

АРГОНОДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ЖАРОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ, ЛЕГОВАНОГО КРЕМНІЄМ

С.В. Ахонін, В.Ю. Білоус, Р.В. Селін, І.К. Петриченко, Л.М. Радченко, С.Б. Руханський

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

Зварювання титанових сплавів, легованих кремнієм, вимагає застосування додаткових технологічних операцій, таких як локальна термічна обробка та попередній підігрів. В зв'язку з тим, що аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом набуло широке застосування в промисловості, досліджено можливість застосування попереднього підігріву для аргонодугового зварювання жароміцного псевдо- α титанового сплаву системи Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si. В роботі було застосовано попередній підігрів з'єднань до температур 200 та 400 °С. Температура попереднього нагріву перед зварюванням в діапазоні 200...400 °С не впливає на кінцеву мікроструктуру отриманих зварних з'єднань. Найбільшу тимчасову міцність мають з'єднання АДЗ жароміцного псевдо- α сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si, виконані з попереднім підігрівом 400 °С, на рівні $\sigma_b = 1160,1$ МПа, показники ударної в'язкості зразків з гострим надрізом з'єднань знаходяться на рівні 8,3 Дж/см². Бібліогр. 12, табл. 4, рис. 6.

Ключові слова: титан, титанові сплави, дисперсійне зміцнення, жароміцний псевдо- α титановий сплав, аргонодугове зварювання, структура, властивості, міцність

Вступ. Сплави на основі титану мають високу питому міцність в діапазоні температур до 400 °С. Титанові сплави, призначені для застосування при підвищених температурах, такі як ВТЗ, ВТ9, ВТ8, відносяться до групи псевдо- α сплавів. В останні роки дослідження проводяться в двох напрямках – розробка двофазних жароміцних ($\alpha+\beta$)-титанових сплавів, та подальше підвищення властивостей існуючих псевдо- α сплавів [1]. Наприклад, новий жароміцний сплав ВТ25У [2] має значення показників $\sigma_b = 1080$ МПа при 20 °С та $\sigma_b = 784$ МПа при 550 °С [3]. Один із шляхів подальшого підвищення робочої температури псевдо- α -титанових сплавів – це додаткове легування кремнієм [4, 5]. Істотним недоліком титанових сплавів, легованих кремнієм, є складність їх зварювання, що обумовлено виникненням холодних тріщин в зварних з'єднаннях. Тому зварювання таких сплавів вимагає застосування додаткових технологічних операцій, таких як локальна термічна обробка та попередній підігрів, а виконувати зварювання рекомендують електронним променем (ЕПЗ) [6].

Аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом (АДЗ) або TIG-зварювання набуло найбільш широке застосування в промисловості завдяки тому, що цей спосіб зварювання є дешевим та універсальним [7]. Перевага АДЗ над MIG зварюванням полягає в тому, що процес може виконуватися без застосування присадного металу [8], а також наскрізним проплавленням [9]. Оскільки в роботі [10] показано, що при ЕПЗ сплавів, легованих кремнієм, найкращий комплекс властивостей мають з'єднання, які виконані з попереднім піді-

грівом, тому доцільно дослідити можливість АДЗ з застосуванням попереднього підігріву жароміцних сплавів, легованих кремнієм, і порівняти властивості з'єднань, отриманих АДЗ та ЕПЗ.

Метою роботи є визначення впливу попереднього підігріву на структуру і властивості зварних з'єднань, виконаних аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом (АДЗ), із застосуванням попереднього підігріву 200 та 400 °С експериментального жароміцного псевдо- α титанового сплаву, легованого кремнієм.

Матеріал та методика дослідження. Досліджувалась структура і властивості зварних з'єднань, виконаних АДЗ, псевдо- α титанового сплаву системи Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si. В даній роботі було застосовано попередній підігрів з'єднань до температур 200 та 400 °С. Температура 400 °С – це гранична температура, при якій не виникає окислення деталей жароміцних титанових сплавів.

Виплавку злитка здійснювали на гарнісажній електронно-променевої установці ІСВ-004 [11]. Хімічний склад сплаву наведено в табл. 1, сплав має коефіцієнт стабілізації β -фази $K_\beta = 0,1$. Отриманий зливок прокатувався до товщини 13 мм. Після прокату для стабілізації структури і зняття напружень пластини піддавалися відпалу при температурі 800 °С протягом 1 год.

