

АРГОНОДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ЖАРОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АКТИВУЮЧИХ ФЛЮСІВ

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

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: selinrv@gmail.com

Жароміцні титанові сплави – це матеріали, які здатні витримувати високі температури та зберігати свої механічні властивості в умовах екстремального теплового навантаження. Використання жароміцних титанових сплавів сприяє підвищенню ефективності роботи двигунів та зменшенню ваги конструкцій, що, в свою чергу, призводить до зниження витрат палива та збільшення загальної продуктивності техніки. Зварювання жароміцних титанових сплавів ускладнене через наявність у хімічному складі таких домішок, як алюміній, ванадій, молібден та інших елементів, що підвищують їх жароміцні властивості. Кремній є одним з елементів, що ефективно підвищують жароміцні властивості титанових сплавів. Але при цьому суттєвим дефектом сплавів, легованих кремнієм, є холодні тріщини в швах, які виникають при температурах нижче 700 °С, коли матеріал переходить із в'язкого в крихкий стан. Крихкість зварного шва в стані після зварювання, у свою чергу, визначається його структурою і при наростанні зварювальних напружень у процесі охолодження призводить до появи дефектів типу холодних тріщин, джерелом яких є мікротріщини, дислокації та ін. У даній роботі проведено дослідження впливу застосування додаткових технологічних операцій, таких як зварювання по флюсу та попередній підігрів перед зварюванням, на структуру та механічні властивості зварних з'єднань жароміцного титанового сплаву системи Ti–6,5Al–5,3Zr–2,2Sn–0,6Mo–0,5Nb–0,75Si. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: жароміцний титановий сплав, аргонодугове зварювання, попередній підігрів, зварювання із застосуванням флюсів

Вступ. Жароміцні титанові сплави – це матеріали, які здатні витримувати високі температури та зберігати свої механічні властивості в умовах екстремального теплового навантаження. Ці сплави мають високу міцність, корозійну стійкість і малу густину, що робить їх ідеальними для застосування в авіакосмічній та автомобільній промисловості, а також в енергетичному секторі [1, 2].

Використання жароміцних титанових сплавів сприяє підвищенню ефективності роботи двигунів та зменшенню ваги конструкцій, що, в свою чергу, призводить до зниження витрат палива та збільшення загальної продуктивності техніки. Незважаючи на їхню високу вартість і складність обробки, переваги, які вони надають, виправдовують їх використання в критично важливих вузлах, де надійність і довговічність є ключовими факторами [3].

Титанові сплави зазвичай включають домішки алюмінію, ванадію, молібдену та інших елементів, що підвищують їх жароміцні властивості. Вони використовуються у виробництві компонентів турбін, двигунів літаків, деталей автомобілів і в багатьох інших високотехнологічних галузях. Кремній (Si) є одним з елементів, що ефективно підвищують жароміцні властивості титанових сплавів [4]. Введення кремнію в сплав сприяє зміцненню структури матеріалу та підвищенню його стабільності при термічних коливаннях. Це досягається

завдяки тому, що кремній утворює тверді розчини та дисперсні частинки в матриці титану, що перешкоджає руху дислокацій і зменшує швидкість деформації [5].

При отриманні зварних з'єднань жароміцних титанових сплавів, що містять легуючий елемент кремній, суттєвим їх дефектом є холодні тріщини в швах, які виникають при температурах нижче 700 °С, коли матеріал переходить із в'язкого в крихкий стан [6]. Крихкість зварного шва в стані після зварювання, у свою чергу, визначається його структурою і при наростанні зварювальних напружень у процесі охолодження призводить до появи дефектів типу холодних тріщин, джерелом яких є мікротріщини, дислокації та ін. Тому зварювання таких сплавів вимагає застосування додаткових технологічних операцій, таких як локальна термічна обробка та попередній підігрів [7, 8].

Крім того, ці сплави титану в порівнянні зі звичайними сплавами більш чутливі до домішок проникнення, таких як кисень, азот та вуглець. Завдяки тому, що кремній у жароміцних сплавах – це вже не домішка, а легуючий елемент, підвищений вміст кремнію може призводити до розвитку в процесі зварювання хімічної і фізичної неоднорідності в литому металі та зоні термічного впливу (ЗТВ), у результаті чого можливе утворення крихких прошарків. Домішки проникнення знижу-

Ахонін С.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, Білоус В.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-0082-8030>, Селін Р.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2990-1131>, Шваб С.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-4627-9786>, Петриченко І.К. – <https://orcid.org/0000-0002-0476-3983>, Радченко Л.М. – <https://orcid.org/0009-0008-1097-7137>
© С.В. Ахонін, В.Ю. Білоус, Р.В. Селін, С.Л. Шваб, І.К. Петриченко, Л.М. Радченко, 2025

Таблиця 1. Режим одностороннього ТІГ зварювання наскрізним проплавленням жароміцного титанового сплаву Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si

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

ють пластичність і ударну в’язкість металу швів, збільшують схильність до крихкого руйнування, чутливість до концентраторів напружень. Крім того, у жароміцних сплавах кисень, азот і вуглець знижують термічну стабільність, що пов’язано з тим, що зазначені елементи прискорюють процеси розпаду метастабільних фаз. Кисень, азот і вуглець погіршують технологічність жароміцних сплавів, зокрема зварюваність. Для підвищення жароміцності титанових сплавів використовується термообробка – відпал [9, 10].

