

ВПЛИВ СКАНДІЮ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СПЛАВУ Д16, ОТРИМАНИХ З ПРИСАДНИМИ ДРОТАМИ РІЗНИХ СИСТЕМ ЛЕГУВАННЯ

А.Г. Покляцький¹, В.Є. Федорчук¹, С.І. Мотруніч¹, Ю.В. Фальченко¹, Г.П. Кисла²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Досліджено вплив скандію в присадних дротах типу СвАМг6, Св1201 та СвАК5, а також коливань дуги, спричинених пропусканням електричного струму через ділянку присадки, на формування структури швів при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом тонколистового алюмінієвого сплаву Д16. Зображено криві розподілу твердості металу в зоні зварювання та визначено межі міцності зварних з'єднань та металу швів після природного старіння зразків. Показано, що використання присадних дротів зі скандієм, як і звичайних серійних, призводить до утворення дрібнозернистої дендритної структури металу швів. Проте через низький (0,15...0,17 %) вміст скандію у швах навіть при зварюванні з коливаннями дуги формування субдендритної структури не відбувається. Використання присадних дротів зі скандієм може зменшити ступінь розміщення металу швів при зниженні у них загальної кількості основних легуючих елементів. Позитивний вплив добавок скандію разом із використанням коливань дуги на ступінь розміщення та межю міцності металу швів простежується при застосуванні присадного дроту системи легування Al–Si. Проте максимальний рівень міцності як зварних з'єднань, так і металу швів забезпечується при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом сплаву Д16 товщиною 2 мм з серійними присадними дротами СвАМг6 та СвАМг63. Бібліогр. 21, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: алюмінієвий сплав Д16, аргонодугове зварювання неплавким електродом із коливаннями дуги, скандій, мікроструктура, твердість, границя міцності

Алюмінієві сплави різних систем легування широко використовуються для виготовлення космічної та авіаційної техніки, морських і річкових суден, залізничного й автомобільного транспорту та інших конструкцій відповідального призначення [1–3]. Значною мірою це зумовлено їх високою конструкційною міцністю, яка забезпечується оптимальним поєднанням характеристик міцності, що визначає матеріаломісткість конструкцій і тріщиностійкості, що свідчить про їх опір крихкому руйнуванню і забезпеченню надійності та довговічності вузлів при їх експлуатації [4]. Для отримання нероз'ємних з'єднань із напівфабрикатів цих сплавів у більшості випадків використовують аргонодугове зварювання неплавким (вольфрамовим) електродом (АДЗНЕ), при якому формування шва відбувається в результаті розплавлення зварюваних кромок і присадного дроту та їх подальшої кристалізації [5]. При цьому метал шва має литу, як правило, великокристалічну структуру з яскраво вираженою орієнтацією дендритів, внаслідок чого його межа міцності для більшості термічно зміцнюваних сплавів не перевищує 50...60 % цього показника для основного матеріалу [6].

Тому для підвищення міцності швів необхідно створювати в процесі зварювання сприятливі умови для формування в них дрібнозернистої дезори-

єнтованої структури металу. Серед відомих широко використовуваних способів впливу на процеси кристалізації металу зварювальної ванни важливе місце займає застосування зварювальних дротів, модифікованих цирконієм, який виступає в якості примусових центрів кристалізації. Крім того, протягом тривалого часу досліджується ефективність застосування в якості модифікатора скандію, унікальність впливу якого зумовлена розмірно-структурною подібністю кристалічних ґратниць алюмінію (0,4405 нм) і фази Al₃Sc (0,4407 нм), завдяки чому частки останньої виступають зародками центрів кристалізації у швах [7–9]. В результаті забезпечується формування дрібнокристалічної структури швів, що позитивно впливає на їх фізико-механічні властивості [10].

Так, при зварюванні деформованих термічно незміцнюваних сплавів системи легування Al–Mg завдяки використанню присадних дротів зі скандієм відбувається дисперсійне твердіння та структурне зміцнення металу швів, що забезпечує підвищення їх межі міцності та межі плинності [6, 11]. Позитивно впливає введення скандію в присадні дроти і при зварюванні термічно зміцнюваних алюмінієвих сплавів системи легування Al–Mg–Li. Крім підвищення межі міцності швів безпосередньо після зварювання при термічній

Покляцький А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4101-2206>, Федорчук В.Є. – <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>, Мотруніч С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-8841-8609>, Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>, Кисла Г.П. – <https://orcid.org/0000-0003-0791-6903>

© А.Г. Покляцький, В.Є. Федорчук, С.І. Мотруніч, Ю.В. Фальченко, Г.П. Кисла, 2020

обробці зварних з'єднань створюються сприятливі умови для додаткового їх зміцнення завдяки виділенню не тільки зміцнюючих часток основних легуючих елементів, але й дисперсних алюмінієво-скандієвих фаз [6, 12, 13].

