

МІЦНІСТЬ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНОГО СПЛАВУ АА7056-Т351, ВИКОНАНИХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ЗВАРЮВАННЯМ

І. М. КЛОЧКОВ, В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, О. М. БЕРДНІКОВА, С. І. МОТРУНІЧ

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

Використання сучасних алюмінієвих сплавів при проектуванні елементів та конструкцій авіа- та ракетобудування, морських суден та наземного транспорту забезпечує високі показники їх міцності та довговічності. Новітні технологічні процеси зварювання дозволяють зменшити масу конструкції та відповідно знизити експлуатаційні витрати, забезпечуючи необхідні показники міцності та довговічності. При цьому отримання якісних зварних з'єднань термічнозміцнених алюмінієвих сплавів є актуальною науково-технічною задачею. Використання технологій зварювання з низьким температурним вкладом, таких як електронно-променево зварювання у порівнянні з традиційними способами зварювання є перспективним для авіаційної та ракетобудівної промисловості. Ціль даної роботи дослідити рівень знеміцнення, структурні особливості, величину залишкових післязварювальних напружень, механічні властивості та закономірності опору втомі з'єднань термічнозміцненого алюмінієвого сплаву АА7056-Т351 з підвищеним вмістом цинку, отриманих електронно-променеви зварюванням. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: зварні з'єднання, опір втомі, залишкові напруження, алюмінієвий сплав, електронно-променево зварювання

Термічнозміцнювані алюмінієві сплави завдяки високій питомій міцності, значній корозійній стійкості, високим показникам опору втомі та росту втомних тріщин широко застосовуються для виготовлення вузлів ракет-носіїв і космічних апаратів, стартових комплексів, суден, повітряного і наземного транспорту, сільськогосподарських машин, хімічного обладнання та інших зварних конструкцій, які, як правило, експлуатуються в надзвичайно складних умовах [1, 2].

На сучасному етапі розвитку дозвукової і надзвукової авіації алюмінієві сплави є основними конструкційними матеріалами в літакобудуванні [3]. Вибір сплаву для конструкції здійснюється на основі диференційованого підходу до роботи кожного вузла з урахуванням його ресурсу, експлуатаційних навантажень, можливості нагріву та інших вимог до деталей. При виготовленні авіаційної техніки успішно використовуються термічнозміцнювані високоміцні алюмінієві сплави 7xxx серії (системи легування Al–Zn–Mg–Cu). Вони є конструкційним матеріалом для крила, обшивки і внутрішнього силового набору елементів планера літака (лонжерони, нервюри, шпангоути та ін.). Алюмінієвий сплав АА7056 був розроблений як сплав з покращеними відносно сплавів АА7150 та АА7449 характеристиками міцності, корозійної стійкості та довговічності. Цей сплав застосовується для виготовлення середньо- та крупногабаритних деталей, таких як верхні панелі крила в авіабудуванні, які працюють в умовах змінного

навантаження. Сучасні технологічні процеси зварювання дозволяють зменшити масу конструкції та відповідно знизити експлуатаційні витрати, забезпечуючи необхідні показники міцності та довговічності. Дані стосовно характеристик опору втомі зварних з'єднань сплаву АА7056 відсутні, тому дослідження в цьому напрямку є актуальними, а отримання якісного зварного з'єднання з високими фізико-механічними властивостями є важливою науково-технічною задачею [4, 5].

Електронно-променево зварювання (ЕПЗ) за рахунок високої концентрації енергії в електронному пучку забезпечує можливість отримання зварних з'єднань з мінімальними розмірами зони термічного впливу і великим співвідношенням глибини швів до їх ширини. ЕПЗ дає можливість використовувати низькі погонні енергії з малими об'ємом розплавленого металу ванни і короткочасного теплового впливу на зварюваний метал. В результаті введення малої кількості теплоти різко знижуються деформації виробу. Зварювання у вакуумі запобігає насиченню розплавленого і нагрітого металу газами. В результаті цього досягається висока якість зварних з'єднань на хімічно активних металах і сплавах, таких як ніобій, цирконій, титан, молібден та інші [6].