Метою цієї роботи є дослідження структури та властивостей жароміцного титанового сплаву після аргонодугового зварювання, а також визначення впливу попереднього підігріву на структуру та властивості зварних з’єднань.

Матеріали та методика дослідження. Зварювалися зразки розмірами 200×100×6 мм (рис. 1, а). Зварювання проводилося з однієї сторони. Режим зварювання обиралися за умови забезпечення повного провару з’єднань сплаву Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si завтовшки 6 мм. Окрім стандартного аргонодугового зварювання (ТІГ), також виконувалось аргонодугове зварювання по шару флюсу (А-ТІГ) з попереднім підігрівом. Цей вид зварювання є ефективним способом впливу на проплавну здатність дуги, при якій в атмосферу дуги вводяться галогеніди лужних і лужноземельних металів, що призводять до зміни характеру проплавлення металу шва та формування швів за рахунок контрагування дуги [11]. Флюс сприяє збільшенню глибини провару та зміні форми проплавлення. У результаті збільшення проплавної здатності дуги аргонодугове зварювання з флюсом, нанесеним на поверхню крайок, що зварюються (рис. 1, б), дозволяє зварювати за один про-

хід з’єднання титанових сплавів без оброблення крайок завтовшки до 6 мм [12, 13].

Режими одностороннього аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом наскрізним проплавленням та по шару флюсу жароміцного титанового сплаву Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si наведено в табл. 1.

Підготовку зразка для автоматичного аргонодугового зварювання титану вольфрамовим електродом наскрізним проплавленням представлено на рис. 1.

Перед зварюванням пластини металу завтовшки 6 мм проходили вакуумний відпал при температурі 900 °С з охолодженням в печі. Зовнішній вигляд зварних з’єднань виконаного зварного шва наведено на рис. 2. Макроструктуру зварних з’єднань наведено на рис. 3.

Результати та обговорення. *Дослідження мікроструктури.* Мікроструктуру основного металу (ОМ) зварного з’єднання, виконаного на режимі № 1 (див. табл. 1), показано на рис. 4. Основний метал складається з рівновісних первинних β-зерен розміром 150...900 мкм з переривчастим про-

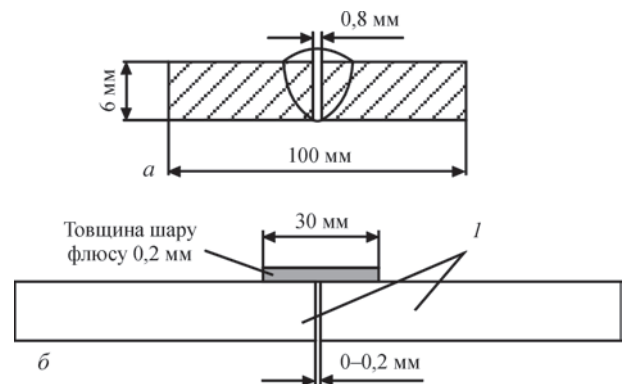


Рис. 1. Схема збирання зразків для зварювання: а – ТІГ наскрізним проплавленням; б – ТІГ по шару флюсу

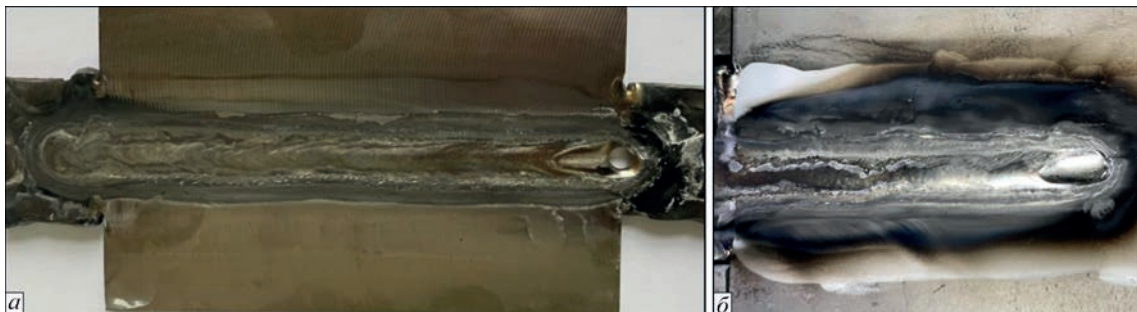


Рис. 2. Приклад зварного з’єднання жароміцного титанового сплаву Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si, виконаного А-ТІГ зварюванням: а – лицьова сторона; б – зразок в печі після зварювання

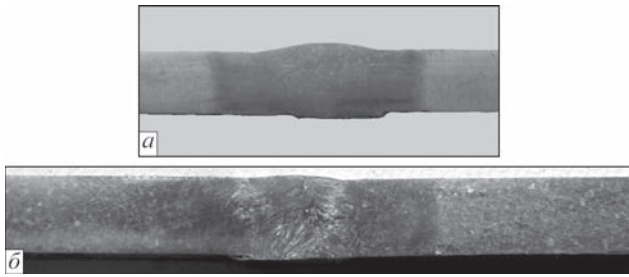


Рис. 3. Поперечний макрошліф зварного з'єднання жароміцного титанового сплаву $Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si$, виконаного: *a* – ТІГ зварюванням; *б* – А-ТІГ зварюванням

шарком α -фази по границях зерен. Внутрішньозеренна структура утворена колоніями α -пластин різного розміру. Товщина пластин α -фази становить 1...3 мкм.