Що стосується алюмінієвих сплавів, легуємих міддю, то введення скандію може проявлятися по-різному. Інколи скандій з міддю можуть утворювати хімічне з'єднання (W-фазу), внаслідок чого його вплив на подрібнення структури металу шва та його зміцнення зменшуватиметься [14]. Крім того, збільшення об'ємної частки надлишкових фаз може призвести до зниження міцності, пластичності та в'язкості руйнування металу шва [15]. Проте експериментальні дослідження, проведені на сплавах 1201 та 1460, свідчать про зростання межі міцності швів, отриманих АДЗНЕ при використанні присадного дроту типу Св1201 з 0,5 % Sc [6]. Також спостерігається позитивний вплив скандію на фізико-механічні характеристики напівфабрикатів і зварних з'єднань сплавів системи легування Al–Zn–Mg–Cu [6, 16].

Іншим ефективним способом зміни умов кристалізації металу в процесі зварювання можуть бути різкі коливання розплаву зварювальної ванни, спричинені періодичною зміною силового впливу дуги в результаті пульсацій зварювального струму або відхилення її від вертикального положення [17, 18]. В результаті таких коливань відбувається періодичне оплавлення осей другого порядку утворених кристалів і підвищення активності центрів кристалізації внаслідок періодичної зміни температури металу на фронті кристалізації. Це призводить до порушення безперервності кристалізації та формування протяжних орієнтованих кристалів і сприяє утворенню дрібнозернистої дезорієнтованої структури металу шва [19].

При зварюванні тонколистових (<3 мм) напівфабрикатів, коли об'єм присадного дроту у шві незначний (<20 %), не вдається досягти оптимальної (0,3...0,4 % [20]) концентрації скандію в металі шва, при якій забезпечується формування субдендритної структури металу шва. Тому в таких випадках доцільно одночасно з використанням присадних дротів, модифікованих скандієм, виконувати дугове зварювання з коливаннями розплаву зварювальної ванни для гарантованого отримання дезорієнтованої дрібнозернистої дендритної структури по всьому об'єму металу швів [21].

Мета досліджень – оцінити вплив скандію в присадних дротах систем легування Al–Mg, Al–Cu, Al–Si та коливань дуги, спричинених пропусканням електричного струму через ділянку присадки, на формування структури швів, розміщення металу та межі міцності зварних з'єднань і металу швів при АДЗНЕ тонколистового сплаву Д16.

Методика проведення досліджень. Автоматизоване АДЗНЕ стикових з'єднань листів алюмінієвого сплаву Д16 (мас. %: 4,5 Cu; 1,7 Mg; 0,53 Mn; 0,19 Si; 0,21 Fe; 0,11 Zr; 0,06 Ti; решта – Al) товщиною 2 мм виконували на змінному струмі з прямокутною формою хвилі частотою 200 Гц за допомогою зварювальної головки АСТВ-2м від джерела живлення MW-450 («Fronius», Австрія). Швидкість зварювання становила 20 м/год, величина зварювального струму – 170 А, а швидкість подачі присадного дроту діаметром 1,6 мм – 82 м/год. При зварюванні використовували серійні присадні дроти трьох систем легування: Al–Mg (СвАМг6), Al–Cu (Св1201) та Al–Si (СвАК5), а також аналогічні їм модифіковані цирконієм та скандієм – СвАМг63 (Al–6,2%Mg–0,6%Mn–0,2%Zr), Св1571 (Al–6,1%Mg–0,19%Mn–0,06%Zr–0,015Ti–0,52%Sc), Св1201Sc (Al–6%Cu–0,1%Ti–0,2%Zr–0,5%Sc) та СвАК5Sc (Al–5%Si–0,5%Sc). Крім того, для формування однорідної дрібнозернистої дезорієнтованої структури металу по всьому об'єму швів зварювання виконували з коливаннями розплавленого металу зварювальної ванни, спричиненими відхиленнями дуги від її вертикального положення внаслідок пропускання постійного («+» – на землю) електричного струму величиною 200 А через ділянку присадного дроту довжиною 25 мм безпосередньо перед потраплянням його в зварювальну ванну [18, 21].

Перед зварюванням проводили хімічне травлення листів по загальноприйнятій технології та механічну зачистку поверхонь і торців зварюваних кромок на глибину приблизно 0,1 мм. Листи сплаву в стані після загартування та природного старіння (границя міцності $\sigma_B = 445$ МПа, відносне подовження $\delta = 11$ %) зварювали між собою вздовж напрямку їх вальцювання. Всі дослідження та випробування зразків зварних з'єднань проводили через 10...12 місяців після їх зварювання, коли відбувся процес їх природного старіння.