Ціль даної роботи дослідити рівень знеміцнення, структурні особливості, величину залишкових післязварювальних напружень, механічні властивості та закономірності опору втомі з'єднань термічнозміцненого алюмінієвого сплаву АА7056 з

підвищеним вмістом цинку, отриманих технологією ЕПЗ.

Високоміцний алюмінієвий сплав АА7056 (8,5...9,7 % Zn, 1,5...2,3 % Mg, 1,2...1,9 % Cu) зварювався в термічнозміцненому стані Т351. Пластини товщиною 12 та 30 мм зварювались електронно-променевим зварюванням у вакуумній камері.

ЕПЗ спеціально підготовлених згідно з технологічними вимогами пластин алюмінієвого сплаву АА7056-Т351 товщиною 12 і 30 мм проводилось на установці УЛ-209М у вакуумі. Установа УЛ-209М конструкції ІЕЗ ім. Є. О. Патона з комп'ютерним управлінням укомплектована енергетичним комплексом на базі ЕЛА-60/60 та електронно-променевою гарматою, що переміщується у вакуумній камері з внутрішніми розмірами 3850×2500×2500 мм. Робочий вакуум становив $3,54 \cdot 10^{-2}$ МПа в камері та $6,65 \cdot 10^{-3}$ МПа в гарматі і створювався за 30 хв. Електронно-променева гармата з металевим вольфрамовим катодом разом з високовольтним джерелом живлення ЕЛА-60/60 забезпечує діапазон струму електронного пучка $I_{\text{п}} = 0 \dots 500$ мА при прискорюючому напруженні $U_{\text{приск}} = 60$ кВ. При відпрацюванні технології ЕПЗ

алюмінієвого сплаву 7056-Т351 використовувалися локальне розгортання електронного пучка з частотою до 1000 Гц і амплітудою до 4 мм.

Дослідження структурних особливостей стикових зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 7056-Т351 товщиною 12 і 30 мм показали, що для зварного шва характерна рівномірна структура при відсутності пор та тріщин, зерна мають рівновісний характер при їх розмірі 4...15 мкм (рис. 1, а, б). На границях зерен спостерігаються досить тонкі прошарки фазових утворень (ФУ) шириною 0,1...0,4 мкм (рис. 1, в, з). У внутрішніх об'ємах зеренної структури – дисперсні частки ФУ розміром 0,1...0,2 мкм при рівномірному їх розподілі, також утворюються одиничні ФУ більшого розміру 0,7...1,0 мкм. При цьому характерне формування субструктурної складової, розмір субзерен складає 0,4...0,8 мкм (рис. 1, з). При переході до лінії сплавлення з боку шва зеренна структура практично не змінюється, а з боку ЗТВ — формується смугаста структура із однаковою спрямованістю, характерною для основного металу, ширина смуг 10...30 мкм, при збільшенні ФУ до 2...3 мкм (рис. 1). По границях смугової складової формуються тонкі прошарки ФУ шириною до 0,5 мкм.

