

ВПЛИВ ТЕРМООБРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СПЛАВУ В1341 В УМОВАХ, ЩО МОДЕЛЮЮТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ

Л.І. Ниркова, Т.М. Лабур, С.О. Осадчук, М.Р. Яворська, В.А. Коваль

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

В роботі представлено результати порівняльних досліджень корозійно-механічної тривкості зварних з'єднань сплаву В1341 товщиною 1,2 мм, отриманих ручним аргнодуговим зварюванням вільною та стиснутою дугою, після різних видів термічного оброблення (ТО) – штучного старіння та повного циклу термооброблення (гартування та штучне старіння). Показано, що штучне старіння підвищує характеристики міцності зварних з'єднань: отриманих вільною дугою – на ~23 % порівняно з основним металом, стиснутою дугою – на ~29 %, але знижує відносне подовження на ~82 % і на ~84 %, а коефіцієнт міцності – до 0,77 й до 0,71 (0,81 та 0,83 у стані після зварювання), відповідно. Повний цикл ТО забезпечує підвищення як міцності, так і пластичності. Після штучного старіння, а також після повного циклу термооброблення різниці потенціалів між основним металом та зоною термічного впливу не перевищує допустиме значення, 0,05 В (згідно з ГОСТ 9.005), що при експлуатації в неагресивних середовищах не представлятиме небезпеку. Штучне старіння і повний цикл ТО не погіршує стійкість зварних з'єднань сплаву В1341Т проти розшаровуючої корозії порівняно із станом після зварювання, яка оцінена балом 2. Продемонстровано підвищення опірності міжкристалітній корозії (МКК) після штучного старіння, максимальна глибина якої становила 0,301 мм для з'єднання, отриманого вільною дугою, і 0,233 мм – стиснутою дугою (у стані після зварювання – 0,350 та 0,47 мм). Після повного циклу ТО глибина МКК складала 0,287 та 0,345 мм, відповідно. Штучне старіння знижує корозійно-механічну тривкість зварних з'єднань, отриманих вільною та стиснутою дугою: час руйнування зразків становив 9 та 12 діб, відповідно (порівняно із станом після зварювання – 45 діб), але після повного циклу ТО максимальний час руйнування зварних з'єднань підвищився до 54 і 31 діб, відповідно. Вищу корозійно-механічну тривкість після повного циклу термооброблення мали зварні з'єднання, отримані стиснутою дугою. Бібліогр. 14, табл. 5, рис. 7.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, зварні з'єднання, отримані вільною та стиснутою дугою, механічні властивості, структура, міжкристалітна корозія, розшаровуюча корозія, корозія при постійній деформації, потенціометрія, вольтамперометрія.

Алюмінієві сплави системи легування Al–Mg–Si–Cu поєднують широкий комплекс властивостей: високу технологічність, міцність, зварюваність та корозійну тривкість [1, 2]. Тонколистовий сплав В1341 з цієї групи широко застосовується для виготовлення балонів різних конструкцій для зберігання рідких речовин [3]. Під час виготовлення таких емкостей їх окремі елементи з'єднуються з ручним аргнодуговим зварюванням неплавким електродом вільною або стиснутою дугою [1, 2, 4]. Однак процес зварювання вільною дугою відбувається за умови її низької проплавляючої здатності при формуванні шва [2]. Застосування зварювання стиснутою дугою покращує форму шва та сприяє зменшенню втрати міцності з'єднання після зварювання [1]. Оскільки термічний цикл зварювання неплавким електродом викликає зниження міцності зварного з'єднання, перед експлуатацією виробів виконують їх термічне оброблення.

Дослідженню впливу операцій термооброблення на зміну властивостей алюмінієвих спла-

вів присвячено багато досліджень, але вони переважно вивчають поведінку основного металу [5, 6]. Оскільки стан металу після зварювання для кожної товщини напівфабрикату є унікальним за структурою матеріалу, а в літературі таких даних недостатньо, метою даної роботи було встановлення впливу різних режимів термооброблення на комплекс експлуатаційних властивостей зварних з'єднань тонколистового алюмінієвого сплаву В1341Т ($\delta = 1,2$ мм), отриманих аргнодуговим зварюванням вільною та стиснутою дугою.

Ця стаття є продовженням серії експериментальних досліджень, результати яких викладені у роботах [7–10].

Методика експериментів. Дослідження проводили на зварних з'єднаннях алюмінієвого сплаву марки В1341 такого хімічного складу (спектральний аналіз виконано на спектрометрі ДФС-36), мас. %: Al – основа, (0,45...0,9) Mg, (0,5...1,2) Si, (0,15...0,35) Mn, (0,1...0,5) Cu, (0,05...0,1) Ca, 0,25 Cr, 0,2 Zn, 0,15 Ti, 0,5 Fe, інші елементи не більше 0,1. Для зварювання сплаву застосовували

Ниркова Л.І. – <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>, Лабур Т.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>, Осадчук С.О. – <https://orcid.org/0000-0001-9559-0151>, Яворська М.Р. – <https://orcid.org/0000-0003-2016-6289>, Коваль В.А. <https://orcid.org/0000-0001-5154-1446>

© Л.І. Ниркова, Т.М. Лабур, С.О. Осадчук, М.Р. Яворська, В.А. Коваль, 2021

дріт марки Св2117 діаметром 2 мм. Технологічні аспекти зварювання детально обговорено у попередніх роботах [7–9, 8, 9]. В даній роботі досліджували зварні з'єднання, зварені вздовж напрямку прокату. Схема проведення досліджень з'єднань та застосовані режими їх термооброблення представлені на рис. 1.

Особливості структурних перетворень у зварних з'єднань, отриманих вільною та стиснутою дугою, вивчали на металографічних шліфах, вирізаних перпендикулярно до осі швів. Шліфи готували за стандартною методикою, а мікроструктуру виявляли електролітичним травленням у розчині складу: 930 мл CH_3COOH + 70 мл HClO_4 .

Електрохімічні дослідження проводили у розчині 3%-го NaCl методами потенціометрії та вольтамперометрії, застосовуючи потенціостат ПИ-50-1.1 та програматор Пр-8. Характер розподілу потенціалів по поверхні зварного з'єднання вивчали методом вимірювання потенціалу під краплею за методикою ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Для отримання поляризаційних кривих використовували притиску електрохімічну комірку. Робочим електродом слугували окремі зони зварного з'єднання, електродом порівняння – насичений хлорид-срібний електрод ЭВЛ-1М1, допоміжним – платиновий електрод. Швидкість розгортки потенціалу в потенціодинамічному режимі становила $5 \cdot 10^{-4}$ В/с. Перед зняттям поляризаційних

кривих поверхню зразків готували за стандартною методикою.

Опірність міжкристалітній (МКК), розшаровуючій корозії та корозійному розтріскуванню оцінювали відповідно до вимог ГОСТ 9.021 [11], ГОСТ 9.904 [12], ГОСТ 9.019 [13]. Випробування на корозійне розтріскування проводили за умови постійного осьового розтягуючого напруження в металі на рівні 160 МПа при повному зануренні зразків зварних з'єднань у розчин 3 % NaCl на установці «Сигнал» впродовж не менше ніж 45 діб. Зварний шов був розташований перпендикулярно напрямку дії напруження розтягу.