Твердість металу в різних зонах зварних з'єднань вимірювали на лицьових поверхнях зразків отриманих стиків після зачистки підсилення та проплаву швів урівень з основним матеріалом на приладі Роквелла при навантаженні $P = 600$ Н. Оцінку структурних особливостей зварних з'єднань здійснювали за допомогою оптичного електронного мікроскопа ММТ-1600В. Межу міцності зварних з'єднань ($\sigma_B^{3.3}$) визначали при статичному розтягуванні на універсальному сервогідрравлічному комплексі МТS 318.25 стандартних плоских зразків із шириною робочої частини 15 мм із зачищеним проплавом шва, а межу міцності металу шва ($\sigma_B^{M.M.}$) – на таких самих зразках із зачищеними підсиленнями і проплавом шва.

Таблиця 1. Межа міцності зварних з'єднань сплаву Д16 товщиною 2 мм після їх природного старіння, отриманих АДЗНЕ з використанням різних присадних дротів

| Вид АДЗНЕ | Присадний дріт | Межа міцності, МПа | |
|--------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| | | $\sigma_B^{3.3}$ | $\sigma_B^{M.ш.}$ |
| Звичайне | СвАМг6 | <u>369...352</u> 363 | <u>345...325</u> 335 |
| З коливаннями дуги | СвАМг63 | <u>364...340</u> 359 | <u>339...321</u> 332 |
| З коливаннями дуги | Св1571 | <u>343...332</u> 336 | <u>330...311</u> 320 |
| Звичайне | Св1201 | <u>360...340</u> 349 | <u>318...312</u> 315 |
| З коливаннями дуги | Св1201Sc | <u>363...341</u> 350 | <u>319...311</u> 315 |
| Звичайне | СвАК5 | <u>347...339</u> 342 | <u>260...255</u> 257 |
| З коливаннями дуги | СвАК5Sc | <u>362...343</u> 350 | <u>318...308</u> 312 |

Примітка. У чисельнику приведені максимальні та мінімальні, а в знаменнику – середні значення показників за результатами випробування 4...6 зразків.

Аналіз хімічного складу зразків проводили на рентгенофлуорисцентному аналізаторі EXPERT3L. Суть хімічного аналізу полягала в енергодисперсійному рентгенофлуорисцентному елементному аналізі за методом фундаментальних параметрів зі збудженням характеристичного випромінювання атомів проби фотонами гальмівного спектра низькопотужної рентгенівської трубки і реєстрації цього випромінювання напівпровідниковим детектором з термоелектричним охолодженням.

Результати досліджень та їх обговорення.

За результатами проведених досліджень встановлено, що при звичайному АДЗНЕ сплаву Д16 товщиною 2 мм із серійним присадним дротом СвАМг6 твердість металу в центральній частині шва знаходиться на рівні *HRB* 92,5...93,0, а в зоні сплавлення його з основним матеріалом – *HRB* 97,0...97,5 (рис. 1). Використання присадного дроту СвАМг63, який містить в якості модифікатора цирконій, практично не змінює характер

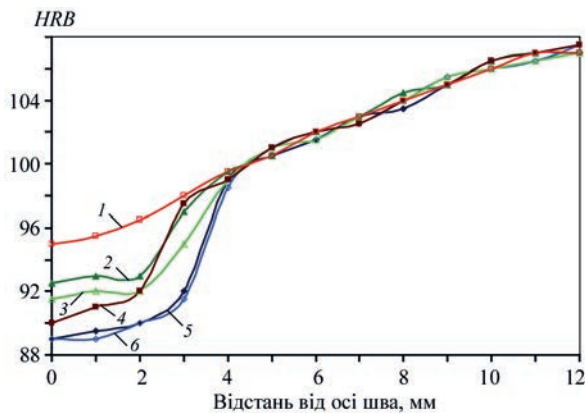


Рис. 1. Розподіл твердості у стикових з'єднаннях сплаву Д16 товщиною 2 мм після зварювання та їх природного старіння, отриманих АДЗНЕ з використанням присадних дротів різних систем легування та коливань дуги: 1 – СвАК5Sc з коливаннями дуги; 2 – СвАМг6; 3 – Св1571 з коливаннями дуги; 4 – СвАК5; 5 – Св1201; 6 – Св1201Sc з коливаннями дуги