Відпалені пластини обробляли з метою видалення окисленого шару до товщини 8 мм. Виконували АДЗ зразків загальним розміром 150×80×8 мм. Зварювання здійснювали з однієї сторони за один прохід наскрізним проплавлен-

Таблиця 1. Хімічний склад жароміцного псевдо- α титанового сплаву

Вміст легуючих елементів, мас. %						Вміст домішок, мас. %		K_{β}
Al	Sn	Zr	Mo	V	Si	[O]	[N]	
5,64	2,20	3,53	0,43	0,95	0,56	0,09	0,02	0,6

ням без подачі присадного дроту. Попередній підігрів при зварюванні виконувався вольфрамовими спіралями, закріпленими на захисній підкладці зі зворотного боку зразків. Захисна підкладка також виконує функцію захисту зворотної сторони з'єднання при зварюванні та остиганні металу шва, з цією метою при зварюванні в підкладку подається підігрітий захисний газ – аргон. Контроль температури попереднього підігріву здійснювався за допомогою термопар, прикріплених на лицьовій стороні з'єднання. Режими одностороннього аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом наскрізним проплавленням жароміцного титанового псевдо- α сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si наведено в табл. 2.

Експериментальні дослідження. Повний провар зразків товщиною 8 мм відбувається при АДЗ без флюсу наскрізним проплавленням при струмі зварювання 320...330 А та швидкості зварювання 8 м/год (див. табл. 2). Зварювання з попереднім підігрівом дозволяє дещо знизити струм зварювання до 320 А. АДЗ по флюсу (режим № 3) за рахунок стискання аргонової дуги дозволяє суттєво знизити погонну енергію зварювання та збільшити швидкість зварювання при забезпеченні повного провару металу товщиною 8 мм.

Поперечні макрошліфи зварних з'єднань жароміцного псевдо- α титанового сплаву з дисперсійним зміцненням, виконаного АДЗ з попереднім підігрівом 200 та 400 °С, наведено на рис. 1.

Параметри отриманих зварних швів наведено в табл. 3. Площа шва при АДЗ по флюсу на 30 % менше ніж при АДЗ наскрізним проплавленням. Таким чином, АДЗ по флюсу дозволяє виконувати зварювання титанового псевдо- α сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si на режимах з мінімальною погонною енергією та поперечною площею металу шва та ЗТВ.

Таблиця 2. Режими одностороннього АДЗ наскрізним проплавленням жароміцного титанового псевдо- α сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si

Номер режиму	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Напруга на дузі U_d , В	Швидкість зварювання $v_{зв}$, м/г	Довжина дуги передумовлена L_d , мм	Температура попереднього підігріву $T_{підгр}$, °С
1	330	12	8	2	200
2	320	12	8	2	400
3 (по флюсу)	400	12	16	2	200

Таблиця 3. Параметри зварних швів зразків товщиною 8 мм жароміцного псевдо- α титанового сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si, виконаних АДЗ

Номер режиму	Ширина шва зверху, мм	Ширина шва знизу, мм	Площа шва, мм ²	Ширина ЗТВ, мм	Площа шва+ЗТВ, мм ²
1	15,8	4,6	80,4	21,4	176,5
2	20,9	1,6	81,1	26,1	227,4
3 (по флюсу)	8,8	3,5	55,6	14,7	113,2

Результати досліджень. Дослідження мікроструктури отриманих зварних з'єднань дозволило встановити, що в стані після прокатування основний метал сплаву має пластинчасту структуру (рис. 2, а, б), складається з великих первинних зерен (рис. 2, а) з роздробленою при прокатуванні оторочкою, в яких після охолодження прокату до температур нижче $T_{\text{пн}}$ стався розпад β -фази з утворенням пластин α -фази, що створюють структуру корзинкового плетіння (рис. 2, б). Довжина пластин становить 5...30 мкм, товщина 1...5 мкм. При більшому збільшенні видно, що у межах α -пластин (рис. 2, в) і межах первинних зерен відбувається виділення великої кількості дисперсних час-

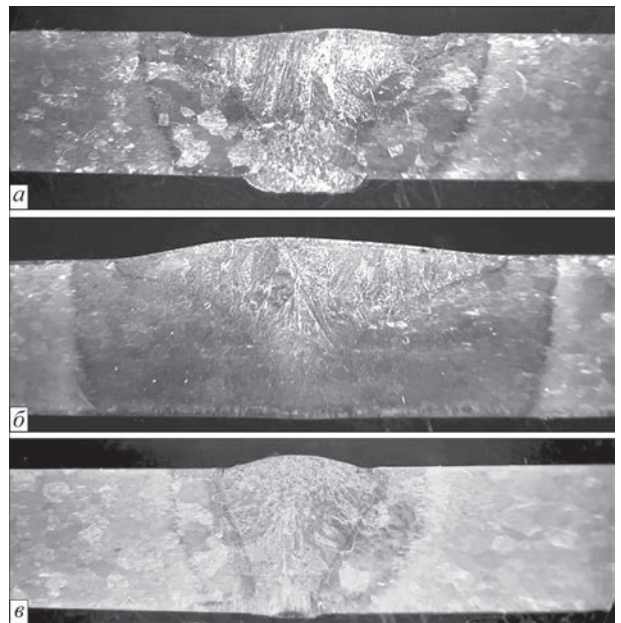
Рис. 1. Поперечні макрошліфи зварних з'єднань товщиною 8 мм жароміцного псевдо- α титанового сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si: а – АДЗ з підігрівом 200 °С (режим № 1); б – АДЗ з підігрівом 400 °С (режим № 2); в – АДЗ по флюсу з підігрівом 200 °С (режим № 3)