Метал шва жароміцного титанового сплаву $Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si$, виконаного на режимі № 1, складається з рівновісних і витягнутих у напрямку тепловідведення первинних β -зерен, більших у верхній частині шва (рис. 5, *a, б*), дрібніших – у середній та корене-

вій частинах. Рівновісні зерна утворюються переважно вздовж осі шва. На границях зерен подекуди спостерігається прошарок α -фази по границях зерен. При швидкому охолодженні шва металу від температур β -області відбувається мартенситне перетворення $\beta \rightarrow \alpha'$ з утворенням колоній пластин розміром 5...50 мкм. Зона сплавлення у пришовній зоні складається з рівновісних зерен розміром 100...600 мкм. У зоні термічного впливу, що межує зі швом, де метал нагрівався при зварюванні до температур β -області, після охолодження з високою швидкістю могла утворитися α -фаза з пластинчастою морфологією (рис. 5, *в, з*). Товщина пластин 1...2 мкм. У ділянці зони термічного впливу, що межує з основним металом, який нагрівався при зварюванні до температур $(\alpha+\beta)$ -області, можуть бути α -, β - і α' -фаза, що відрізняється від α -фази іншим рівнем легування (рис. 5, *д, е*).

Метал шва зварного з'єднання, яке виконували А-ТІГ зварюванням із застосуванням попереднього підігріву при 200 °С (режим № 2), складається з рівновісних зерен розміром 200...400 мкм

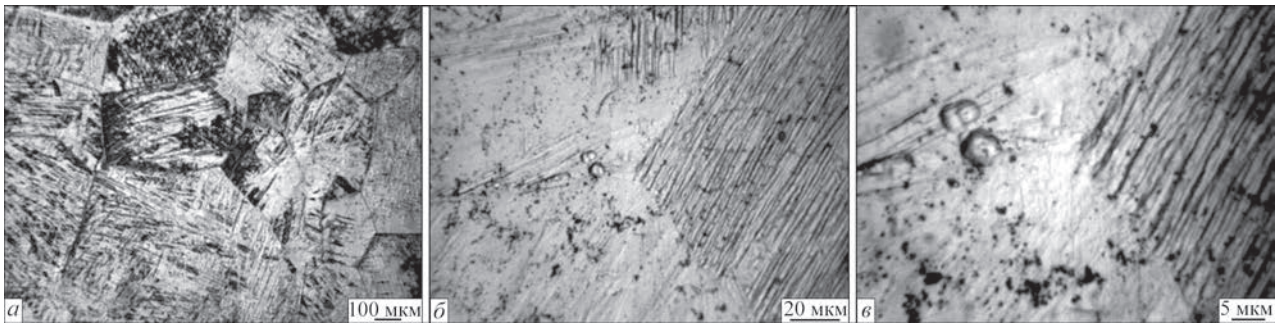


Рис. 4. Мікроструктура основного металу з'єднання жароміцного титанового сплаву $Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si$