розподілу твердості металу в зоні зварювання навіть при АДЗНЕ з коливаннями дуги, спричиненими пропусканням електричного струму через ділянку присадки. І, відповідно, межа міцності зварних з'єднань та межа міцності металу швів при статичному розтягуванні зразків, отриманих з присадними дротами СвАМг6 та СвАМг63, знаходяться приблизно на одному рівні (табл. 1). Застосування присадного дроту типу Св1571, що містить 0,52 % Sc, призводить до незначного зниження твердості металу в зоні формування нероз'ємного з'єднання. Так, у шві, отриманому АДЗНЕ із вказаним дротом та коливаннями дуги, твердість металу становить *HRB* 91,5...92,0, а в зоні сплавлення його з основним матеріалом – *HRB* 95,0...95,5. При цьому межа міцності зварних з'єднань і межа міцності металу швів дещо зменшуються та знаходяться на рівні 336 та 320 МПа, відповідно. Руйнування всіх зразків із зачищеним проплавом шва, отриманих із досліджуваними присадними дротами системи легування Al–Mg, при статичному розтягуванні відбувалося у зоні сплавлення шва з основним матеріалом, а зразків із зачищеними підсиленням і проплавом шва – у центральній частині шва (рис. 2).

За результатами проведених досліджень мікроструктури зразків отриманих зварних з'єднань встановлено, що незалежно від хімічного складу присадних дротів і наявності в них скандію, у швах утворюється дрібнозерниста дендритна структура металу (рис. 3), хоча дендритний параметр для металу швів може змінюватися при зварюванні з різними присадними дротами. Так, при використанні дроту СвАМг6 він становить 9,95 мкм, при використанні дроту СвАМг63 – 10,20 мкм, а дроту Св1571 – 12,36 мкм. Проведений аналіз хімічного складу зварних швів показав, що при використанні присадного дроту Св1571

вміст скандію в них знаходиться на рівні 0,17 % (табл. 2). Звичайно, що такої кількості скандію недостатньо для утворення первинних часток алюмініду скандію в металі шва. Тому використання цього присадного дроту навіть при АДЗНЕ з

коливаннями дуги не може забезпечити необхідних умов для формування субдендритної структури в металі шва, завдяки якій значно підвищується межа міцності швів. Крім того, результати аналізу хімічного складу швів свідчать про те, що при використанні цих дротів сумарна кількість основних легуючих елементів у металі швів, від якої залежить межа міцності останніх, різна: для СвАМг6 вона найбільша, а для Св1571 – найменша.

При АДЗНЕ сплаву Д16 з присадними дротами Св1201 та Св1201Sc системи легування Al–Cu твердість металу в зоні формування нероз'єднаних з'єднань знаходиться на одному рівні – *HRB* 89,0...90,0 в металі швів і *HRB* 91,5...92,5 в зоні сплавлення їх із основним матеріалом. Звичайно, що при цьому забезпечуються однакові значення межі міцності зварних з'єднань (350 МПа) та межі міцності металу швів (315 МПа) при статичному розтягуванні зразків, отриманих із такими присадними дротами. Руйнування зразків із зачищеним проплавом шва відбувається по зоні сплавлення

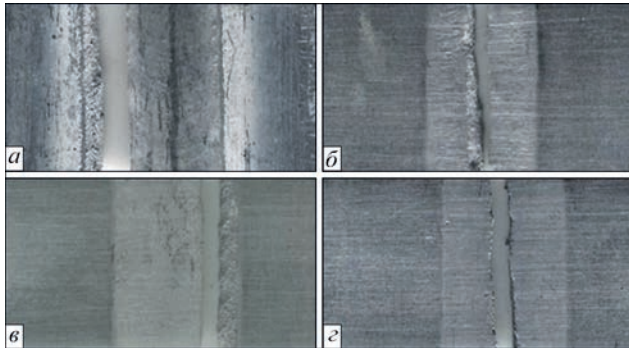


Рис. 2. Зовнішній вигляд робочої частини зразків із зачищеним проплавом шва (а) та зачищеними підсиленням і проплавом шва (б-д) зі сплаву Д16 товщиною 2 мм після їх руйнування при випробуваннях, отриманих АДЗНЕ з використанням присадних дротів різних систем легування: а – Al–Mg, Al–Cu або Al–Si; б – Al–Mg; в – Al–Cu; г – Al–Si