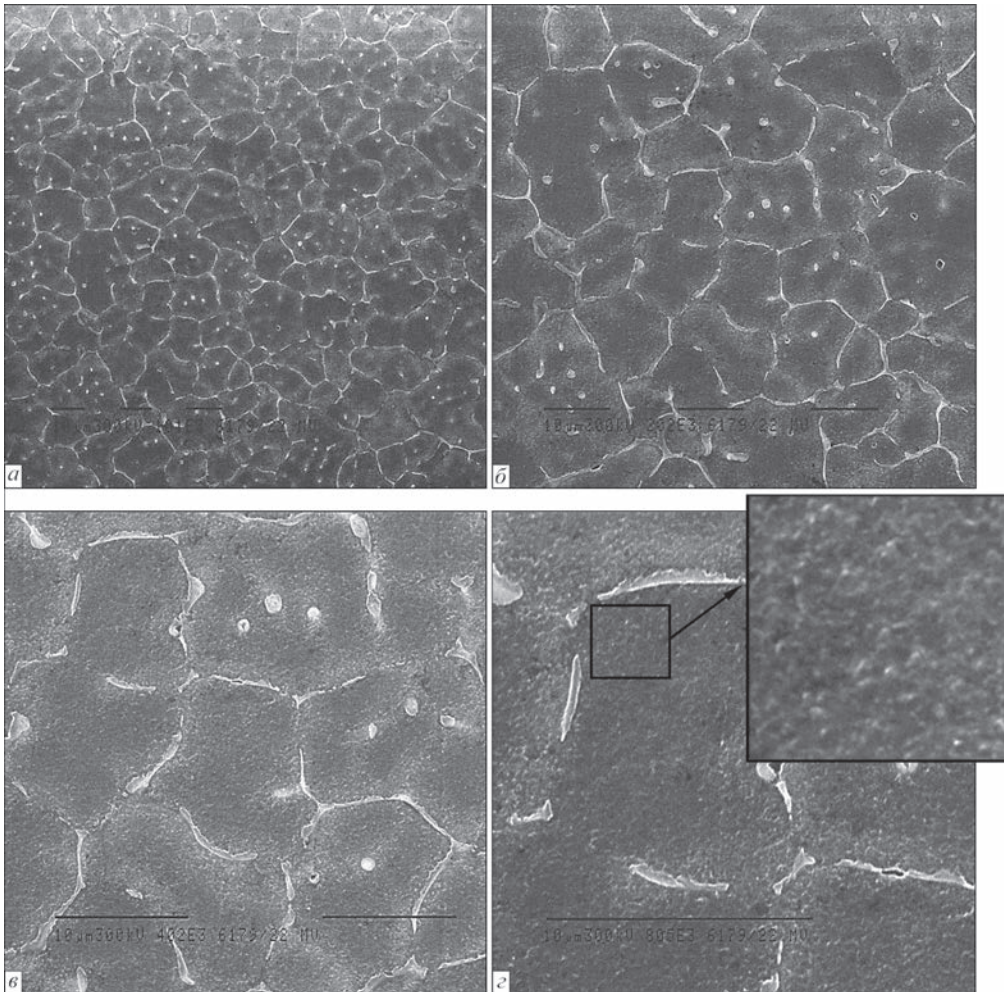


Рис. 1. Структура металу зварного з'єднання сплаву 7056-Т351: а — $\times 1010$; б — $\times 2020$; в — $\times 4040$; з — $\times 8080$