Результати та їх обговорення.

Макро- та мікроструктура зварних з'єднань. На рис. 2 і 3 представлено макро- та мікроструктури основного металу сплаву В1341Т та його зварних з'єднань, отриманих в залежності від способу зварювання та виду застосованого термооброблення. Коефіцієнт форми шва зварного з'єднання, отриманого стиснутою дугою, приблизно на 4 % більше, порівняно зі зварним з'єднанням, отриманим вільною дугою (2,52 та 2,43, відповідно) [9].

При аналізі мікроструктури зварних з'єднань сплаву В1341Т в стані природного старіння було встановлено, що в умовах дії термічного циклу зварювання незалежно від виду дуги відбувається розпад пересиченого твердого розчину та розчинення зміцнюючих фаз. Кристалізація розплавлення металу швів при охолодженні супроводжується виділенням вторинних фаз та коагуляцією нерозчинних фаз (рис. 3, а). Це зумовлено значною кількістю основних легуючих елементів і домішок, які входять до складу сплаву [3]. Згідно з діаграмою стану системи Al-Mg-Si-Cu-Fe в рівновазі з твердим розчином у сплаві можуть знаходитися подвійні фази: Mg_2Si , SiCuAl_2 , FeAl_3 , Mg_5Al_8 , а також потрійні фази CuFeAl_5 , CuMgAl_2 , FeSiAl_5 , FeMg_3Si_6 . В процесі кристалізації швів вони утворюють таку ж кількість

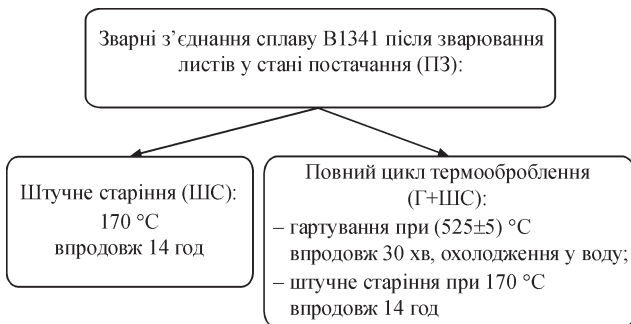


Рис. 1. Схема проведення досліджень з'єднань сплаву В1341Т та застосовані режими їх термічного оброблення

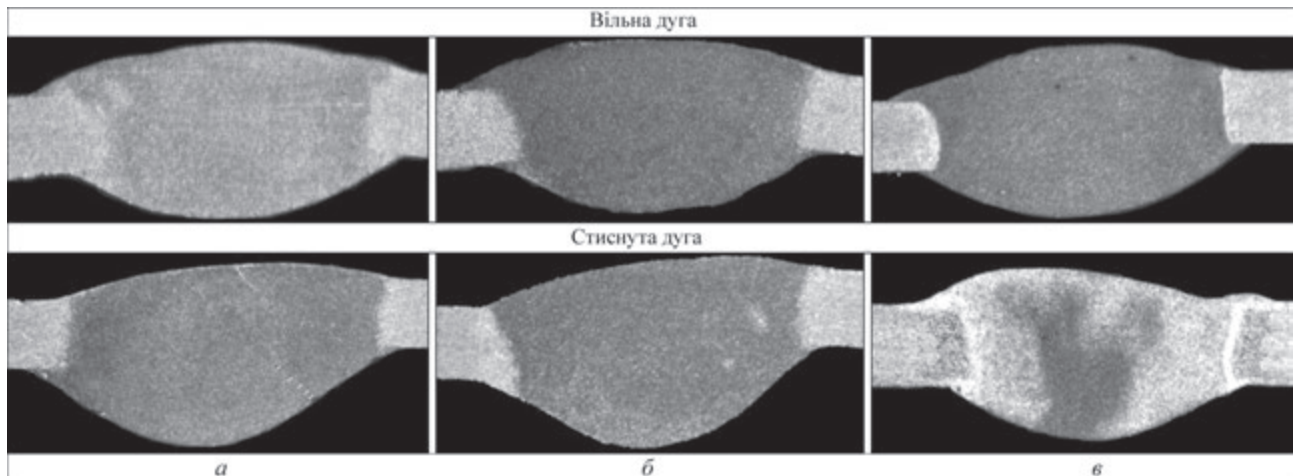


Рис. 2. Макрошліфи зварних з'єднань сплаву В1341, отриманих вільною та стиснутою дугою, у різних станах: а – у стані після зварювання; б – після штучного старіння; в – після повного циклу термооброблення

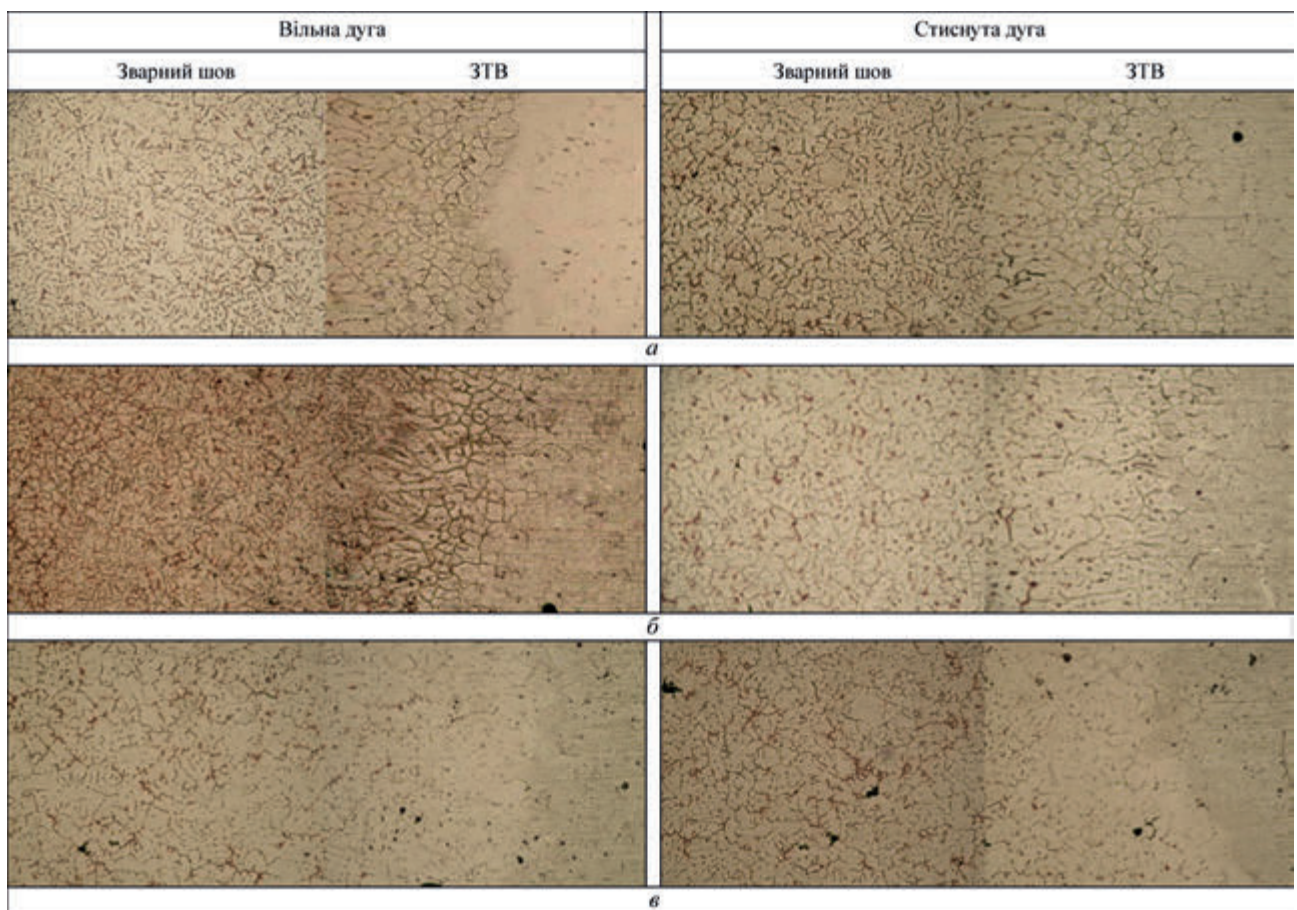


Рис. 3. Мікроструктура ($\times 320$) зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих стиснутою та вільною дугою, у різних станах: *а* – у стані після зварювання; *б* – після штучного старіння; *в* – після повного циклу термооброблення

метастабільних фаз, які розташовані рівномірно, але відрізняються формою та геометричними розмірами. Характерною їх ознакою є нестабільність розпаду в межах одного зерна [3]. Граничні ділянки кристалітів при цьому збагачуються легуючими елементами, а об'єм – збіднюється, а вздовж границь утворюються тонкі евтектичні прошарки.

Мікроструктура зони сплавлення шва з основним металом має оплавлені границі зерен, які утворилися за умов дії зварювального нагрівання. В результаті контактного плавлення зерен між собою або з евтектичною фазою Mg_2Si , яка розташована вздовж границь зерен, відбувається їх потовщення. Швидке відведення дуги, кристалізація металу та формування швів викликають біля границі сплавлення шва з основним металом утворення стовбчастих кристалів, які зорієнтовані перпендикулярно напрямку вектора переміщення дуги (рис. 3, *б*). З боку основного металу в зоні сплавлення при цьому відбувається розпад пересиченого твердого розчину та одночасне розчинення раніше утворених зміцнюючих фаз і виділення вторинних фаз. Також відбувається коагуляція нерозчинних інтерметалідних фаз заліза та кремнію, які потрапляють в метал на етапі металургійного виробництва сплаву та можуть викликати збільшення напруження в структурі [1].

На ділянці ЗТВ з'єднань сплаву В1341Т спостерігається зростання розмірів зерна та коагуляція включень нерозчинних фаз, повне або часткове зниження ефекту зміцнення після природного старіння, а також локальний відпал і гартування окремих структурних складових ділянок (рис. 3, *в*). Взаємодія приграничних включень інтерметалідів з твердим розчином при цьому викликає утворення вздовж границь зерен ділянок з рідкими прошарками легкоплавких евтектик. Це зумовлено особливостями структурних і фазових перетворень у металі під дією термічного циклу зварювання дугою.

Проведення операції штучного старіння зразків з'єднань викликає зростання об'ємної доли вторинних фаз та їх щільності в структурі швів (рис. 3, *а, б*). Процес супроводжується потовщенням границь зерен внаслідок їх контактного сплавлення між собою або з евтектичною фазою Mg_2Si , розташованою біля границь зерен. Зазначені трансформації мікроструктури відбуваються як результат розпаду твердого розчину, дисперсного твердіння фаз, що підвищує міцність металу зварних з'єднань (табл. 1).

Виконання повного циклу термічної обробки з'єднань (гартування та штучного старіння) призводить до зміни розмірів зерен, ширини прошарків між ними, наявності в структурі вторинних

Таблиця 1. Механічні властивості основного металу та зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною та стиснутою дугою, після термооброблення за різними режимами

Стан зразків	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	α , град.	Коефіцієнт міцності ЗЗ	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	α , град.	Коефіцієнт міцності ЗЗ
	Зварне з'єднання, отримане вільною дугою					Зварне з'єднання, отримане стиснутою дугою				
Після зварювання (ПЗ)	<u>195,0</u> 250,5	<u>130,1</u> 187,6	<u>2,6</u> 18,9	<u>56</u> 180	0,83	<u>200,3</u> 250,5	<u>144,3</u> 187,6	<u>1,7</u> 18,9	<u>66</u> 180	0,81
Після штучного старіння (ШС)	<u>257,6</u> 335,7	<u>215,5</u> 313,3	<u>1,9</u> 10,7	<u>30</u> 180		0,76	<u>258,7</u> 335,7	<u>204,0</u> 313,3	<u>1,7</u> 10,7	
Після гартування та штучного старіння (Г + ШС)	<u>241,5</u> 321,1	<u>288,6</u> 282,0	<u>6,9</u> 10,7	<u>35</u> 158	0,75	<u>323,0</u> 321,1	<u>294,3</u> 282,0	<u>3,3</u> 10,7	<u>43</u> 158	1,00
Примітка. Значення показників зварних з'єднань у відповідному стані подані в чисельнику, основного металу – в знаменнику.										

фазових включень тощо (рис. 3, а). Виділення додаткових вторинних фазових включень та рівномірний характер їх розподілу по всьому об'єму швів позитивно проявляється на механічних властивостях зварних з'єднань (табл. 1). На границі сплавлення шва з основним металом відмічається утворення більш тонких границь структурних складових (рис. 3, в). Їх пов'язують з наявністю в сплаві незначних добавок міді (0,3 %), що за даними роботи [3] обмежує швидкість виділення зон Гіньє-Престона, які знаходяться в метастабільній рівновазі з твердим розчином. Морфологія фазових виділень з матриці має однорідний характер, а розміри фаз дисперсні. Це визначає швидка фіксація структурних складових при гартуванні зразків з'єднань у воді. Проведення вслід гартування операції штучного старіння дозволяє зберегти морфологію розташування структурних складових, форму та дисперсні розміри фазових включень. На окремих ділянках відмічається потовщення границь кристалітів швів та зерен основного металу в зоні сплавлення з основним металом. Загальна їх товщина менша, ніж в структурі зварних з'єднань після штучного старіння (рис. 3).

Як було зазначено вище, структурні трансформації, які відбуваються у сплаві В1341Т під час зварювання вільною та стиснутою дугою та подальшого термооброблення зварних з'єднань, впливають на показники їх механічних властивостей (табл. 1). Згідно отриманих даних, міцність з'єднань, зварених вільною або стиснутою дугою, дорівнює 195,0 та 200,3 МПа, що на 22 та 20 % менше ніж міцність основного металу. Коефіцієнти міцності з'єднань, відповідно, становить 0,83 та 0,81. Межа плинності зварних зразків порівняно з основним металом також зменшується на 30 та 23 % (табл. 1). Відзначимо, що технологія зварювання сильніше впливає на рівень показників пластичності, а саме: відносне подовження та кут згину знижуються на 86 та 91 %, на 70 та 63 %, відповідно.

Після штучного старіння характеристики міцності зварних з'єднань зростають порівняно зі

станом після зварювання. При застосуванні вільної дуги міцність становить 257,6 МПа, що на ~23 % менше, ніж основного металу в такому ж стані, а стиснутої дуги – 258,7 МПа (на ~29 %). Водночас, спостерігається зниження коефіцієнта міцності до рівня 0,76 та 0,77. Межа плинності також зростає, однак її чисельні значення залишаються меншими порівняно з основним металом: на ~31 %, для з'єднань, отриманих вільною дугою, і на ~35 %, для з'єднань, отриманих стиснутою дугою (табл. 1). Проведення операції штучного старіння викликає подальше зниження показників пластичності (кута згину та відносного подовження), відповідно, на ~83 та ~82 %, для з'єднання, отриманого вільною дугою, і на ~74 та ~84 %, для з'єднання, отриманого стиснутою дугою (табл. 1).

Виконання операції повного циклу термооброблення викликає порівняно з основним металом зростання на 25 % міцності з'єднань, отриманих вільною дугою (до 241,5 МПа). У з'єднаннях, отриманих стиснутою дугою, міцність підвищилася до 323,0 МПа майже до рівня основного металу (321,1 МПа). Величина коефіцієнту міцності з'єднань становила 0,75 та 1,0 %, відповідно. Позитивний вплив цього режиму термооброблення спостерігали на значеннях межі плинності, яка зросла та навіть трохи перевищила рівень основного металу і становила 288,6 та 294,3 МПа для з'єднань, отриманих вільною і стиснутою дугою. Також спостерігалось підвищення рівня відносного подовження з'єднань до 6,9 та 3,3 % (табл. 1). Водночас рівень кута згину був меншим порівняно зі станом після зварювання і майже таким самим порівняно із зразками у стані після штучного старіння, 35 % (для вільної дуги) та 43 % (для стиснутої дуги).

Отже, після повного циклу ТО у зразках зварних з'єднань, отриманих стиснутою дугою, встановлено підвищення характеристик міцності до рівня основного металу що, імовірно, обумовлено зменшенням електрохімічної гетерогенності структури з'єднань внаслідок утворення дрібнозернистої структури та зменшенню ширини зони

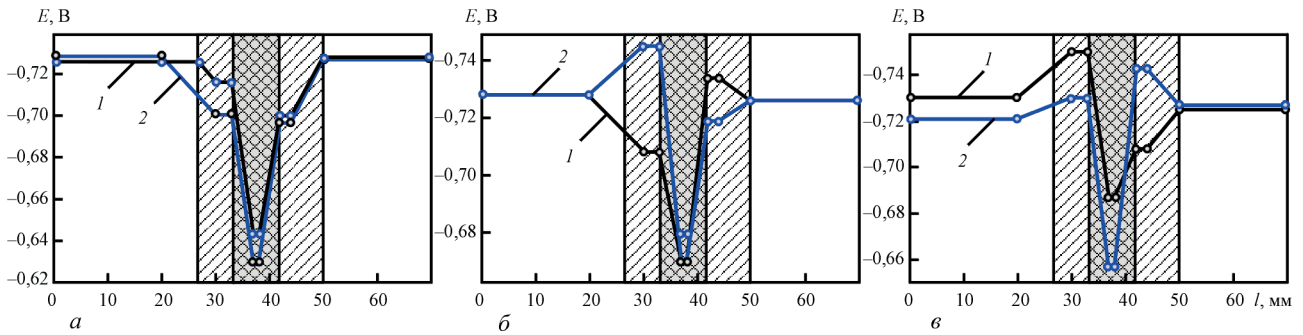


Рис. 4. Характер розподілу електрохімічних потенціалів під краплею у різних зонах зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною (1) та стиснутою (2) дугою, а також у різних станах: а – після зварювання; б – після штучного старіння; в – після повного циклу термооброблення

Таблиця 2. Різниця потенціалів між зонами зварного з'єднання сплаву В1341Т у різних станах

Різниця потенціалів між зонами зварного з'єднання, В	Стан зварного з'єднання					
	Вільна дуга			Стиснута дуга		
	ПЗ	ШС	Г+ШС	ПЗ	ШС	Г+ШС
Основний метал – зварний шов	0,099	0,042	0,041	0,117	0,066	0,044
Основний метал – зона термічного впливу	0,030	0,015	0,010	0,068	0,013	0,032

термічного впливу під дією більш концентрованої енергії дуги завдяки її стисканню аргонем [1].

Електрохімічні дослідження. Вимірювання потенціалів корозії у досліджуваних зразках показало, що різниця потенціалів між основним металом та зварним швом для зварних з'єднань у стані постачання становить $\sim 0,099$ В (вільна дуга) та $\sim 0,117$ В (стиснута дуга) (рис. 4, табл. 2). Обидва види термічного оброблення, застосовані після зварювання, зменшують зазначену різницю, яка після штучного старіння становила $\sim 0,042$ В (вільна дуга) та $\sim 0,066$ В (стиснута дуга), після повного циклу термооброблення – $\sim 0,041$ В (вільна дуга) та $\sim 0,044$ В (стиснута дуга). Різниця потенціалів між основним металом та ЗТВ для зварних з'єднань у стані постачання була меншою порівняно зі зварним швом та дорівнювала $\sim 0,030$ В (вільна дуга) та $\sim 0,068$ В (стиснута дуга). Після виконання термооброблення зразків різниця потенціалів між основним металом та ЗТВ ще зменшилася, а саме, після штучного старіння вона становила $\sim 0,015$ В (вільна дуга) та $\sim 0,013$ В (стиснута дуга), а після повного ци-

клу термооброблення – $\sim 0,010$ В (вільна дуга) та $\sim 0,032$ В (стиснута дуга).

Таким чином, операції термооброблення зразків зменшують різницю потенціалів між основним металом та зоною термічного впливу до допустимих значень, крім з'єднань, зварених вільною дугою, у стані після штучного старіння. Різниця потенціалів між основним металом та зоною термічного впливу після обох застосованих видів термооброблення не перевищувала допустимий рівень (0,05 В) згідно з ГОСТ 9.005 [14].

Поляризаційні криві основного металу та зварного шва з'єднань, отриманих вільною та стиснутою дугою, у різних станах представлені на рис. 5. З їх аналізу встановлено, що струм анодного розчинення (за потенціалу $-0,6$ В) на зварному шві зразків обох зварних з'єднань у стані після зварювання (рис. 5, криві 2, 3) більше, ніж на основному металі: $1,07$ А/м² (вільна дуга), $3,37$ А/м² (стиснута дуга) та $0,03$ А/м² – основний метал (табл. 3).

Термооброблення за режимом штучного старіння зменшує анодні струми на зварному шві, які становили, відповідно, $1,09$, $1,09$ та $0,015$ А/м² (табл. 3).

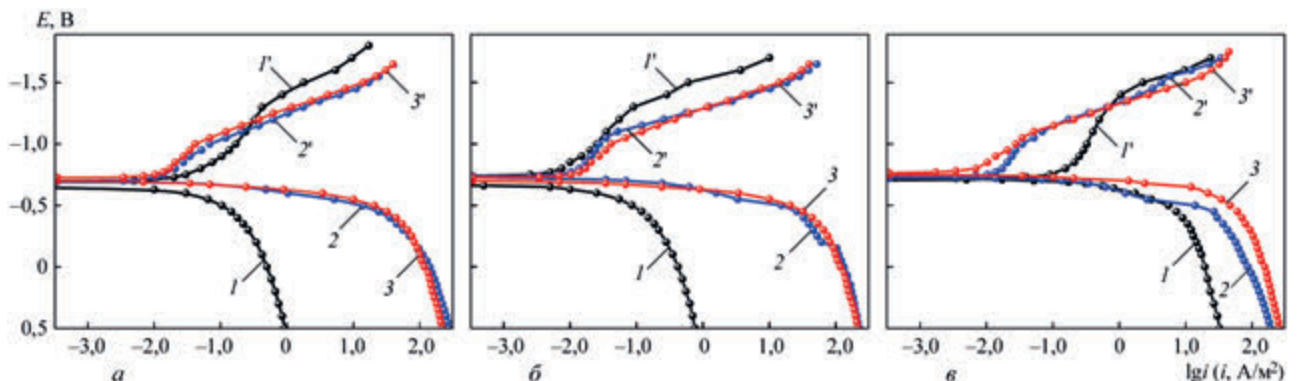


Рис. 5. Анодні (1, 2, 3) та катодні (1', 2', 3') поляризаційні криві основного металу (1, 1') та зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною дугою (2, 2') та стиснутою дугою (3, 3') у різних станах: а – після зварювання; б – після штучного старіння; в – після гартування та штучного старіння

Таблиця 3. Електрохімічні характеристики основного металу та шва зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною та стиснутою дугою, у розчині 3 % NaCl

Характеристика зразка	Стан зразка	E_{cor} , В	i_a , А/м ²	i_c , А/м ²	E_{H_2} , В
ОМ	У стані постачання (природного старіння)	-0,728	0,03	2,95	-1,38
	ШС	-0,724	0,015	0,026	-1,32
	Г+ШС	-0,715	1,79	0,33	-1,42
ЗЗ, отримане вільною дугою	Після зварювання	-0,699	1,07	0,023	-0,99
	ШС	-0,726	1,09	0,023	-1,06
	Г+ШС	-0,729	1,80	0,026	-0,99
ЗЗ, отримане стиснутою дугою	Після зварювання	-0,708	3,37	0,016	-1,05
	ШС	-0,736	1,09	0,022	-1,0
	Г+ШС	-0,737	21,88	0,02	-1,07

Примітки. i_a – струм анодного розчинення за потенціалу -0,6 В; i_c – граничний дифузійний струм; E_{cor} – потенціал корозії; E_{H_2} – потенціал виділення водню.

Після повного циклу термооброблення різниця між струмом анодного розчинення основного металу та зварних швів струмів анодного розчинення складала 1,79 А/м² для основного металу, 1,80 та 21,88 А/м² – для з'єднань, отриманих вільною та стиснутою дугою, відповідно. Катодні криві зварних швів у стані після зварювання зміщуються в область менших струмів порівняно з основним металом (рис. 5, а). Граничний дифузійний струм на зварних швах обох досліджуваних способів з'єднання сплаву В1341Т менше (0,023 та 0,016 А/м²), ніж на основному металі (2,95 А/м²), що може вказує на гальмування катодного процесу в металі швів (табл. 3).

Після штучного старіння спостерігається незначне збільшення граничного дифузійного струму у металі зварних швів обох з'єднань порівняно із станом після зварювання (0,023 А/м² (вільна дуга), 0,022 А/м² – стиснута дуга, 0,0263 А/м² – основний метал) (рис. 5, б, криві 2', 3'). Внаслідок цього проявляється тенденція до активізації корозійного процесу в даній області на поляризаційній кривій. Повний цикл термооброблення з'єднань суттєво гальмує корозійний процес у швах, що виявляється у зменшенні значень граничного дифузійного струму до 0,026 А/м² (вільна дуга), 0,0202 А/м² (стиснута дуга) порівняно з основним металом (0,33 А/м²) (рис. 5, в, криві 2', 3') (табл. 3). Слід зауважити, що суттєвої різниці корозійної поведінки металу зварних швів у з'єднаннях, отриманих вільною та стиснутою дугою, не виявлено. Оскільки, як свідчить характер поляризаційних кривих, у водних середовищах корозія сплаву В1341Т відбувається з дифузійним контролем, то швидкість корозії можна оцінювати за значеннями граничного дифузійного струму [14].

Таким чином, встановлено, що проведення термооброблення зварних з'єднань сплаву В1341Т за режимом штучного старіння сприяє незначному підвищенню швидкості корозії, але разом з тим знижує потенціал виділення водню з металу ЗТВ обох досліджуваних способів зварювання по-

рівняно з основним металом. Виконання повного циклу термооброблення зменшує граничний дифузійний струм і потенціал виділення водню на зварних швах незалежно від способу зварювання порівняно з основним металом. Можна очікувати, що за таким режимом ТО буде зростати корозійна тривкість металу зварних з'єднань сплаву.

Тривкість проти міжкристалітної корозії (МКК). Максимальна глибина МКК основного металу у стані постачання становить 0,086 мм. Осередки міжкристалітного руйнування зварних з'єднань, отриманих вільною дугою, відмічаються в ЗТВ та розвинулися на глибину 0,350 мм (табл. 4), а стиснутою дугою – в зоні сплавлення та ЗВТ (рис. 6, а), на глибину 0,506 мм. Штучне старіння зразків з'єднань викликало незначне підвищення чутливості металу до МКК: міжкристалітні тріщини розповсюдилися в ЗТВ з'єднань, отриманих вільною дугою (рис. 6, б), на максимальну глибину 0,301 мм, а стиснутою дугою – на 0,233 мм. Після повного циклу ТО міжкристалітні тріщини утворилися як в ЗТВ, так і по зоні сплавлення обох зварних з'єднань (рис. 6, в), глибина МКК становила 0,287 та 0,345 (0,533) мм відповідно (табл. 5).

Таким чином, зварювання тонколистового сплаву В1341 товщиною 1,2 мм стиснутою дугою викликає зниження стійкості металу зварних з'єднань проти МКК, але вдало підібраний режим термооброблення може забезпечити зростання їх опірності міжкристалітному руйнуванню.

Стійкість проти розширюючої корозії. Аналіз поверхні зразків зварних з'єднань, отриманих вільною дугою (у стані після зварювання) виявив осередки відшарування діаметром майже 1 мм, сукупною площею не більше 1 %. Інших показників, які відображають зміну зовнішнього вигляду поверхні досліджуваних зразків, не виявлено (табл. 5.) Основним характерним показником, що змінює властивості з'єднань після штучного старіння або повного циклу термо-

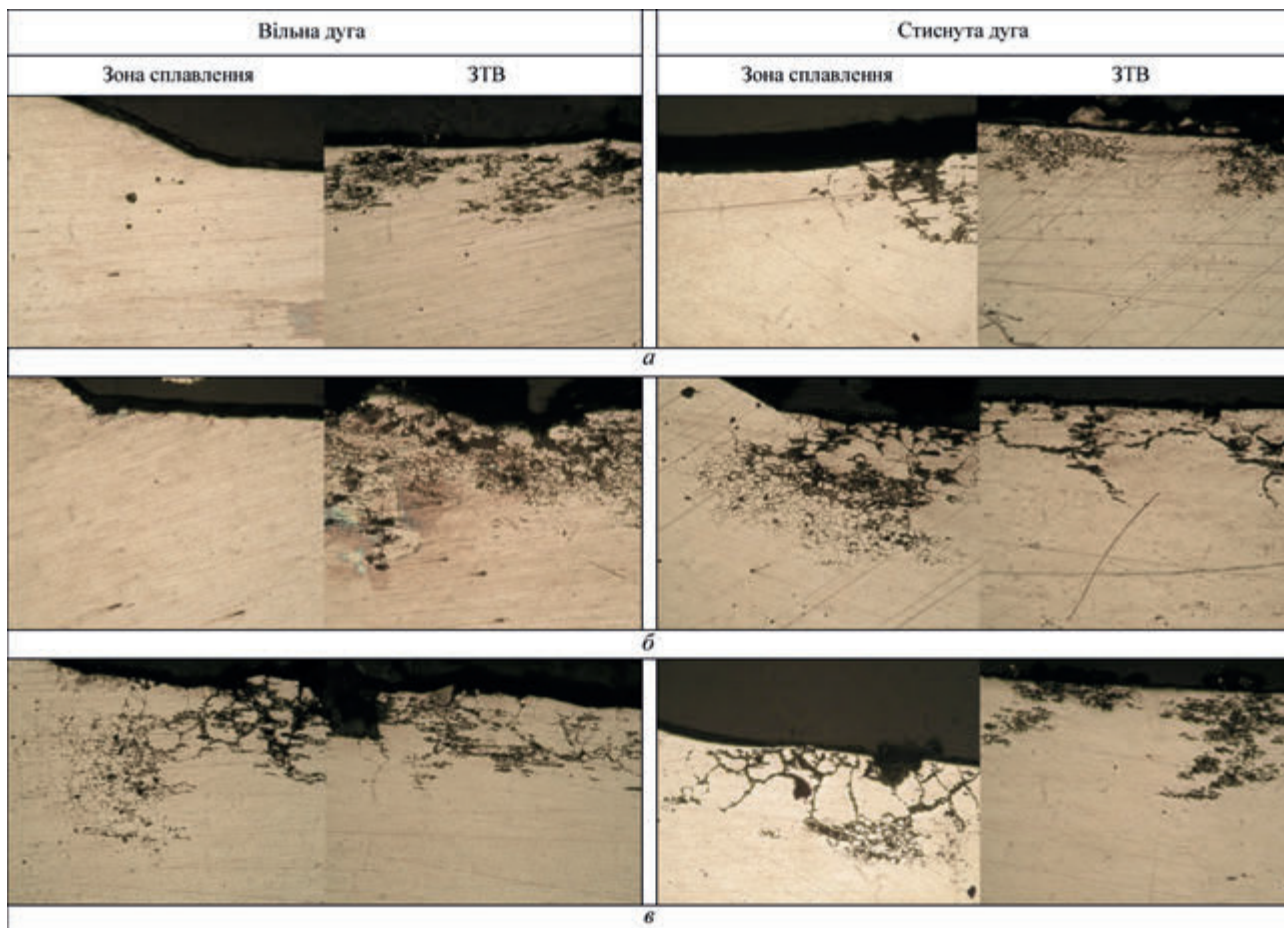


Рис. 6. Вигляд зразків в зоні сплавлення та ЗТВ зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих стиснутою та вільною дугою, у різних станах, після випробувань тривкості проти міжкристалітної корозії, $\times 320$: а – після зварювання; б – після штучного старіння; в – після повного циклу термооброблення

броблення, було потемніння поверхні. Стійкість проти розшаровуючої корозії оцінено балом 2. У зварних з'єднаннях, виконаних стиснутою дугою, значення стійкості проти розшаровуючої корозії у стані після зварювання оцінено балом 1, оскільки не виявлено будь-яких змін на поверхні та по торцях зразків. Після штучного старіння або повного циклу термооброблення з'єднань спостерігається зміна кольору поверхні зразків. Їх тривкість проти розшаровуючої корозії також

оцінено балом 2 згідно з ГОСТ 9.904. Отже, після термооброблення єдиним показником, який свідчив про зміну властивостей зразків обох видів зварних з'єднань, відзначено зміну кольору поверхні, а тривкість проти розшаровуючої корозії оцінено балом 2.

Опірність корозійному розтріскуванню. Зовнішній вигляд зразків після випробувань тривкості корозійно-механічному розтріскуванню представлено на рис. 7. Як свідчить візуальний

Таблиця 4. Узагальнені результати оцінювання корозійно-механічної тривкості зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих за різними технологіями зварювання неплавким електродом

Характеристика зразків	Стан зразків	Глибина МКК, мм	Стійкість проти розшаровуючої корозії, бал	Час руйнування, доби
Основний метал	У стані постачання	0,082...0,086	2...3	67...88
	Після штучного старіння	0,074...0,117	2...3	47...77
	Після гартування та штучного старіння	0,111...0,209	2...3	45...87
ЗЗ, отримане вільною дугою	У стані після зварювання	0,245...0,350	2...3	10...45
	Після штучного старіння	0,123...0,301	2...3	3...9
	Після гартування та штучного старіння	0,214...0,287	2...3	4...54
ЗЗ, отримане стиснутою дугою	У стані після зварювання	0,289...0,467	2...3	9...> 45
	Після штучного старіння	0,062...0,233	2...3	9...12
	Після гартування та штучного старіння	0,074...0,345	2...3	9...31

Таблиця 5. Результати оцінювання стійкості проти розширюючої корозії зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною та стиснутою дугою, у різних станах

Характеристика зразків	Назва показників								Значення показників, бал
	Характер зміни зовнішнього вигляду зразків	Найбільший діаметр відшарування, мм	Площа відшарування на кожній поверхні, %		Сумарна довжина торців з тріщинами, мм				
			А	Б	1	2	3	4	
Зварні з'єднання, отримані вільною дугою									
ПЗ	Відшарування	<1,0	<1,0	<1,0	0	0	0	0	2-3
ШС	Потемніння поверхні	0	0	0	0	0	0	0	2
Г+ШС	Потемніння поверхні	0	0	0	0	0	0	0	2
Зварні з'єднання, отримані стиснутою дугою									
ПЗ	Без змін	0	0	0	0	0	0	0	1
ШС	Потемніння поверхні	0	0	0	0	0	0	0	2
Г+ШС	Потемніння поверхні	0	0	0	0	0	0	0	2

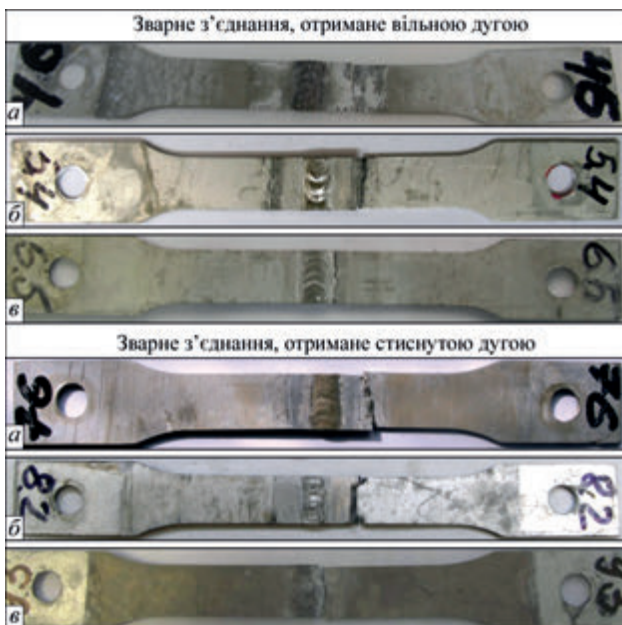


Рис. 7. Зовнішній вигляд зразків зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною та стиснутою дугою, після випробувань стійкості проти корозійного розтріскування: а – у стані після зварювання; б – після штучного старіння; в – після повного циклу термооброблення

аналіз зразків у стані після зварювання та штучного старіння, вони зруйнувалися по основному металу в ЗТВ на відстані 4...5 мм, а після проведення повного термооброблення зразків – біля зони сплавлення шва з основним металом. Час руйнування зварних з'єднань, отриманих вільною дугою, зменшився до 10...45 діб (у середньому 20 діб) порівняно з основним металом, який становив від 67 до 88 діб (майже 73 діб) (табл. 4).

Аналогічні результати отримані для з'єднань, зварених стиснутою дугою. Після штучного старіння проміжок часу до повного руйнування зразків був найменшим для обох досліджуваних способів з'єднання сплаву В1341Т. Для з'єднань, отриманих вільною дугою, руйнування відбувалося протягом 3...9 діб, а отриманих стиснутою дугою – 9...12 діб. Після повного циклу термооброблення максимальна тривалість до руйнування основного металу становила 87 діб, зварних з'єднань – 54 і 31 діб, відповідно.

Отже, термооброблення за режимом гартування та штучне старіння підвищує корозійно-механічну тривкість зварних з'єднань, отриманих як вільною, так і стиснутою дугою. Водночас, показники механічних властивостей після виконання повного термооброблення вищі для з'єднань, отриманих стиснутою дугою. Найвищий рівень корозійно-механічної тривкості в результаті проведення повного циклу термооброблення досягається у зразках зварних з'єднань, отриманих стиснутою дугою.

Висновки

1. Проведення операції штучного старіння підвищує характеристики міцності зварних з'єднань: отриманих вільною дугою до 257,6 МПа (на ~23 % порівняно з основним металом), стиснутою дугою – до 258,7 МПа (на ~29 %). Але при цьому відмічається зниження коефіцієнта міцності з'єднань до 0,76 і до 0,77 (0,81 і 0,83 у стані після зварювання). Показник відносного подовження зразків знижується на ~82 %, для з'єднання, отриманого вільною дугою, та на ~84 %, для з'єднання, отриманого стиснутою дугою. Виконання повного циклу термооброблення забезпечує зростання як показників міцності, так і пластичності. Значення межі міцності з'єднань, отриманих вільною дугою, зросла на ~25 % порівняно з основним металом у стані, а з'єднань, отриманих стиснутою дугою, підвищилося до рівня основного металу. Коефіцієнти міцності з'єднань становили 0,75 та 1,0, відповідно. Також підвищився показник відносного подовження до рівня 6,9 і 3,3 %, відповідно.

2. За результатами електрохімічних досліджень визначено, що після термооброблення, як за режимом штучного старіння, так і після повного циклу термооброблення, різниця потенціалів між основним металом та зоною термічного впливу не перевищувала допустиме значення (0,05 В) згідно з ГОСТ 9.005, що за умов експлуатації виробів зі сплаву В1341Т в неагресивних середовищах не представлятиме небезпеку.

3. Термооброблення за режимом штучного старіння сприяє незначному підвищенню граничного дифузійного струму (швидкості корозії) зварних з'єднань, отриманих вільною та стиснутою дугою, але разом з тим зменшує потенціал виділення водню на зварних швах цих з'єднань порівняно з основним металом. Повний цикл термооброблення зменшує граничний дифузійний струм і потенціал виділення водню на зварних швах, отриманих за обох технологій з'єднання сплаву В1341Т, що свідчить про підвищення корозійної стійкості зварних швів.

4. Встановлено, що проведення штучного старіння або повного циклу термооброблення зварних з'єднань сплаву В1341Т, отриманих вільною та стиснутою дугою, не погіршує їх стійкість проти розшаровуючої корозії, яка оцінена балом 2.

5. Виконання штучного старіння покращує опірність міжкристалітній корозії сплаву В1341Т та його з'єднань: тріщини розвиваються в зоні термічного впливу з'єднання, отриманого вільною дугою, на максимальну глибину 0,301 мм, стиснутою дугою – на 0,233 мм (у стані після зварювання – 0,350 та 0,47 мм). Після проведення повного циклу ТО глибина міжкристалітних тріщин становить 0,287 та 0,345 (0,533) мм, відповідно.

6. Термооброблення за режимом штучного старіння знижує корозійно-механічну тривкість зварних з'єднань, отриманих вільною або стиснутою дугою: тривалість до руйнування зразків знижується до 9 та 12 діб, відповідно (порівняно із станом після зварювання – 45 діб). Після повного циклу термооброблення максимальний час до руйнування зварних з'єднань зростає до 54 і 31 діб, відповідно. Вищу корозійно-механічну тривкість після виконання повного циклу термооброблення продемонстрували зразки зварних з'єднань, отриманих стиснутою дугою.

Робота виконана за підтримки НАН України в рамках програми відомчого замовлення Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона в 2017–2021 рр. (номер державної реєстрації 0117U001188).

Список літератури

1. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Київ, Наукова думка.
2. Кривов Г.А., Рябов В.Р., Ищенко А.Я. и др. (1998) *Сварка в самолетостроении*. МИИВЦ.
3. Овчинников В.В., Грушко О.Е. (2005) Высокотехнологичный свариваемый алюминиевый сплав В1341 системы Al–Mg–Si. *Машиностроение и инженерное образование*, 3, 4, 2–11.
4. Albert, D. (1993) Aluminium alloys in arc welded constructions. *Welding World Magazine*, 32, 3, 97–114.
5. Pogatscher, S., Antrekowitsch, H., Leitner, H. et al. (2013) Influence of the thermal route on the peak-aged microstructures in an Al–Mg–Si aluminum alloy. *Scripta Mater.*, 68, 158–161.

6. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Шамрай В.Ф., Клочков Г.Г. (2007) Высокопрочный конструкционный Al–Cu–Li–Mg сплав пониженной плотности, легированный серебром. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 6, 3–7.
7. Коваль В.А., Лабур Т.М., Яворська Т.Р. (2020) Властивості з'єднань алюмінієвого сплаву марки В1341Т в умовах TIG зварювання. *Автоматичне зварювання*, 2, 38–43.
8. Ниркова Л.І., Лабур Т.М., Осадчук С.О., Яворська Т.Р. (2020) Корозійно-механічна тривкість зварних з'єднань алюмінієвого сплаву В1341, отриманих аргонодуговим зварюванням вільною та стиснутою дугою. *Там само*, 12, 44–51.
9. Ниркова Л.І., Осадчук С.О., Коваленко С.Ю. та ін. (2020) Вплив термооброблення на корозійну тривкість зварного з'єднання алюмінієвого сплаву системи Al–Mg–Si–Cu. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 5, 131–138.
10. ГОСТ 9.021-74 *Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию*. Москва, Издательство стандартов.
11. ГОСТ 9.904-83. *Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию*. Москва, Издательство стандартов.
12. ГОСТ 9.019-74. *Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые и магниевые. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание*. Москва, Издательство стандартов.
13. ГОСТ 9.005-72 *Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами*. Москва, Издательство стандартов.
14. Жук Н.П. (1976) *Курс теории коррозии и защиты металлов*. Москва, Металлургия.