Рис. 2. Мікροструктура основного металу жароміцного псевдо- α титанового сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si (опис *a–в* див. у тексті)

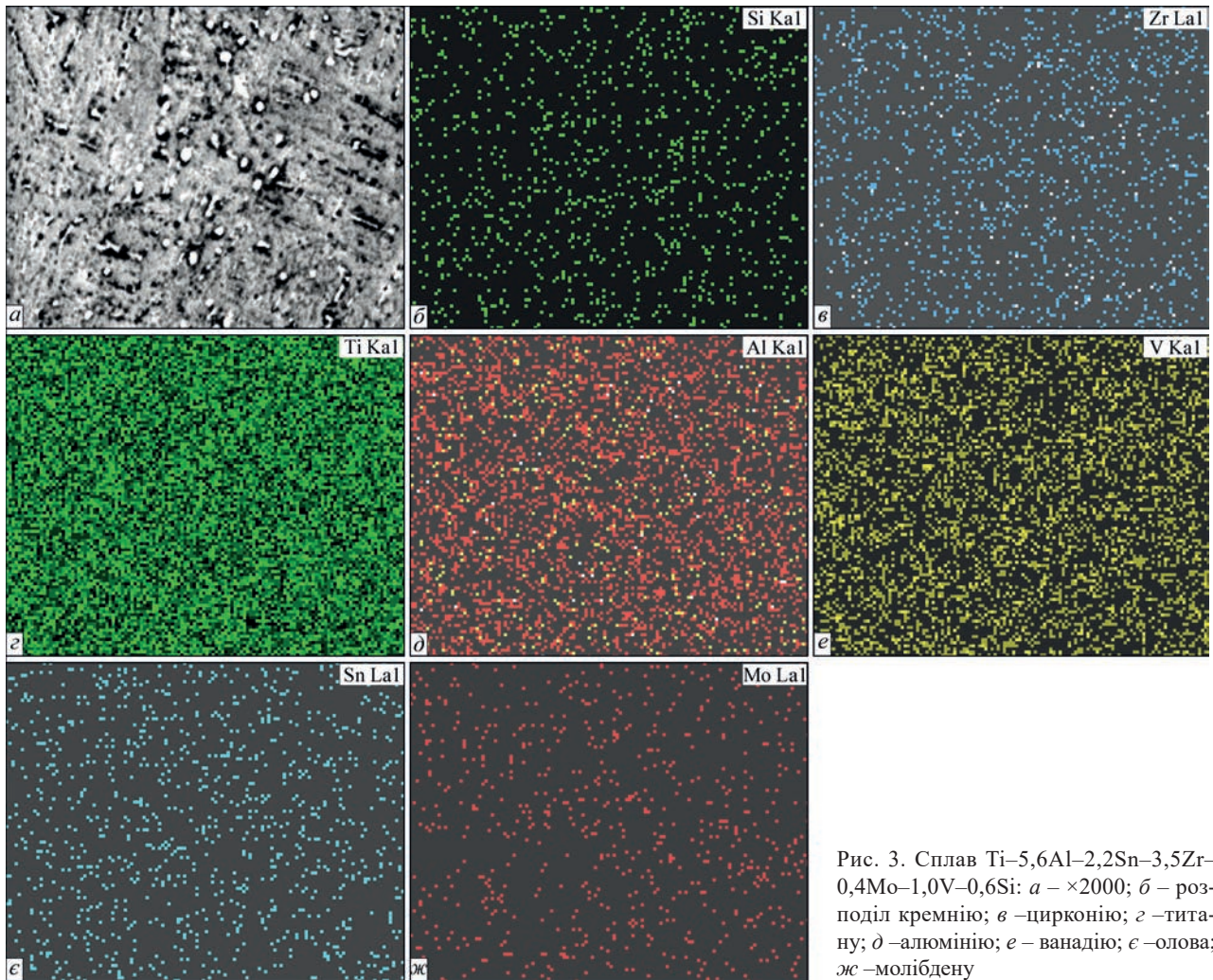


Рис. 3. Сплав Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si: *a* – $\times 2000$; *б* – розподіл кремнію; *в* – цирконію; *г* – титану; *д* – алюмінію; *е* – ванадію; *є* – олова; *ж* – молібдену

тинок розміром до 1 мкм. Ці дисперсні частинки є силіцидом титану $(\text{Ti}, \text{Zr})_5\text{Si}_3$, оскільки вміст кремнію в сплаві перевищує межу його розчинності в α -титані, який становить 0,12... 0,45 % кремнію [12]. Частинки силіцидів розташовані відносно рівномірно в межах первинних β -зерен (рис. 2, *в*).