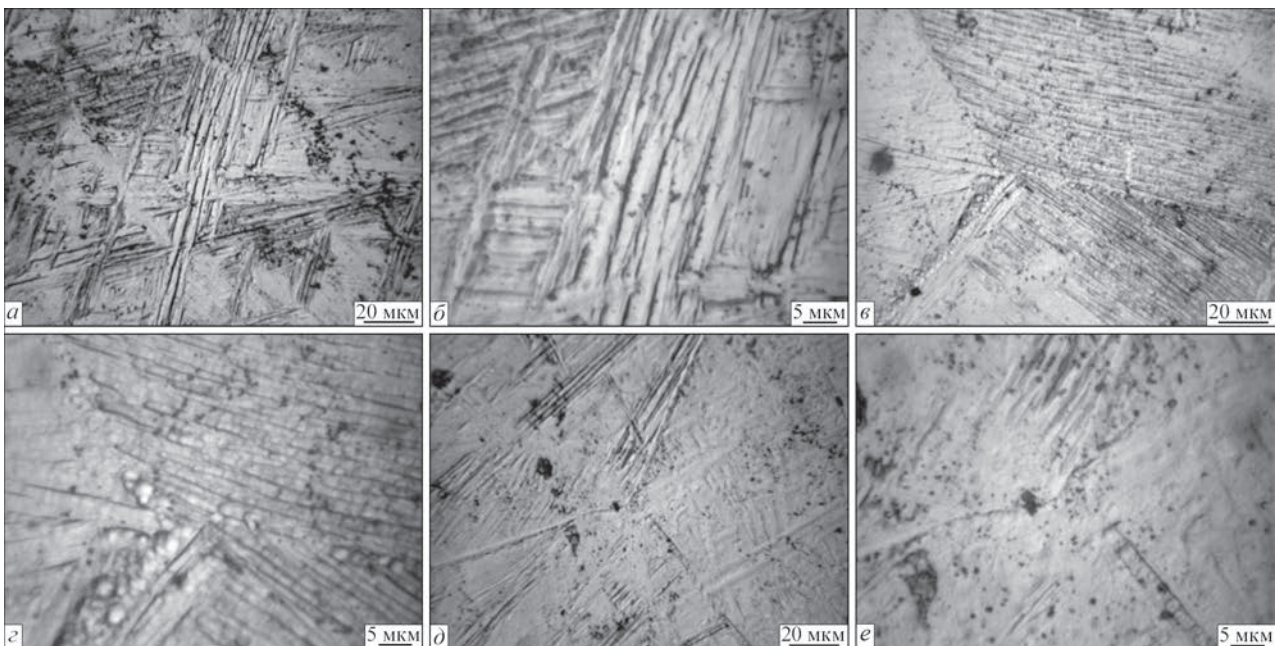


Рис. 5. Мікроструктура з'єднання жароміцного титанового сплаву $Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si$, виконаного на режимі № 1: *a, б* – метал шва; *в, з* – зона термічного впливу, що межує зі швом; *д, е* – зона термічного впливу, що межує з основним металом

із пластинчастою внутрішньозеренною структурою (рис. 6, *a, б*), ширина α -пластин становить 1...4 мкм. Мікроструктура металу зони сплавлення складається з рівновісних зерен розміром 100...600 мкм. У структурі металу присутні й дисперсні частинки у вигляді відокремлених виділень та їх скупчень, розмір таких частинок менше 1 мкм (рис. 6, *в*). У ділянці зони термічного впливу, що межує з основним металом, який нагрівався при зварюванні до температур $(\alpha+\beta)$ -області, присутні α -, β - і α' -фази, що відрізняється від α -фази іншим рівнем легування (рис. 6, *г, д*). Однак фізико-механічні властивості α' -фази в псевдо- α спла-

вах близькі до таких для α -фази, тому наявність α' -фази в зварному з'єднанні не погіршуватиме його фізико-механічні властивості. У металі зони термічного впливу спостерігається пластинчаста структура, як у металі шва, а також описані вище дисперсні частинки.

Метал шва з'єднання, отриманого на режимі № 3, складається з зерен розміром 100...500 мкм (рис. 7, *a, б*) з пластинчастою внутрішньозеренною α -фазою. Між пластинами на рисунках спостерігаються дисперсні виділення двох видів: світлі та темні. Характер і локалізація дисперсних частинок подібна до зварного з'єднання, виконаного на

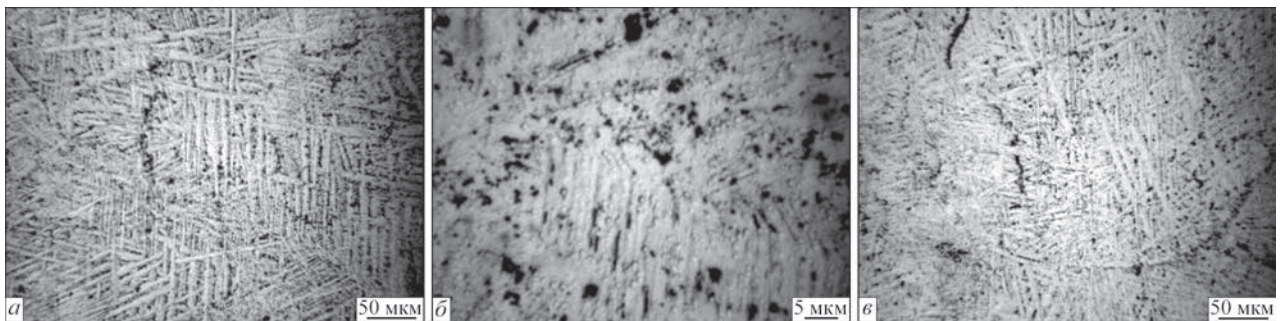


Рис. 6. Мікроструктура з'єднання жароміцного титанового сплаву Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si, виконаного на режимі № 2: *a, б* – метал шва; *в* – зона термічного впливу, що межує зі швом; *г, д* – зона термічного впливу, що межує з основним металом

