aluminum alloy 6063 has been realized by electric resistance butt-welding through intermediate layers of aluminum 1050 foil by thickness 11  $\mu\text{m}$ . Welding conditions: the current density 300 A/mm<sup>2</sup>, the specific pressure 8 MPa, the welding time 0.5-0.7 sec.

**Conclusions.** It is shown, that quantity of heat generated in the contact zone during electric resistance butt-welding depends on number of layers in the interlayer. It has been determined that welding of aluminum alloy 6063 under offered conditions through 6 layers of aluminum foil allows to obtain welded joints with strength by 95 % from base metal strength and deformation level up to 2 %.

**Key words:** precision pressure welding; aluminium; resistance welding; intermediate layer; localization of heat release; welded joint; strength.

Tabl.: 2. Fig.: 8. Bibl.: 12.

УДК 621.791.4

Олег Новомлинец, Сергей Олексиевко,  
Светлана Ющенко, Евгений Половецкий

### ПРЕЦИЗИОННАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

На сегодняшний день конструкции из алюминиевых сплавов имеют широкое распространение в приоритетных высокотехнологических отраслях индустрии, в частности авиационной, ракетно-космической, автомобиле- и судостроительной, производстве приборов военного назначения. При этом, кроме обеспечения высокой прочности неразъемных соединений в узлах конструкций, существует необходимость сохранения их проектной формы. В связи с этим актуальным заданием является поиск новых и совершенствование существующих способов прецизионного соединения алюминия и его сплавов.

Проведено исследование прецизионной электроконтактной стыковой сварки на примере алюминиевого сплава АД31 с использованием промежуточных слоев из алюминиевой фольги марки АД0. Установлен оптимальный режим сварки, исследована микроструктура полученных сварных соединений.

**Ключевые слова:** прецизионная сварка давлением; алюминий; электроконтактная сварка; промежуточная прослойка; локализация тепловыделения; сварное соединение; прочность.

Табл.: 2. Рис.: 8. Библ.: 12.

**Новомлинец Олег Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Новомлинец Олег Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, первый проректор, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Novomlynets Oleg** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, First Vice-Rector, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027, Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** oon1@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>

**Researcher ID:** F-8166-2014

**Scopus Author ID:** 56938958300; 6507741249

**Олексієвко Сергій Владиславович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Олексієвко Сергей Владиславович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Oleksiienko Serhii** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027, Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** sv.oleks@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5475-4439>

**ResearcherID:** F-8197-2014

**Scopus Author ID:** 57190370561

**Ющенко Світлана Михайлівна** – асистент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Ющенко Светлана Михайловна** – ассистент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Yushchenko Svitlana** – Assistant Lecturer of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027, Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** rasssveta@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-0863-9020>

**Researcher ID:** F-7741-2014

**Scopus Author ID:** 57190373626

**Половецький Євген Вікторович** – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу фізико-хімічних методів дослідження матеріалів, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (вул. К. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

**Половецкий Евгений Викторович** – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела физико-химических методов исследования материалов, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины (ул. К. Малевича, 11, г. Киев, 03680, Украина).

**Polovetskiy Evgen** – PhD in Technical Sciences, research engineer of the department of physical-chemical investigation methods of materials, The E.O. Paton electric welding institute of the National Academy of Science of Ukraine (11 Malevicha Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** polovecki@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8113-0434>

**Researcher ID:** U-9135-2017