Дисперсні частинки силіцидів розташовані досить рівномірно і не складають видимий візерунок. На картах розподілу елементи теж розташовані досить рівномірно без видимого візерунку (рис. 3, *а–ж*). Але на спектрах, які отримані при проходженні мікрозондом по лінії через частинки видно, що в місцях розташування частинок

збільшується концентрація кремнію та цирконію (рис. 4, *а–в*) і зменшуються концентрації алюмінію, олова, молібдену, ванадію (рис. 4, *г–є*). Це знову свідчить про те, що в цьому сплаві мають бути складні комплекси типу $(\text{Ti}, \text{Zr})_5\text{Si}_3$ або $(\text{TiZr})_6\text{Si}_3$.

Метал шва зварного з'єднання, виконаного АДЗ з попереднім підігрівом 400 °С, складається з витягнутих у напрямку тепловідведення первинних зерен (рис. 5, *а*). Внутрішньозеренна мікροструктура металу шва відноситься до того ж типу, що і мікροструктура ОМ. Відмінність полягає в розмірах α -пластин, що утворюються, їх довжина в металі шва дещо більша, вона становить в ос-

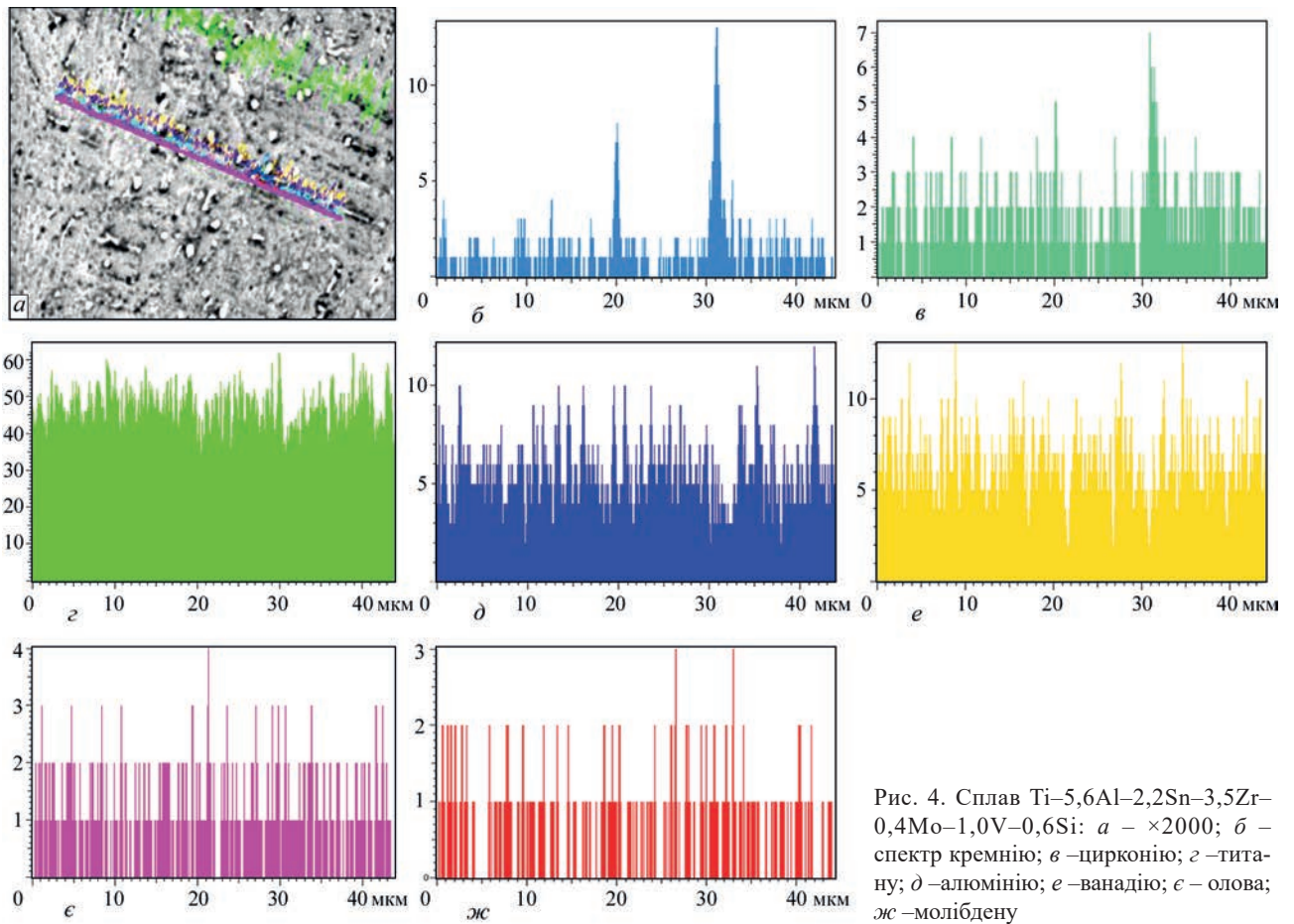


Рис. 4. Сплав $\text{Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si}$: *a* – $\times 2000$; *б* – спектр кремнію; *в* – цирконію; *г* – титану; *д* – алюмінію; *е* – ванадію; *є* – олова; *ж* – молибдену