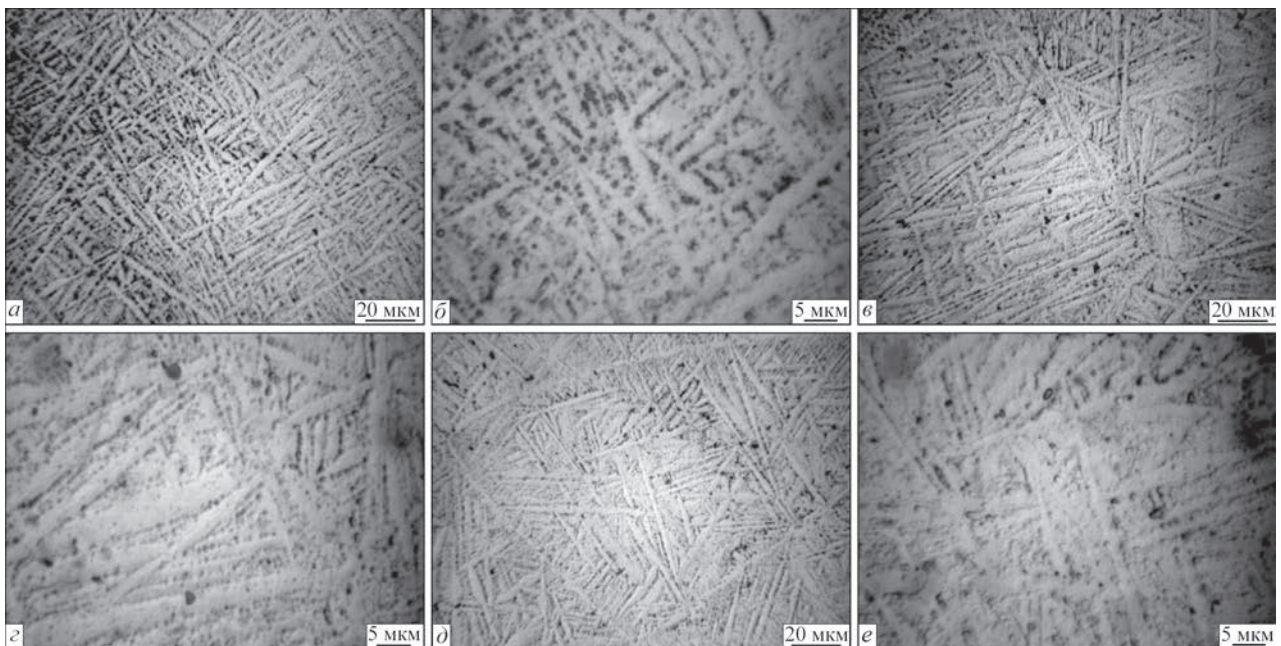


Рис. 7. Мікроструктура з'єднання жароміцного титанового сплаву Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si, виконаного на режимі № 3: *a, б* – метал шва; *в, г* – зона термічного впливу, що межує зі швом; *д, е* – зона термічного впливу, що межує з основним металом

Таблиця 2. Механічні властивості зварних з'єднань жароміцного титанового сплаву Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si

Номер режиму	$T_{\text{підігр}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta_s, \%$	$KCV, \text{Дж/см}^2$
Основний метал після прокату	–	1044	975	4,5	12,7
ТГ, режим № 1	–	969	80	11,2	8,9
А-ТГ, режим № 2	200	1007	929	–	9,7
А-ТГ, режим № 3	400	1091	988	6,8	9,0

режимі № 2. У зоні сплавлення між витягнутими в напрямку тепловідведення зернами металу шва і зони термічного впливу розташовані дрібні полідричні рівновісні зерна розміром 50...150 мкм (рис. 7, в, з), ширина шару таких зерен становить 300...400 мкм. У металі зони термічного впливу, що межує з основним металом, який нагрівався при зварюванні до температур ($\alpha+\beta$)-області, присутні дисперсні виділення та α -, β - і α' -фази (рис. 7, д, е). У всіх ділянках зони термічного впливу присутні дисперсні частинки такого ж розміру, як і в інших ділянках зварного з'єднання, які розташовані уздовж границь зерен і пластин. Серед таких

частинок найбільш ймовірним є силіцид титану, тому що концентрація кремнію в сплаві набагато перевищує границю розчинності його в α -титані. Не виключена локальна присутність у металі зони термічного впливу дисперсних частинок α_2 - та β -фази.

Таким чином, проведені дослідження дозволили зробити висновок, що мікроструктура в різних ділянках зварних з'єднань жароміцного титанового псевдо- α сплаву ідентична та схожа при різних способах і режимах зварювання та термічної обробки. Можна припустити, що фазовий склад металу в різних ділянках зварних з'єднань не матиме