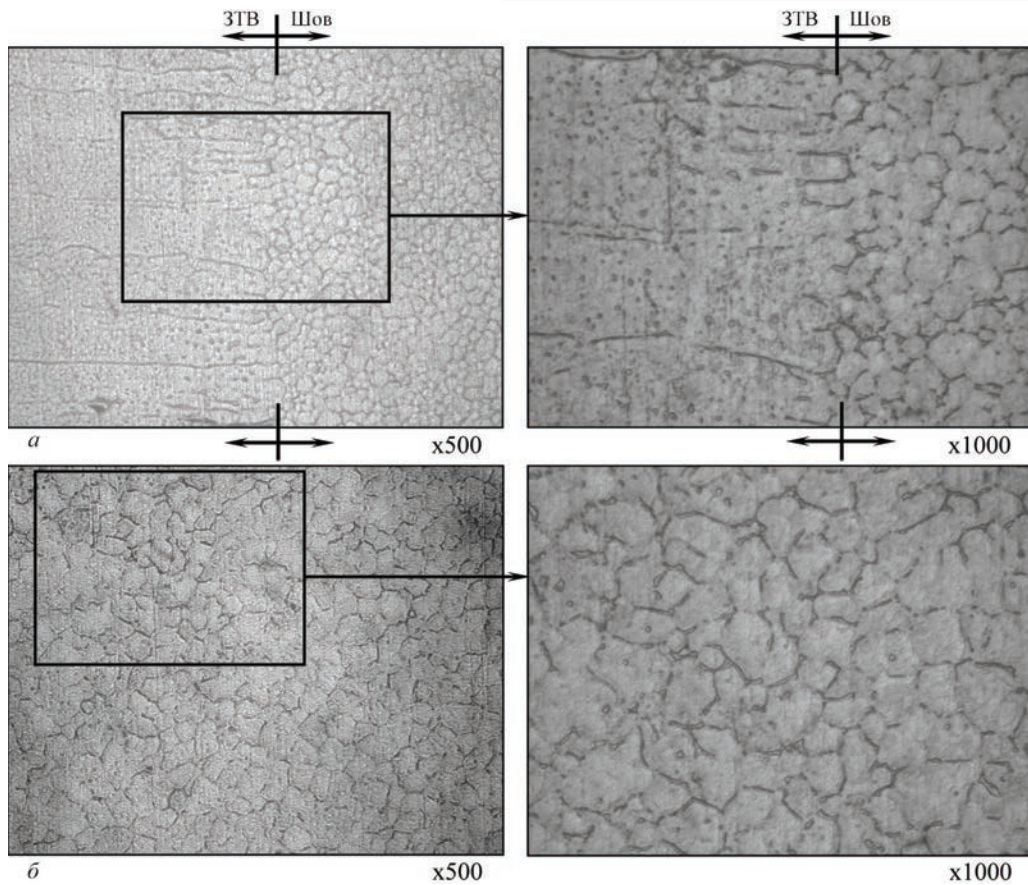


Рис. 2. Мікроструктура характерних ділянок з'єднання сплаву 7056-Т351 в зоні сплавлення (а) та в металі шва (б)

Для основного металу сплаву характерна структура з розміром зерна 6...10 мкм при рівномірній спрямованості вздовж смугастої структури (шириною до 15 мкм), що формується за умов спрямованого деформування (прокат). При цьому в основному металі спостерігається формування також більш дрібнозернистої структури. Таким чином, при ЕПЗ в металі шва, лінії сплавлення та ЗТВ зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 7056-Т351 формується рівномірна структура при значному диспергуванні як зеренної структури, так і фазових утворень; пори та тріщини відсутні (рис. 2). При зварюванні на невідпрацьованих режимах можуть виникати суттєві технологічні проблеми, пов'язані з його підвищеною схильністю до утворення кристалізаційних тріщин в шві та частковим оплавленням зерен основного металу. Всі ці дефекти обумовлені структурними та фазовими перетвореннями, що протікають під дією термічного циклу при зварюванні.

Ступінь знеміцнення металу в зоні зварювання оцінювали за результатами вимірювання його твердості за ГОСТ 9013-59 на приладі Роквелл сталюю кулькою діаметром 1/16" і навантаженні 600 Н. На рис. 3 представлено розподіл твердості в зварному з'єднанні сплаву 7056-Т351. Твердість основного металу сплаву AA7056-Т351 знаходиться на рівні HRB 108...109. В зварному з'єднанні ширина зони розміщення становить 15 мм, твердість металу шва HRB 105...110.

Зважаючи на малий розмір шва було проведено додаткові виміри мікротвердості за Вікерсом у відповідності до ГОСТ 2999-75. Показники мікротвердості металу шва на 13 % нижчі від основного металу, в той час в зоні сплавлення мікротвердість вища на 9...13 %. Узагальнені результати вимірів мікротвердості приведені в табл. 1.

Характер розподілення та рівні залишкових напружень, зумовлених процесом зварювання в зразках, визначали руйнівним методом розвантаження з використанням тензометричних давачів опору і приладу ИСД-3 [7], а також неруйнівним ультразвуковим методом за допомогою приладу УПКН [8].