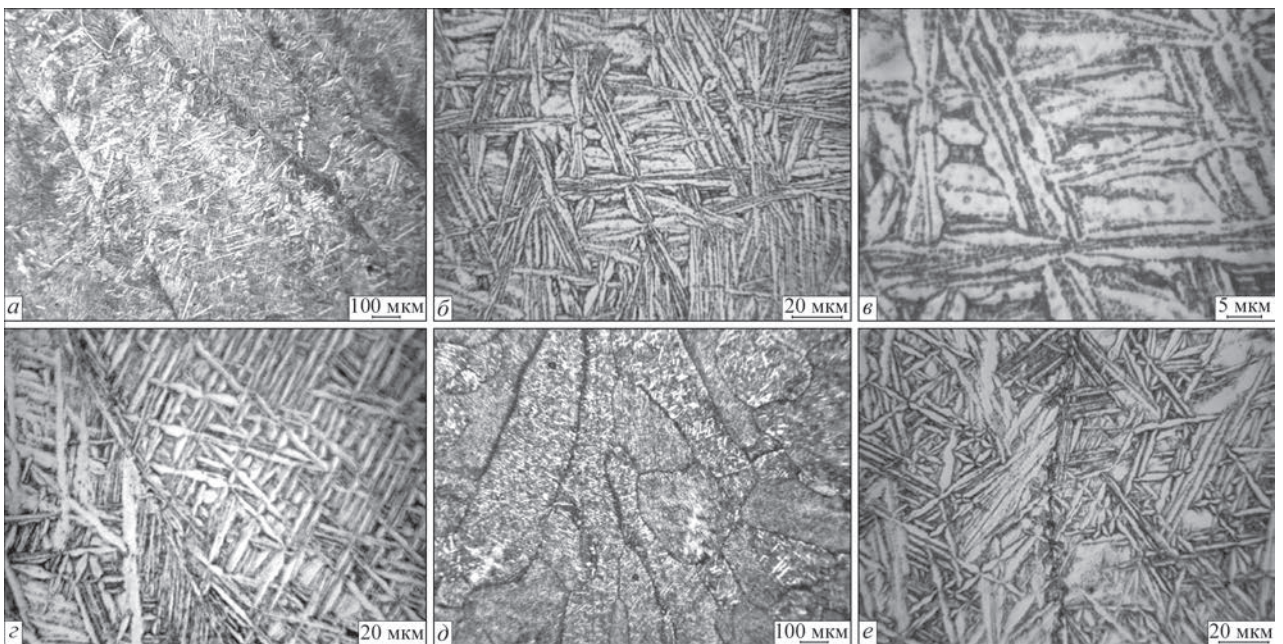


Рис. 5. Мікроструктура металу шва з'єднань жароміцного псевдо- α титанового сплаву $\text{Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si}$, виконаних АДЗ в стані після зварювання: *a-в* – режим № 2 (400 °С); *г* – № 1 (200 °С); *д, е* – № 3 по флюсу (200 °С)

новному 5... 60 мкм (рис. 5, б, в), хоча зустрічаються окремі пластини, довжина яких перевищує 100 мкм. Дисперсні частинки, що є силіцидом титану, в металі шва також локалізуються на межах зерен і пластин (рис. 5, в), там же локалізується і присутня в псевдо- α сплавах β - або α -фаза іншого ступеня легування.

Мікроструктура металу шва зварного з'єднання, виконаного АДЗ із попереднім підігрівом 200 °С, ідентична мікроструктурі металу зварного шва, виконаного з попереднім підігрівом 400 °С. Структура кошикового плетіння в металі шва, виконаного на режимі № 1, утворена α -пластинами, довжина та товщина яких відповідає цим пара-

метрам у металі шва, виконаного на режимі № 2. Спостерігаються тут пластини великої довжини, що перевищує 100 мкм (рис. 5, з). Розподіл та розміри дисперсних виділень частинок силіциду титану Ti_3Si_3 в металі шва аналогічно такому у шві з'єднання, розглянутого вище.