References

1. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2012) *Welding of modern structures of aluminium alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Krivov, G.A., Ryabov, V.R., Ishchenko, A.Ya. et al. (1998) *Welding in aircraft construction*. MIIVTs [in Russian].
3. Ovchinnikov, V.V., Grushko, O.E. (2005) High performance welded aluminium alloy V1341 of Al–Mg–Si system. *Mashinostroenie i Inzhen. Obrazovanie*, 3(4), 2–11 [in Russian].
4. Albert, D. (1993) Aluminium alloys in arc welded constructions. *Welding World Magazine*, 32(3), 97–114.
5. Pogatscher, S., Antrekowitsch, H., Leitner, H. et al. (2013) Influence of the thermal route on the peak-aged microstructures in an Al–Mg–Si aluminum alloy. *Scripta Mater.*, 68, 158–161.
6. Fridlyander, I.N., Grushko, O.E., Shamraj, V.F., Klochkov, G.G. (2007) High-strength structural alloy Al–Cu–Li–Mg of lower density doped with silver. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, 6, 3–7 [in Russian].
7. Koval, V.A., Labur, T.M., Yavorska, T.R. (2020) Properties of joints of V1341T grade alloy under the conditions of TIG welding. *The Paton Welding J.*, 2, 35–40.
8. Nyrkova, L.I., Labur, T.M., Osadchuk, S.O., Yavorska, T.R. (2020) Corrosion and mechanical resistance of welded joints of aluminium B1341 alloy, produced by argon arc welding using free and constricted arc. *Ibid.*, 12, 40–47.
9. Nyrkova, L.I., Osadchuk, S.O., Kovalenko, S.Yu. et al. (2020) Influence of heat treatment on corrosion resistance of welded joint of aluminium alloy of Al–Mg–Si–Cu system. *Fyzyko-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 5, 131–138 [in Ukrainian].
10. GOST 9.021-74: *Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium and aluminium alloys. Accelerated test methods for intercrystalline corrosion*. Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
11. GOST 9.904-83: *Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium and aluminium alloys. Accelerated*

- test methods for exfoliation corrosion*. Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
12. GOCT 9.019-74: *Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium and magnesium alloys. Accelerated test methods for corrosion cracking*. Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
 13. GOCT 9.005-72: *Unified system of corrosion and ageing protection. Metals, alloys, metallic and non-metallic coatings. Permissible and impermissible contacts with metals and non-metals*. Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
 14. Zhuk, N.P. (1976) *Course of theory of corrosion and protection of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF V1341 ALLOY UNDER MODELED OPERATING CONDITIONS

L.I. Nyrkova, T.M. Labur, S.O. Osadchuk, M.R. Yavorska, V.A. Koval

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper presents the results of comparative studies of corrosion-mechanical resistance of welded joints of V1341 alloy 1.2 mm thick, produced by manual argon-arc welding with free and constricted arc, after different types of heat treatment (HT) – artificial aging and full cycle heat treatment (hardening and artificial aging). It was shown that artificial aging increases the strength characteristics of welded joints: those produced by free arc - by ~23%, compared to the base metal, by constricted arc – by ~29%, but reduces the relative elongation by ~82% and ~84%, and the strength coefficient – to 0.77 and 0.71 (0.81 and 0.83 in as-welded state), respectively. The full cycle of HT provides increase in both strength and ductility. After artificial aging, as well as after a complete heat treatment cycle, the potential difference between the base metal and the HAZ does not exceed the permissible value of 0.05 V (according to GOST 9.005), which will not be dangerous at operation in non-aggressive environments. Artificial aging and full HT cycle do not impair the resistance of welded joints of V1341T alloy to exfoliating corrosion compared to as-welded state, which is assessed as value 2. An increase of resistance to intercrystalline corrosion (ICC) after artificial aging was demonstrated, the maximum depth of which was 0.301 mm for the joint produced by a free arc, and 0.233 mm – for a joint produced by a constricted arc (in as-welded state it was 0.350 mm and 0.47 mm, respectively). After a complete HT cycle, the ICC depth was 0.287 mm and 0.345 mm, respectively. Artificial aging reduces the corrosion-mechanical resistance of welded joints produced by free and constricted arc: the time to fracture of the samples was 9 and 12 days, respectively (compared to 45 days in as-welded state), but after a full cycle of HT maximum time to fracture of welded joints increased to 54 and 31 days, respectively. Welded joints produced by a constricted arc had higher corrosion-mechanical resistance after a complete heat treatment cycle. 14 Ref., 5 Tabl., 7 Fig.

Keywords: aluminum alloy, welded joints produced by free and constricted arc welding, mechanical properties, structure, intercrystalline corrosion, exfoliating corrosion, corrosion under constant strain, potentiometry, voltamperometry

Надійшла до редакції 18.01.2021

НОВА КНИГА

Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: Збірник наукових статей за результатами, отриманими у 2016-2020 рр. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – Київ, 2020. – 712 с.



До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2016–2020 рр., до реалізації якої було залучено інститути НАН України. Мета програми – створення нових матеріалів з подовженим ресурсом роботи, розроблення наукових положень управління надійністю і довговічністю відповідальних об'єктів, створення ефективних методів, технічних засобів і технологій для оцінки і подовження ресурсу обладнання провідних галузей промисловості, нафто- та газопроводів, мостів, будівельних і транспортних конструкцій.

Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

З книгою можна ознайомитись в бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Попередні чотири випуски збірників «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, споруд та машин» у відкритому доступі за посиланням: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/compilations>.

ЗМІСТ

- РОЗДІЛ 1.** Розробка методологічних основ оцінки і подовження ресурсу конструктивних елементів об'єктів підвищеної небезпеки та авіакосмічної техніки.
- РОЗДІЛ 2.** Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації.
- РОЗДІЛ 3.** Розробка методів захисту від корозії елементів конструкцій об'єктів тривалої експлуатації.
- РОЗДІЛ 4.** Розробка ефективних методів оцінки та подовження ресурсу об'єктів атомної енергетики.
- РОЗДІЛ 5.** Розробка методологічних основ оцінки і подовження ресурсу конструктивних елементів об'єктів підвищеної небезпеки та авіакосмічної техніки.
- РОЗДІЛ 6.** Створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об'єктів газо- та нафтопереробної промисловості.
- РОЗДІЛ 7.** Підвищення надійності та подовження ресурсу мостів, будівельних, промислових і транспортних конструкцій.
- РОЗДІЛ 8.** Розробка технологій ремонту та відновлення елементів конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки з метою подовження терміну їх експлуатації.
- РОЗДІЛ 9.** Матеріали з подовженим ресурсом роботи для екстремальних умов експлуатації.