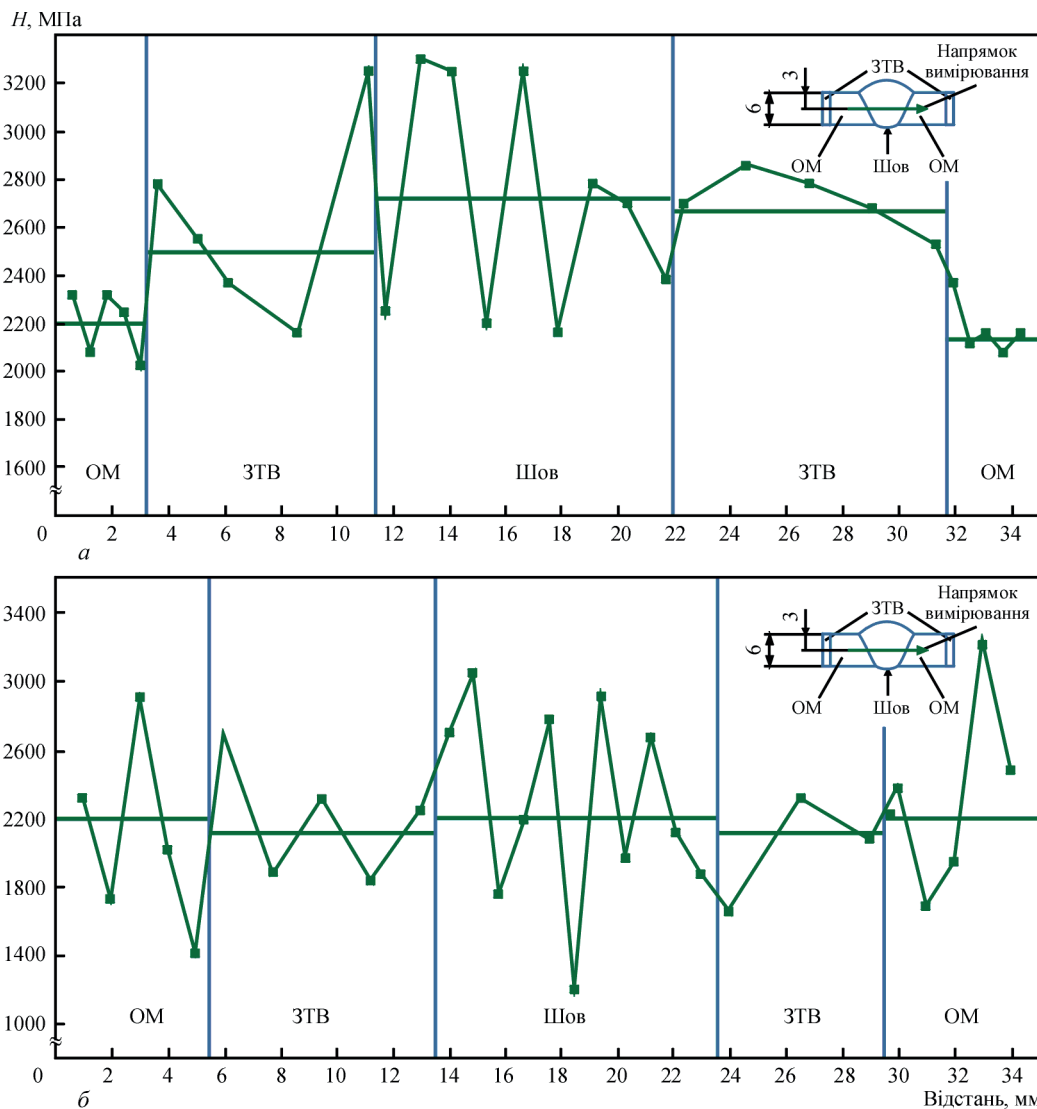


Рис. 8. Розподіл мікротвердості в зварному з'єднанні жароміцного титанового сплаву Ti-6,5Al-5,3Zr-2,2Sn-0,6Mo-0,5Nb-0,75Si: а – режим № 1; б – режим № 3

різких відмінностей. Більший внесок у структуру з'єднань вносить зміна погонної енергії зварювання. Так, при використанні базового технологічного процесу – ТІГ наскрізним проваром – формуються огрублені пакети з розміром (за розміром найбільших пластин) у діапазоні 10...30 мкм. При зниженні питомої потужності при використанні А-ТІГ зварювання спостерігається зменшення розмірів пакетів і підвищення однорідності мікроструктури, що має позитивно позначитися на механічних властивостях зварного з'єднання.

Дослідження механічних властивостей. Дослідження механічних властивостей зварних з'єднань показало, що найнижчі значення міцності в стані після зварювання мають з'єднання, виконані ТІГ зварюванням наскрізним проваром без застосування попереднього підігріву на режимі № 1 (табл. 2), та становлять 969 МПа або 93 % від міцності основного металу після прокату. Найбільші значення міцності мають зварні з'єднання, отримані ТІГ зварюванням із застосуванням попереднього підігріву до 400 °С (режим № 3), та складають 1091 МПа, що знаходиться на рівні міцності основного металу. Зварні з'єднання, виконані ТІГ зварюванням із застосуванням попереднього підігріву до 200 °С (режим № 2), мають посередні значення показника міцності на рівні 1007 МПа або 96 % від міцності основного металу.

Розподіл мікротвердості металу зварних з'єднань жароміцного титанового сплаву Ti–6,5Al–5,3Zr–2,2Sn–0,6Mo–0,5Nb–0,75Si, виконаного ТІГ зварюванням з попереднім підігрівом 400 °С у стані після зварювання, показав, що рівень мікротвердості в основному металі залишився незмінним, а в металі шва та зони термічного впливу рівень мікротвердості зменшився, вирівнявся та знаходиться в інтервалі 1800...2800 МПа (рис. 8).

Таким чином, при А-ТІГ зварюванні з пониженою питомою потужністю формується дрібнодисперсна структура з високою однорідністю. Підігрів до 400 °С призводить до деякого огрублення структури, в металі шва формуються огрублені пакети з розміром (за розміром найбільших пластин) в діапазоні 10...30 мкм і його використання може бути обґрунтовано тільки технологічними міркуваннями, а саме зниженням ризику тріщиноутворення. При зниженні питомої потужності при використанні А-ТІГ зварювання спостерігається зменшення розмірів пакетів і підвищення однорідності мікроструктури, що позитивно позначиться на механічних властивостях зварного з'єднання. Тому виконувати ТІГ зварювання жароміцного титанового псевдо- α сплаву Ti–6,5Al–5,3Zr–2,2Sn–

0,6Mo–0,5Nb–0,75Si доцільно із застосуванням флюсів і попереднього підігріву до температури 400 °С, що надають найбільші значення міцності в стані після зварювання на рівні 1091 МПа.

Висновки

1. Досліджено вплив попереднього підігріву при аргонодуговому зварюванні на властивості зварних з'єднань жароміцного титанового сплаву Ti–6,5Al–5,3Zr–2,2Sn–0,6Mo–0,5Nb–0,75Si та встановлено, що застосування попереднього підігріву з'єднань до 400 °С при А-ТІГ зварюванні забезпечує формування в зварному з'єднанні структур з пластин α -фази завтовшки 1...4 мкм і дисперсних частинок α_2 - та β -фази з середнім розміром до 1 мкм.

2. Дослідження механічних властивостей зварних з'єднань жароміцного титанового сплаву Ti–6,5Al–5,3Zr–2,2Sn–0,6Mo–0,5Nb–0,75Si показало, що найбільші значення міцності мають зварні з'єднання ТІГ, виконані із застосуванням попереднього підігріву до 400 °С, та становлять 1091 МПа для сплаву Ti–6,5Al–5,3Zr–2,2Sn–0,6Mo–0,5Nb–0,75Si, що знаходиться на рівні 0,95...1,05 міцності основного металу.

3. Визначення розподілу мікротвердості у виконаному ТІГ зварюванням з'єднанні жароміцного титанового сплаву Ti–6,5Al–5,3Zr–2,2Sn–0,6Mo–0,5Nb–0,75Si дозволило встановити, що застосування попереднього підігріву 400 °С при ТІГ зварюванні дозволяє знизити середній рівень мікротвердості в металі шва та зоні термічного впливу з 2700 до 2300 МПа, що відповідає мікротвердості основного металу.

4. Запропоновано технологічний процес А-ТІГ зварювання жароміцного титанового сплаву Ti–6,5Al–5,3Zr–2,2Sn–0,6Mo–0,5Nb–0,75Si, який передбачає зварювання з погонною енергією 700...800 кДж/м по шару флюсу АНТ25 та попередній підігрів зварних з'єднань до температури 400 °С, що забезпечує формування в з'єднанні дрібнодисперсної мікроструктури з високою однорідністю та забезпечує значення міцності зварних з'єднань у стані після зварювання на рівні не менше 0,95 міцності основного металу.

Список літератури

- Gogia, A.K. (2005) High-temperature titanium alloys. *Defence Science J.*, 55(2), 149–173.
- Eylon, D.S.P.J., Fujishiro, S., Postans, P.J., Froes, F.H. (1984) High-temperature titanium alloys – a review. *JOM*, 36(11), 55–62.
- Tabie, V.M., Li, C., Saifu, W., Li, J., Xu, X. (2020) Mechanical properties of near alpha titanium alloys for high-temperature applications – a review. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92(4), 521–540. DOI: <https://doi.org/10.1108/AEAT-04-2019-0086>

4. Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. та ін. (2022) Аргонодугове зварювання жароміцного титанового сплаву, легованого кремнієм. *Автоматичне зварювання*, **5**, 33–39. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.05.05>
5. Zhao, E., Sun, S., Zhang, Y. (2021) Recent advances in silicon containing high temperature titanium alloys. *J. of Materials Research and Technology*, **14**, 3029–3042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.117>
6. Селін Р.В., Білоус В.Ю., Руханський С.Б. та ін. (2023) Вплив попереднього підігріву на термічний цикл аргонодугового зварювання жароміцного титанового сплаву системи Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si. *Автоматичне зварювання*, **12**, 18–23. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.12.03>
7. Akhonin, S.V., Belous, V.Y., Selin, R.V., Schwab, S.L. (2023) Effect of TIG-welding on the structure and mechanical properties of low-cost titanium alloy Ti-2.8 Al-5.1 Mo-4.9 Fe welded joints. *Materials Science Forum*, **1095**, 105–110. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-2njAz3>
8. Akhonin, S.V., Belous, V.Y., Selin, R.V. (2022) Effect of preheating and post-weld local heat treatment on the microstructure and mechanical properties of low-cost β -titanium alloy welding joints, obtained by EBW. *Defect and Diffusion Forum*, **416**, 87–92. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-o8uehr>
9. Prilutsky, V.P., Akhonin, S.V. (2014) TIG welding of titanium alloys using fluxes. *Welding in the World*, **58**, 245–251. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0096-5>
10. Sun, Z., Pan, D. (2004) Welding of titanium alloys with activating flux. *Science and technology of welding and joining*, **9**(4), 337–344. DOI: <https://doi.org/10.1179/136217104225021571>
11. Замков В.Н., Прилуцкий В.П., Гуревич С.М. (1977) Влияние состава флюса на процесс сварки титана неплавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, **4**, 22–26.
12. Гуревич С.М., Замков В.Н., Блашук В.Е. и др. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов: Монография*. Киев, Наукова думка.
13. Гуревич С.М. (1961) Флюсы для автоматической сварки титановых сплавов. *Авиационная промышленность*, **5**, 55–59.
3. Tabie, V.M., Li, C., Saifu, W., Li, J., Xu, X. (2020) Mechanical properties of near alpha titanium alloys for high-temperature applications – A review. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **92**(4), 521–540. DOI: <https://doi.org/10.1108/AEAT-04-2019-0086>
4. Akhonin., S.V., Bilous, V.Yu., Selin, R.V. et al. (2022) Argon-arc welding of heat-resistant titanium alloy doped with silicon. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, **5**, 33–39. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.05.05>
5. Zhao, E., Sun, S., Zhang, Y. (2021) Recent advances in silicon containing high temperature titanium alloys. *J. of Materials Research and Technology*, **14**, 3029–3042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.117>
6. Selin, R.V., Bilous, V.Yu., Rukhanskyi, S.B. et al. (2023) Influence of preheating on thermal cycle of argon-arc welding of heat-resistant titanium alloy of Ti–Al–Zr–Sn–Mo–Nb–Si system. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, **12**, 18–23. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.12.03>
7. Akhonin, S.V., Belous, V.Y., Selin, R.V., Schwab, S.L. (2023) Effect of TIG-welding on the structure and mechanical properties of low-cost titanium alloy Ti-2.8 Al-5.1 Mo-4.9 Fe welded joints. *Mat. Sci. Forum*, **1095**, 105–110. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-2njAz3>
8. Akhonin, S.V., Belous, V.Y., Selin, R.V. (2022) Effect of preheating and post-weld local heat treatment on the microstructure and mechanical properties of low-cost β -titanium alloy welding joints, obtained by EBW. *Defect and Diffusion Forum*, **416**, 87–92. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-o8uehr>
9. Prilutsky, V.P., Akhonin, S.V. (2014) TIG welding of titanium alloys using fluxes. *Welding in the World*, **58**, 245–251. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0096-5>
10. Sun, Z., Pan, D. (2004) Welding of titanium alloys with activating flux. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, **9**(4), 337–344. DOI: <https://doi.org/10.1179/136217104225021571>
11. Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P., Gurevich, S.M. (1977) Influence of flux composition on the non-consumable electrode welding of titanium. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 22–26.
12. Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys: Monograph*. Kyiv, Naukova Dumka.
13. Gurevich, S.M. (1961) Fluxes for automatic welding of titanium alloys. *Aviats. Promyshlennost*, **5**, 55–59.

References

1. Gogia, A.K. (2005) High-temperature titanium alloys. *Defence Science J.*, **55**(2), 149–173.
2. Eylon, D.S.P.J., Fujishiro, S., Postans, P.J., Froes, F.H. (1984) High-temperature titanium alloys – A review. *JOM*, **36**(11), 55–62.

HIGH-TEMPERATURE TITANIUM ALLOY TIG WELDING USING FLUXES

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

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

E-mail: selinrv@gmail.com

High-temperature titanium alloys are materials that can withstand high temperatures and maintain their mechanical properties under extreme thermal stress. The use of high-temperature titanium alloys helps to increase the efficiency of engines and reduce the weight of structures, which in turn leads to reduced fuel consumption and increased overall equipment productivity. Welding of high-temperature titanium alloys is complicated due to the presence of such alloying elements as aluminum, vanadium, molybdenum and others that increase their high-temperature properties. Silicon is one of the elements that effectively increase the high-temperature properties of titanium alloys. However, a significant defect of alloys with silicon is cold cracks in the welds, which occur at temperatures below 700 °C, when the material passes from a ductile to a brittle state. The brittleness of the weld in as-welded state, in turn, is determined by its structure and, with an increase in welding stresses during the cooling process, it leads to the appearance of defects such as cold cracks, the source of which are microcracks, dislocations, etc. In this work, a study was conducted of the influence of the additional technological operations, such as flux welding and preheating before welding, on the structure and mechanical properties of welded joints of a high-temperature titanium alloy of the Ti-6.5Al-5.3Zr-2.2Sn-0.6Mo-0.5Nb-0.75Si system. 13 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Keywords: high-temperature titanium alloy, TIG welding, preheating, welding with fluxes

Отримано 19.12.2024

Отримано у переглянутому вигляді 04.03.2025

Прийнято 08.05.2025