Мікроструктура металу шва з'єднання, виконаного АДЗ по флюсу з попереднім підігрівом 200 °С, наведена на рис. 5, д, е. Як видно на наведених вище зображеннях, тип внутрішньозеренної мікроструктури металу шва цього з'єднання, параметри і характер розподілу структурних складових збігаються з відповідними структурними елементами металу шва, виконаного АДЗ без застосування флюсів. Отже, застосування флюсу в процесі зварювання не вплинуло на внутрішньозеренну мікроструктуру металу шва жароміцного псевдо- α титанового сплаву $Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si$. Очевидно, застосування флюсу вплинуло лише на розміри зон зварного з'єднання.

В зоні сплавлення з'єднань, виконаних АДЗ з підігрівом 400 °С, можна бачити, як великі рівновісні зерна навколошовної зони ЗТВ змінюються витягнутими зернами металу шва (рис. 6, а, б); внутрішньозеренна структура навколошовної зони, ОМ та металу шва подібні. Довжина пластин становить 5... 30 мкм, товщина 1...5 мкм (рис. 6, в). Розподіл дисперсних частинок та його розміри відповідають таким у ОМ і шві (рис. 6, з). В цілому мікроструктура металу навколошовної зони зварного з'єднання, виконаного АДЗ з підігрівом 200 °С (рис. 6, д), та зварюванням по флюсу (рис. 6, е), повністю ідентичні мікроструктурі навколошовної зони зварного з'єднання, виконаного АДЗ з попереднім підігрівом 400 °С.

Встановлення механічних властивостей отриманих зварних з'єднань дозволило зробити висновок, що найбільшу міцність мають з'єднання, виконані з попереднім підігрівом 400 °С (табл. 4), та знаходяться на рівні 96 % від міцності основного металу.

Міцність зварних з'єднань сплаву $Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si$, виконаних АДЗ з попереднім підігрівом 200 °С нижче міцності з'єднань з підігрівом 400 і становить 64 % від міцності основного металу при практично рівній ударній в'язкості зразків із гострим надрізом. Збільшення температури попереднього підігріву з 200 до 400 °С позначається сприятливо на властивостях зварних з'єднань, і призводить до незначного підвищення ударної в'язкості з'єднань. Слід відзначити, що руйнування зразків типу МІ-12 при статичному розтягу відбувалось по металу зварного шва.

Обговорення результатів досліджень. Необхідно відзначити подібність внутрішньозеренних мікроструктур різних зон, таких як основний метал, метал шва і метал ЗТВ кожного з розглянутих зварних з'єднань. Рівномірна однорідна структура повинна гарантувати близькі властивості не тільки різних зон однієї й тієї самої ділянки зварного з'єднання, а й усіх трьох розглянутих зварних з'єднань. Таким чином, аналіз мікроструктури всіх зон зварних з'єднань дозволяє зробити висновок про те, що температура попереднього нагріву перед зварюванням в діапазоні 200...400 °С не впливає на кінцеву мікроструктуру зварних з'єднань жароміцного псевдо- α сплаву $Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si$ після зварювання.

Якщо порівняти з'єднання, отримані АДЗ зі з'єднаннями, отриманими ЕПЗ з застосуванням