Виміри залишкових напружень з'єднань свідчать, що їх максимальні значення досягають свого максимуму у поздовжньому напрямку до шва,

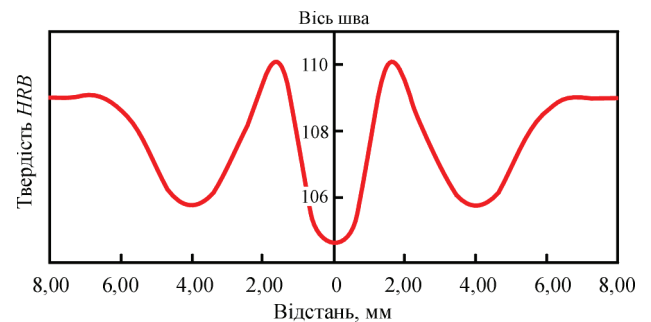


Рис. 3. Твердість металу в зварному з'єднанні сплаву 7056-Т351

Таблиця 1. Мікротвердість сплаву 7056-T351 по зонах з'єднання

Зона з'єднання	Шов	Лінія сплавлення		ЗТВ	Основний метал
		Шов	ЗТВ		
HV, МПа	1360	1600...1870	1690...1760	1700	1560

Таблиця 2. Механічні властивості основного металу та зварних з'єднань сплаву 7056-T351*

Властивості	Основний метал	ЕПЗ
Умовна межа текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	540...560	-
Межа міцності σ_b , МПа	610...625	412...426
Відносне видовження δ_5 , %	14...16	2...5

*T351 — термічнозміцнений стан, який складається з загартування, регламентованого деформування та природного старіння.

а у поперечному майже у двічі менші. При цьому у центрі зразка діють максимальні залишкові напруження розтягу. На рис. 4 наведені епюри залишкових напружень, отримані ультразвуковим методом, в зварній пластині ($\delta = 12$ мм) сплаву 7056-T351 розміром 500×240 мм. За рахунок меншого температурного вкладу максимальне значення поздовжніх (σ_x) залишкових напружень становлять лише 90...95 МПа, а поперечних (σ_y) — 40...45 МПа.

Механічні випробування зразків проводили на універсальному сервогідролічному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 кН у відповідності до прийнятих державних стандартів. З листів основного металу сплаву AA7056-T351 товщиною 12 та 30 мм виготовля-

лися циліндричні зразки III-го типу діаметром 8 та 10 мм відповідно до ГОСТ 1497-84 для визначення основних механічних характеристик. З отриманих зварних пластин листового прокату згідно ГОСТ 6996-66 виготовляли пропорційні зразки (з поперечним перерізом 6×28 мм і довжиною 270 мм) для визначення межі міцності при одновісному розтягуванні. Середнє значення межі міцності для серії зразків склало 412...426 МПа, що становить близько 70 % від відповідних показників для основного матеріалу (табл. 2).

Для досліджень опору втомі з'єднань сплаву 7056-T351, із пластин розмірами 500×250×30, з центральним швом довжиною 500 мм вирізались плоскі зразки перерізом 30×6 мм із швом по центру зразка. Для випробувань на втому застосовували зразки корсетного типу розмірами 250×30 мм (у робочій зоні 20 мм) у відповідності до ГОСТ 25.502-79. Випробування проводили в умовах циклічного одновісного розтягу із частотою 8 Гц при значенні коефіцієнту асиметрії напружень 0,1 та 0,4. За результатами проведених втомних випробувань для кожної серії зразків на основі встановлених значень границь обмеженої витривалості будували відповідні криві втоми — лінії регресії в координатах $2\sigma_a - \lg N$. Криві втоми будували для багатоциклової області довговічності $10^4 \dots 2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень.

Обмежена границя витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ з'єднань при асиметрії циклу навантажень 0,1 і 0,4, становить 150 і 110 МПа відповідно, що складає близько 70 % відповідних показників основного металу (рис. 5). Нахил кривих втоми, отриманих при асиметрії циклу навантажень 0,1 і 0,4 в подвійній логарифмічній системі координат для з'єднань становить $m_{0,1} = 5,36$ і $m_{0,4} = 6,99$, в той час як для основного металу цей показник становить $m_{0,1} = 6,92$ і $m_{0,4} = 8,5$, відповідно. При цьому довговічність зразків на стадії розповсюдження тріщини втоми до повного руйнування значно менша, ніж довговічність стадії до зародження тріщини, що пояснюється низькою пластичністю металу зварного шва та ЗТВ.