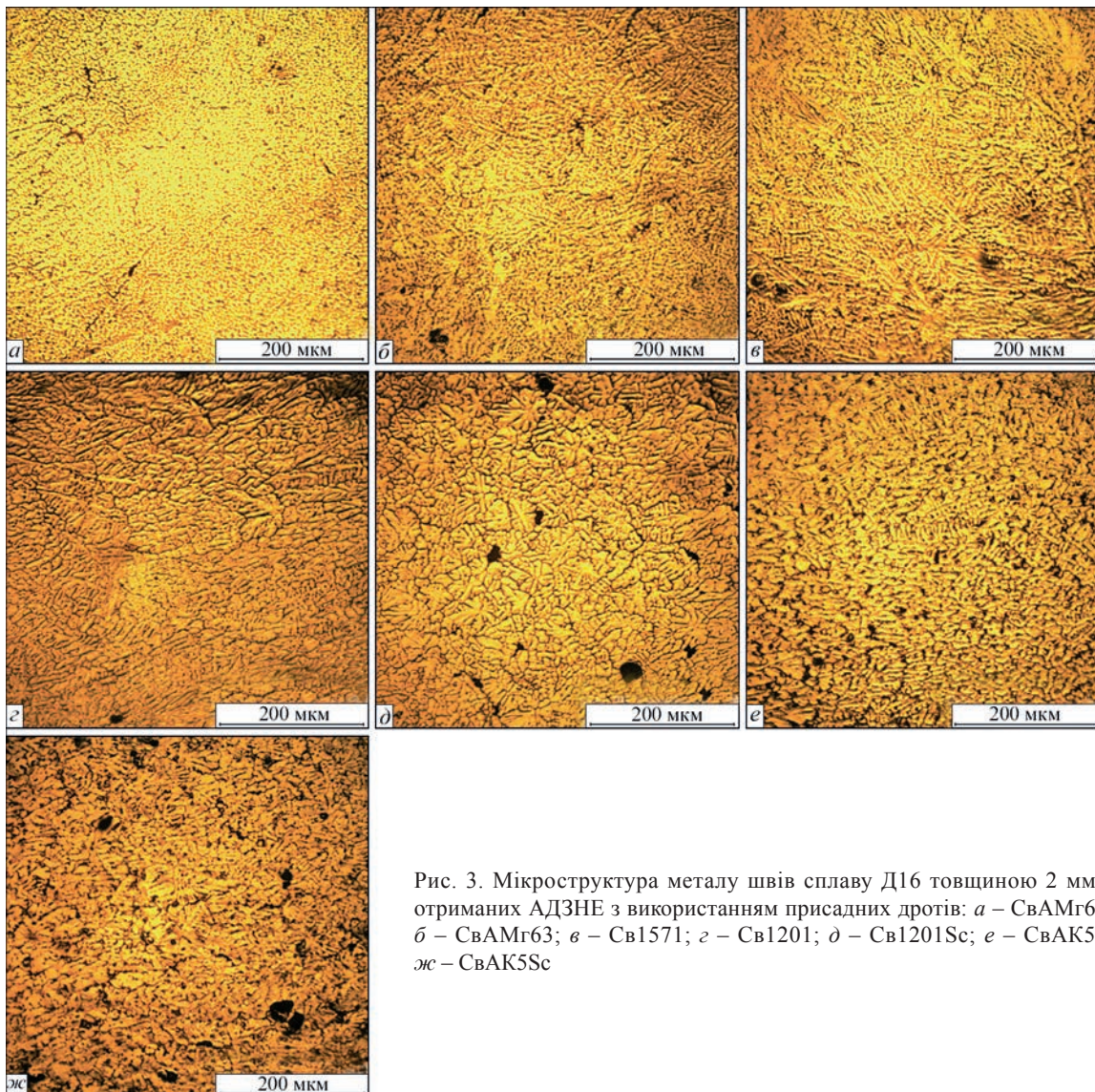


Рис. 3. Мікроструктура металу швів сплаву Д16 товщиною 2 мм, отриманих АДЗНЕ з використанням присадних дротів: а – СвАМг6; б – СвАМг63; в – Св1571; г – Св1201; д – Св1201Sc; е – СвАК5; ж – СвАК5Sc

Таблиця 2. Вміст основних легуючих елементів і модифікаторів у металі швів сплаву Д16 товщиною 2 мм, отриманих АДЗНЕ з використанням різних присадних дротів

| Присадний дріт | Легуючі елементи, мас. % | | | | Модифікатори, мас. % | |
|----------------|--------------------------|------|------|---------------------|----------------------|------|
| | Mg | Cu | Si | $\Sigma_{Mg+Cu+Si}$ | Zr | Sc |
| СвАМг6 | 3,22 | 2,79 | - | 6,01 | - | - |
| СвАМг63 | 2,92 | 2,91 | - | 5,83 | 0,10 | - |
| Св1571 | 2,61 | 3,00 | - | 5,61 | 0,05 | 0,17 |
| Св1201 | 1,08 | 5,91 | - | 6,99 | 0,07 | - |
| Св1201Sc | 0,86 | 5,70 | - | 6,56 | 0,06 | 0,15 |
| СвАК5 | 1,02 | 2,63 | 1,99 | 5,64 | - | - |
| СвАК5Sc | 1,06 | 2,87 | 1,78 | 5,71 | 0,06 | 0,15 |

шва з основним матеріалом, а зразків із зачищеними підсиленням і проплавом шва – по металу шва ближче до цієї зони сплавлення.

Дослідження мікроструктури металу швів, отриманих при АДЗНЕ з обома присадними дротами системи легування Al–Cu, дозволили встановити, що дендритний параметр для них однаковий та становить 12,36 мкм. Але при використанні присадного дроту зі скандієм сумарна кількість основних легуючих елементів у металі шва дещо нижча, ніж в отриманому з серійним присадним дротом. Очевидно, що саме завдяки наявності скандію у швах та застосуванню коливань дуги при їх зварюванні й вдається забезпечити такі ж значення дендритного параметра та границі міцності швів, як і при звичайному АДЗНЕ сплаву Д16 із серійним присадним дротом Св1201.

Позитивний вплив добавок скандію разом із використанням АДЗНЕ з коливаннями дуги простежується при застосуванні присадного дроту системи легування Al–Si. Так, при звичайному АДЗНЕ сплаву Д16 з присадним дротом СвАК5 твердість металу в центральній частині шва знаходиться на рівні *HRB* 90,0...92,0, а в зоні сплавлення його з основним матеріалом – на рівні *HRB* 97,5...98,0. Застосування модифікованого скандієм присадного дроту СвАК5Sc при АДЗНЕ з коливаннями дуги забезпечує підвищення твердості металу в шві до *HRB* 95,0...96,5, а в зоні сплавлення його з основним матеріалом – до *HRB* 98,0...99,0. Відповідно й межа міцності металу швів, отриманих із присадним дротом зі скандієм, на 55 МПа перевищує цей показник для з'єднань, отриманих із серійним присадним дротом СвАК5, і знаходиться на рівні 312 МПа. При цьому наявність скандію у присадному дроті меншою мірою впливає на підвищення межі міцності зварних з'єднань, оскільки руйнування зразків із зачищеним проплавом шва відбувається по зоні сплавлення шва з основним матеріалом. А зразки із зачищеними підсиленням і проплавом шва при статичному розтягуванні руйнуються у центральній частині шва.

За результатом аналізу мікроструктури швів, отриманих із присадними дротами системи легування Al–Si, встановлено, що дендритний пара-

метр для металу швів, зварених з використанням присадного дроту СвАК5, становить 11,66 мкм, а з використанням присадного дроту СвАК5Sc – 11,33 мкм. Крім того, результати дослідження хімічного складу металу швів свідчать про досить незначне збільшення сумарної кількості основних легуючих елементів у них при використанні присадного дроту зі скандієм. Тобто, наявність скандію у присадному дроті системи легування Al–Si разом із коливаннями дуги при АДЗНЕ сплаву Д16 сприяють подрібненню дендритної структури металу швів і підвищенню їх межі міцності.

Висновки

1. При аргонодуговому зварюванні неплавким електродом алюмінієвого сплаву Д16 товщиною 2 мм з досліджуваними присадними дротами систем легування Al–Mg, Al–Cu та Al–Si, незалежно від наявності в них скандію, у швах утворюється дрібнозерниста дендритна структура металу. При цьому дендритний параметр для металу швів може змінюватися при використанні присадних дротів різного хімічного складу.

2. Наявність скандію у присадному дроті системи легування Al–Si разом з коливаннями дуги при зварюванні неплавким електродом цього сплаву сприяють подрібненню дендритної структури металу швів та підвищенню їх твердості та межі міцності.

3. Максимальний рівень міцності зварних з'єднань та металу швів забезпечується при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом сплаву Д16 товщиною 2 мм із серійними присадними дротами СвАМг6 та СвАМг63.

4. Використання присадних дротів систем легування Al–Mg та Al–Cu зі скандієм при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом тонколистового алюмінієвого сплаву Д16 з коливаннями дуги не дозволяє забезпечити у швах формування субдендритної структури металу та завдяки цьому значно підвищити їх міцність, а може лише дещо зменшити ступінь розміцнення металу швів при зниженні в них загальної кількості основних легуючих елементів.

Список літератури

- Ищенко А.Я., Лабури Т.М., Бернадский В.Н., Маковецкая О.К. (2006) *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях*. Киев, ЭкоТехнология.
- Белецкий В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение)*. Справочник. Фридляндер И.Н. (ред.). Киев, КОМИНТЕХ.
- Каблов Е.Н. (2000) Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века. *Перспективные материалы*, **3**, 27–36.
- Осташ О.П. (2015) Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. Т. 15. *Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій*. Панасюк В.В. (ред.), Львів, СПОЛОМ.
- Ищенко А.Я., Лабури Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев, НПП «Издательство НАН Украины».
- Машин В.С., Покляцкий А.Г., Федорчук В.Е. (2005) Механические свойства соединений алюминиевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, **9**, 43–49.
- Давыдов В.Г., Елагин В.И., Захаров В.В., Ростова Т.Д. (1996) О легировании алюминиевых сплавов добавками скандия и циркония. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **8**, 25–30.
- Бондарев Б.И., Елагин В.И. (1992) Новые алюминиевые сплавы, легированные скандием. *Технология легких сплавов*, **5**, 22–28.
- Ищенко А.Я. (2003) Алюминиевые высокопрочные сплавы для сварных конструкций. *Прогресивні матеріали і технології у 2 т*. Київ, Академперіодика, Т. 1, сс. 50–82.
- Мильман Ю.В. (2003) Влияние скандия на структуру, механические свойства и сопротивление коррозии сплавов алюминия. *Там же*. Київ, Академперіодика, Т. 1, сс. 335–360.
- Рязанцев В.И., Филатов Ю.А. (2003) Технологические аспекты дуговой сварки алюминиевых сплавов со скандием. *Авиационная промышленность*, **1**, 13–17.
- Туркина Н.И., Семенова Б.В. (1992) Структура и свойства сплавов системы Al–Mg–Li, легированных скандием. *Технология легких сплавов*, **1**, 57–59.
- Братухин А.Г., Третьяк Н.Г., Склабинская И.Е. (1993) Структура и механические свойства сварных соединений алюминийлитиевых сплавов при сварке опытными присадками со скандием. *Там же*, **12**, 11–15.
- Захаров В.В., Ростова Т.Д. (1995) Легирование скандием алюминиевых медьсодержащих сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **2**, 23–27.
- Елагин В.И., Захаров В.В., Ростова Т.Д., Филатов Ю.А. (1989) Некоторые металлургические принципы легирования, технологии производства и термической обработки алюминиевых сплавов, содержащих скандий. *Технология легких сплавов*, **9**, 27–34.
- Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Новиков И.И. и др. (1993) Сверхпластичность высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu, легированных скандием. *Там же*, **7-8**, 43–47.
- Бродягина И.В. (1998) Дуговая сварка алюминиевых сплавов с использованием магнитных полей. *Сварочное производство*, **9**, 48–51.
- Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Гринюк А.А. и др. (2002) Аргонодуговая сварка алюминиевых сплавов неплавящимся электродом с колебаниями дуги. *Автоматическая сварка*, **2**, 18–22.
- Ищенко А.Я., Покляцкий А.Г., Лозовская А.В. и др. (1990) Влияние параметров низкочастотной модуляции разноплярного тока прямоугольной формы на структуру шва при сварке алюминиевых сплавов. *Там же*, **9**, 23–27.
- Федорчук В.Е., Кушнарёва О.С., Алексеенко Т.А., Фальченко Ю.В. (2014) Особенности легирования скандием металла швов сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов. *Там же*, **5**, 30–34.
- Покляцкий А.Г., Мотрунич С.И. (2019) Прочность сварных соединений термоупрочненных алюминиевых сплавов при сварке ТИГ и СТП. *Там же*, **2**, 17–24.

References

- Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M., Bernadsky, V.N., Makovatskaya, O.K. (2006) *Aluminium and its alloys in modern welded structures*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
- Beletsky, V.M., Krivov, G.A. (2005) *Aluminium alloys (composition, properties, technology, application)*: Refer. book. Ed. by I.N. Fridlyander. Kiev, KOMINTEX [in Russian].
- Kablov, E.N. (2000) Main directions of development of materials for aerospace engineering of 21st century. *Perspektivnye Materialy*, **3**, 27-36 [in Russian].
- Ostash, O.P. (2015) Fracture mechanics and strength of materials: Refer. book. Vol. 15. *Structure of materials and fatigue life of structure components*. Ed. by V.V. Panasyuk, Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
- Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures from aluminium alloys*. Kiev, NPP NANU [in Russian].
- Mashin, V.S., Poklyatsky, A.G., Fedorchuk, V.E. (2005) Mechanical properties of aluminium alloys in consumable and nonconsumable electrode arc welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 39-45.
- Davydov, V.G., Elagin, V.I., Zakharov, V.V., Rostova, T.D. (1996) On alloying of aluminium alloys with scandium and zirconium additives. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **8**, 25-30 [in Russian].
- Bondarev, B.I., Elagin, V.I. (1992) New aluminium alloys with scandium. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **5**, 22-28 [in Russian].
- Ishchenko, A.Ya. (2003) Aluminium high-strength alloys for welded structures. In: *2 Vol.: Advanced materials and technologies*, Kyiv, Akadempriodika, Vol. 1, pp. 50-82 [in Russian].
- Milman, Yu.V. (2003) Effect of scandium on structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminium alloys. *Ibid.*, pp. 335-360 [in Russian].
- Ryazantsev, V.I., Filatov, Yu.A. (2003) Technological aspects of arc welding of aluminium alloys with scandium. *Aviats. Promyshlennost.*, **1**, 13-17 [in Russian].
- Turkina, N.I., Semenova, B.V. (1992) Structure and properties of Al-Mg-Li system alloys with scandium. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **1**, 57-59 [in Russian].
- Bratukhin, A.G., Tretyak, N.G., Sklabinskaya, I.E. (1993) Structure and mechanical properties of welded joints of aluminium-lithium alloys in welding with scandium-containing test additives. *Ibid.*, **12**, 11-15 [in Russian].
- Zakharov, V.V., Rostova, T.D. (1995) Alloying with scandium of aluminium copper-containing alloys. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **2**, 23-27 [in Russian].
- Elagin, V.I., Zakharov, V.V., Rostova, T.D., Filatov, Yu.A. (1989) Some physical metallurgy principles of alloying, production technology and heat treatment of aluminium scandium-containing alloys. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **9**, 27-34 [in Russian].
- Fridlyander, I.N., Senatorova, O.G., Novikov, I.I. et al. (1993) Superplasticity of high-strength alloys of Al-Zn-Mg-Cu system alloyed with scandium. *Ibid.*, **7-8**, 43-47 [in Russian].
- Brodyagina, I.V. (1998) Arc welding of aluminium alloys using magnetic fields. *Svarochn. Proizvodstvo*, **9**, 48-51 [in Russian].
- Poklyatsky, A.G., Ishchenko, A.Ya., Grinyuk, A.A. et al. (2002) Consumable-electrode argon-arc welding of aluminium alloys with arc oscillations. *The Paton Welding J.*, **2**, 18-22 [in Russian].
- Ishchenko, A.Ya., Poklyatsky, A.G., Lozovskaya, A.V. et al. (1990) Influence of low-frequency modulation parameters of rectangular-shaped heteropolar current on weld structure in welding of aluminium alloys. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 23-27 [in Russian].
- Fedorchuk, V.E., Kushnaryova, O.S., Alekseenko, T.A., Falchenko, Yu.V. (2014) Peculiarities of alloying of weld metal of high-strength aluminium alloy welded joints with scandium. *The Paton Welding J.*, **5**, 28-32.
- Poklyatsky, A.G., Motrunich, S.I. (2019) Strength of welded joints of heat-hardenable aluminium alloys in TIG and friction stir welding. *Ibid.*, **2**, 13-18.

INFLUENCE OF SCANDIUM ON MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF D16 ALLOY PRODUCED USING FILLER WIRES OF DIFFERENT ALLOYING SYSTEMS

A.G. Poklyatskii¹, V.E. Fedorchuk¹, S.I. Motrunich¹, Yu.V. Falchenko¹, G.P. Kisla²

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

² NTU «Igor Sikorskii KPI». 37 Peremohi Prosp., 03056, Kyiv, Ukraine.

The impact of scandium in filler wires of SvAMg6, Sv1201 and SvAK5 type, as well as arc oscillations, caused by electric current passage through the filler section, on weld structure formation was studied in nonconsumable electrode argon-arc welding of sheet aluminium alloy D16. Curves of metal hardness distribution in the welding zone are shown and strength limits of welded joints and weld metal after natural ageing of the samples are determined. It is shown that use of scandium filler wires, similar to standard batch-produced ones, leads to formation of a fine-grained dendritic structure of weld metal. However, the subdendritic structure does not form even in welding with arc oscillations, because of a low (0.15 – 0.17%) scandium content in welds. Use of scandium-containing filler wires can lower the degree of weld metal softening at lowering of the total content of the main alloying elements in them. Positive impact of scandium additives together with application of arc oscillations on the degree of softening and ultimate strength of weld metal is noticeable at application of filler wire of Al-Si alloying system. However, the maximum level of strength, both of the welded joints and the weld metal, is ensured in nonconsumable electrode argon-arc welding of D16 alloy 2 mm thick using batch-produced filler wires SvAMg6 and SvMg63. 21 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Keywords: D16 aluminium alloy, nonconsumable electrode argon-arc welding with arc oscillations, scandium, microstructure, hardness, ultimate strength

Надійшла до редакції 23.12.2019

XII Міжнародна спеціалізована виставка

КИЇВСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ЯРМАРОК



МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15
тел.: (044) 201-11-58, 201-11-65, 201-11-56
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua, rlv@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

31 березня – 3 квітня 2020

Генеральний інформаційний партнер: 
Ексклюзивний медіа партнер: 
Технічний партнер: 

iiw ASSOCIATED EVENT

YOUNG PROFESSIONALS INTERNATIONAL CONFERENCE ON WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES

YPIC and WRTYS 2020

19-22 MAY 2020 Kyiv, UKRAINE  ypic2020.com

ХІХ МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2020

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

24 - 27 листопада




ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер: 
Ексклюзивний медіа партнер: 
Технічний партнер: 


Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ
Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр
www.tech-expo.com.ua