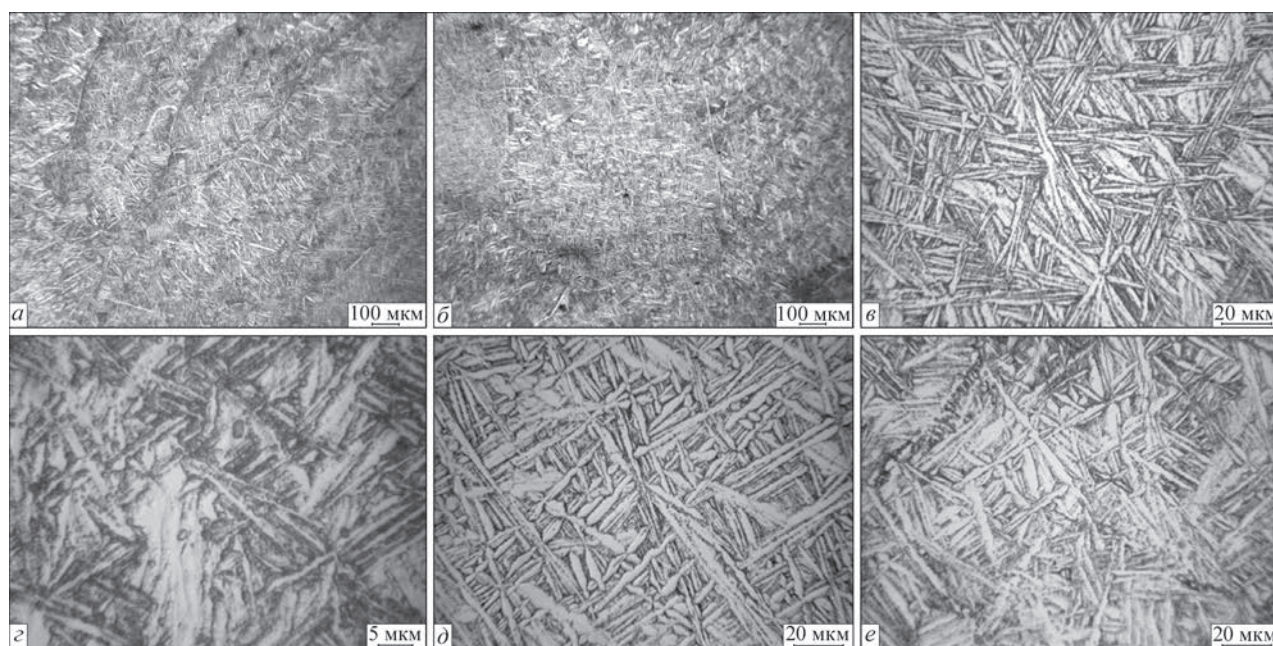


Рис. 6. Мікроструктура металу ЗТВ з'єднань жароміцного псевдо- α титанового сплаву $Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si$, виконаних АДЗ в стані після зварювання: а-в – режим № 3 (400 °С); з, д – № 2 (200 °С); е – № 4 по флюсу (200 °С)

Таблиця 4. Механічні властивості з'єднань жароміцного псевдо- α титанового сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si, виконаних АДЗ та ЕПЗ з попереднім підігрівом

Номер режиму	Температура попереднього підігріву, °C	Тимчасовий опір розриву σ_b , МПа	Межа плинності σ_T , МПа	Відносне подовження δ_s , %	Ударна в'язкість KCV, Дж/см ²	Примітки
Основний метал	–	1208,2	1106,4	–	9,05	–
АДЗ режим №1	200	778,4	564,1	15,2	7,2	Руйнування зразків МІ12 по шву
АДЗ режим №2	400	1160,1	–	–	8,3	«-»
ЕПЗ	200	1187,6	–	–	5,4	–
ЕПЗ	400	1192,0	–	–	4,4	–

попереднього підігріву [10], то можна зробити висновок що міцність зварних з'єднань сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si, виконаних АДЗ з попереднім підігрівом 400 °C, становить 97 % від міцності з'єднань, виконаних ЕПЗ з попереднім підігрівом 400 °C [10]. Проте ударна в'язкість зразків з гострим надрізом з'єднань, виконаних АДЗ, майже вдвічі більше та становить 8,3 Дж/см² (табл. 4).

Для зварних з'єднань сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si, виконаних ЕПЗ, збільшення температури попереднього підігріву з 200 до 400 °C не позначається сприятливо на властивостях зварних з'єднань, а призводить до зниження ударної в'язкості з'єднань обох сплавів. Для з'єднань цього сплаву, виконаних АДЗ, підвищення температури попереднього підігріву з 200 до 400 °C призводить до збільшення міцності та ударної в'язкості.

Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що для АДЗ жароміцного псевдо- α сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si оптимальною температурою попереднього підігріву є 400 °C. В цьому випадку міцність зварних з'єднань становить не менше 90 % від міцності основного металу. Значення показника ударної в'язкості зразків з гострим надрізом (8,3 Дж/см²) близькі до показників для основного металу (9,0 Дж/см²).

Висновки

1. Метал шва жароміцного псевдо- α -сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si після зварювання має структуру корзинкового плетіння з пластин α -фази, довжина пластин становить 5...30 мкм, товщина 1...5 мкм, а дисперсні частинки силіциду титану та β -фаза локалізуються на межах зерен і пластин.

2. Температура попереднього нагріву перед зварюванням в діапазоні 200...400 °C не впливає на кінцеву мікроструктуру зварних з'єднань жароміцного псевдо- α сплаву Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si, виконаних АДЗ, в стані після зварювання.

3. Найбільшу тимчасову міцність мають з'єднання АДЗ жароміцного псевдо- α -сплаву Ti-

5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1,0V-0,6Si, виконані з попереднім підігрівом 400 °C, на рівні $\sigma_b = 1160,1$ МПа, що відповідає 96 % від міцності основного металу та 97 % від міцності з'єднань, виконаних ЕПЗ з попереднім підігрівом 400 °C, показник ударної в'язкості зразків з гострим надрізом з'єднань, виконаних АДЗ, вдвічі більше та становить 8,3 Дж/см².