Отримані результати свідчать про перспективність використання електронно-променевого зварювання для отримання якісних з'єднань високоміцного алюмінієвого сплаву 7056-T351 з підвищеним вмістом цинку.

Висновки

1. Досліджено фізико-механічні властивості зварних з'єднань високоміцного термічнозміцненого

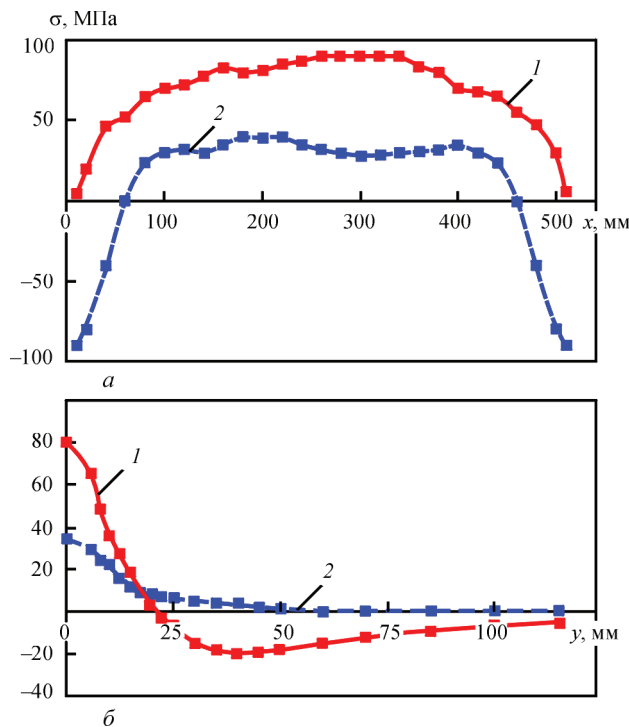


Рис. 4. Розподіл максимальних поздовжніх та поперечних залишкових напружень вздовж шва (а) та перпендикулярно шву (б) зварного з'єднання сплаву 7056-T351 товщиною 12 мм: 1 — σ_x ; 2 — σ_y

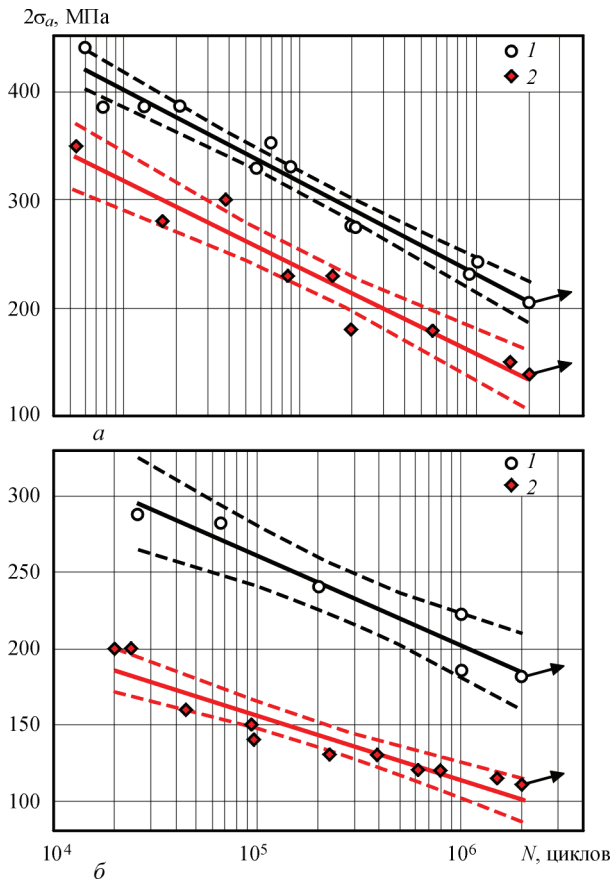


Рис. 5. Криві втоми та відповідна 95 % область розсіяння даних зразків основного металу і зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 7056-T351 товщиною 6 мм при асиметрії циклу напружень 0,1 (а) та 0,4 (б): 1 — основний метал; 2 — зварні з'єднання

алюмінієвого сплаву 7056-T351 ($\delta = 12$ і 30 мм) з підвищеним вмістом цинку ($8,7 \dots 9,8$ %), отриманих за відпрацьованою технологією ЕПЗ. Встановлено, що межа міцності таких з'єднань складає близько 70 % від відповідних показників основного металу ($\sigma_{\text{в.ом}} = 620$ МПа).

2. Максимальні значення залишкових поздовжніх напружень в зварній пластині розміром $500 \times 240 \times 30$ мм, отриманій технологією ЕПЗ, складають $90 \dots 95$ МПа, а поперечних — $40 \dots 45$ МПа.

3. Встановлено, що обмежена межа витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ з'єднань, виконаних ЕПЗ, при асиметрії циклу навантажень 0,1 і 0,4, становить 150 і 110 МПа, відповідно, що складає близько 70 % відповідних показників основного металу.

4. При ЕПЗ в металі зварних швів, лінії сплавлення та ЗТВ формується бездефектна рівномірна структура при диспергуванні зеренної струк-

тури та фазових утворень, що забезпечує високий рівень міцності та довговічність зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 7056-T351.

Список літератури

1. Ищенко А. Я. (2003) Алюминиевые высокопрочные сплавы для сварных конструкций. *Прогресивні матеріали і технології*, 1, сс. 50–82.
2. Гуреева М. А., Грушко О. Е., Овчинников В. В. (2008) Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств. *ВИАМ/2008-205182*, 10, 51–82.
3. Фридляндер И. Н., Сандлер В. Г., Грушко О. Е., Берсенов В. В. и др. (2002) Алюминиевые сплавы – перспективный материал в автомобилестроении. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 9, 3–9.
4. Martin K., Růžek R., Nováková L. (2015) Mechanical behaviour of AA7475 friction stir welds with the kissing bond defect. *International Journal of Fatigue*, 74, 5, 7–19.
5. Eibla M., Sonsinob С.М., Kaufmannb Н., Zhanga G. (2003) Fatigue assessment of laser welded thin sheet aluminium. *Ibid*, 25, 8, 719–731.
6. Нестеренков В. М., Кравчук Л. А., Архангельский Ю. А., Орса Ю. В. (2017) Формирование сварных соединений магниевых сплавов при импульсной многопроходной электронно-лучевой сварке. *Автоматическая сварка*, 4, 38–42.
7. Касаткин Б. С., Кудрин А. Б., Лобанов Л. М. и др. (1981) *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений*. Киев, Наукова думка.
8. Гуца О. И. Смиленко В. Н., Кот В. Г. и др. (2009) Контроль напряжений на основе использования подповерхностных акустических волн. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 11–13.

References

1. Ishchenko, A.Ya. (2003) Aluminium high-strength alloys for welded structures. *Progresywni Materialy i Tekhnologii*, 1, 50-82 [in Russian].
2. Gureeva, M.A., Grushko, O.E., Ovchinnikov, V.V. (2008) *Welded aluminium alloys in structures of transport vehicles*. VIAM/2008-205182, 10, 51-82 [in Russian].
3. Fridlyander, I.N., Sandler, V.G., Grushko, O.E., Bersenov, V.V. et al. (2002) Aluminium alloys as a perspective material in automobile industry. *Metallvedenie i Termich. Obrab. Metallov*, 9, 3-9 [in Russian].
4. Martin, K., Ruzek, R., Novakova, L. (2015) Mechanical behaviour of AA7475 friction stir welds with the kissing bond defect. *Int. J. of Fatigue*, 74(5), 7-19.
5. Eibla, M., Sonsinob, C.M., Kaufmann, H., Zhanga, G. (2003) Fatigue assessment of laser welded thin sheet aluminium. *Ibid.*, 25(8), 719-731.
6. Nesterenkov, V.M., Kravchuk, L.A., Arkhangelsky, Yu.A., Orsa, Yu.V. (2017) Formation of welded joints of magnesium alloys in pulse multipass electron beam welding. *The Paton Welding J.*, 4, 35-38.
7. Kasatkin, B.S., Kudrin, A.B., Lobanov, L.M. et al. (1981) *Experimental methods of investigation of strains and stresses*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
8. Gushcha, O.I., Smilenko, V.N., Kot, V.G., Brodovoj, V.A., Klochkov, I.N. (2009) Control of stresses based on application of subsurface acoustic waves. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 11-13.

ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОГО СПЛАВА AA7056-T351, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

И. Н. КЛОЧКОВ, В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, Е. Н. БЕРДНИКОВА, С. И. МОТРУНИЧ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Использование современных алюминиевых сплавов при проектировании элементов и конструкций авиа- и ракетостроения, морских судов и наземного транспорта обеспечивает высокие показатели их прочности и долговечности. Новейшие технологические процессы сварки позволяют уменьшить массу конструкции и соответственно снизить эксплуатационные расходы, обеспечивая необходимые показатели прочности и долговечности. При этом получение качественных сварных соединений термически упрочненных алюминиевых сплавов является актуальной научно-технической задачей. Использование технологий сварки с низким температурным вкладом, таких как электронно-лучевая сварка по сравнению с традиционными способами сварки является перспективным для авиационной и ракетостроительной промышленности. Цель данной работы исследовать уровень разупрочнения, структурные особенности, величину остаточных послесварочных напряжений, механические свойства и закономерности сопротивления усталости соединений термически упрочненного алюминиевого сплава AA7056-T351 с повышенным содержанием цинка, полученных электронно-лучевой сваркой. Библиогр. 8, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: сварные соединения, сопротивление усталости, остаточные напряжения, алюминиевый сплав, электронно-лучевая сварка

STRENGTH AND FATIGUE LIFE OF JOINTS OF HIGH-STRENGTH ALLOY AA7056-T351, MADE BY ELECTRON BEAM WELDING

I.M. KLOCHKOV, V.M. NESTERENKOV, O.M. BERDNIKOVA, S.I. MOTRUNICH

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Application of modern aluminium alloys when designing elements and structures for aircraft and rocket construction, sea vessels and ground transportation, is ensured by high values of their strength and ductility. New welding technologies allow reducing the structure weight and lowering the operating costs, respectively, while providing the required values of strength and fatigue life. Here, producing sound welded joints of heat-treatable aluminium alloys is an urgent science and technology problem. Application of welding technologies with a small temperature contribution, such as electron beam welding, compared to traditional welding processes, is promising for aircraft and rocket construction. The objective of this work is studying the level of softening, structural features, magnitude of residual postweld stresses, mechanical properties and regularities of fatigue resistance of joints of heat-hardenable aluminium alloy AA7056-T351 with higher zinc content, produced by electron beam welding. 8 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: welded joints, fatigue resistance, residual stresses, aluminium alloy, electron beam

Надійшла до редакції 04.10.2018

Новая книга

Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 642 с.

Сборник включает 86 статей и докладов сотрудников отдела физики газового разряда и техники плазмы Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 1978–2018 гг. В нем обобщен сорокалетний опыт научно-исследовательской деятельности отдела в области теоретического исследования и компьютерного моделирования физических явлений, протекающих при дугowych, плазменных, лазерных и гибридных процессах сварки, наплавки и напыления покрытий. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами дуговой, плазменной, лазерной и гибридной сварки и обработки материалов, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы сварочных и родственных процессов.

Сборник можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».