Список літератури

1. Мухин В.С. (2007) *Основы технологии машиностроения (авиадвигателестроения)*. Уфа, УГАТУ.
2. Ильенко В.М., Шалин Р.Е. (1995) Титановые сплавы для авиационных газотурбинных двигателей. *Титан (ВИЛС)*, 1-2.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник*. Москва, ВИЛС МАТИ.
4. Иванов В.И., Ясинский К.К. (1996) Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti₃Al и TiAl для работы при температурах 600...800 °C в авиакосмической технике, *Технология легких сплавов*, 3.
5. Солонина О.П., Глазунов С.Г. (1996) *Жаропрочные титановые сплавы*. Справочник. Москва, Металлургия.
6. Макаров Э.Л. (1981) *Холодные трещины при сварке легированных сталей*. Москва, Машиностроение.
7. Ахонин С.В., Белоус В.Ю. (2017) Аргонодуговая сварка титана и его сплавов с применением флюсов. *Автоматическая сварка*, 2, 8–14.
8. Гусева Е.А., Климычев А.И. (1997) Аргонодуговая сварка титановых сплавов сквозным проплавлением. *Сварочное производство*, 2, 15–16.
9. Гуревич С.М. (1990) *Справочник по сварке цветных металлов*: Киев, Наук. думка.
10. Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Вржижевский Э.Л., Петриченко И.К. (2017) Влияние предварительного подогрева и локальной термообработки на структуру и свойства соединений дисперсионно-упрочненных титановых сплавов, легированных кремнием, выполненных электронно-лучевой сваркой. *Автоматическая сварка*, 7, 53–58.
11. Левицкий Н.И., Матвинец Е.А., Лапшук Т.В. и др. (2012) Получение сложнелегированных титановых сплавов методом электронно-лучевой гарнисажной плавки. *Металл и литье Украины*, 4, 6–9.
12. Аношкин Н.Ф., Сигалов Ю.М. (2002) Титановые сплавы с повышенной жаропрочностью. *Технология легких сплавов*, 1, 38–50.

References

1. Mukhin, V.S. (2007) *Fundamentals of mechanical engineering technology (aircraft engine building)*. Ufa, UGATU [in Russian].
2. Ilienko, V.M., Shalin, R.E. (1995) Titanium alloys for aircraft gas turbine engines. *Titan (VILS)*, 1-2 [in Russian].

3. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties: Handbook*. Moscow, VILS MATI [in Russian].
4. Ivanov, V.I., Yasinsky, K.K. (1996) Efficiency of application of heat-resistant alloys based on intermetallics Ti₃Al and TiAl for operation at 600-800 °C temperatures in aerospace engineering. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **3**.
5. Solonina, O.P., Glazunov, S.G. (1996) *Heat-resistant titanium alloys: Handbook*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
6. Makarov, E.L. (1981) *Cold cracks in welding of alloyed steels*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Akhonin, S.V., Belous, V.Yu. (2017) Argon-arc welding of titanium and its alloys using fluxes (Review). *The Paton Welding J.*, **2**, 7-12.
8. Guseva, E.A., Klimychev, A.I. (1997) Through penetration argon-arc welding of titanium alloys. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 15-16 [in Russian].
9. Gurevich, S.M. (1990) *Handbook on welding of nonferrous metals*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
10. Akhonin, S.V., Vrzhezhevsky, E.L., Belous, V.Yu., Petrichenko, I.K. (2017) Influence of preheating parameters and local heat treatment on structure and properties of dispersion-strengthened joints of silicon-containing titanium alloys made by electron beam welding. *The Paton Welding J.*, **7**, 43-47.
11. Levitsky, N.I., Matvinets, E.A., Lapshuk, T.V. et al. (2012) Producing of complex titanium alloys by method of electron beam skull melting. *Metall i Litio Ukrainy*, **4**, 6-9 [in Russian].
12. Anoshkin, N.F., Sigalov, Yu.M. (2002) Titanium alloys with higher heat resistance. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **1**, 38-50 [in Russian].

ARGON-ARC WELDING OF HIGH-TEMPERATURE TITANIUM ALLOY DOPED BY SILICON

S.V. Akhonin, V.Yu. Bilous, R.V. Selin, I.K. Petrychenko, L.M. Radchenko, S.B. Rukhanskyi

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Welding of titanium alloys, doped by silicon, requires application of additional technological operations, such as local heat treatment and preheating. In view of the fact that tungsten electrode argon-arc welding became widely applied in industry, the possibility of application of preheating for argon-arc welding of high-temperature pseudo~ titanium alloy of Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si system was studied. Joint preheating up to temperatures of 200 and 400 °C was used in the work. Temperature of preheating before welding in the range of 200...400 °C does not influence the final microstructure of the produced welded joints. AAW joints of high-temperature pseudo~ Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si alloy, made with preheating up to 400 °C, have the highest ultimate tensile strength on the level of $\sigma_t = 1160.1$ MPa, impact toughness values of samples with a sharp notch are on the level of 8.3 J/cm². 12 Ref., 4 Tabl., 6 Fig.

Keywords: titanium, titanium alloys, dispersion hardening, high-temperature pseudo~ titanium alloy, argon-arc welding, structure, properties, strength

Надійшла до редакції 15.04.2022

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING ENGINEERING —
JOINING, CUTTING, SURFACING

LET'S JOIN
THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1
IN THE WORLD

MESSE
ESSEN

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY