

СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ ПСЕВДО- β ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ПРИ TIG ЗВАРЮВАННІ

С.В. Ахонін, В. Ю. Білоус, Р.В. Селін, І.К. Петриченко

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

Конструкційні псевдо- β титанові сплави викликають великий інтерес при виготовленні складних конструкцій відповідального призначення. До цього класу сплавів відносяться сплави зі структурою, представленою однією β -фазою після гартування або нормалізації з β -області. Важливим фактором при використанні псевдо- β титанових сплавів в авіаційній та ракетній техніці є його здатність до зварювання. Зварні з'єднання сучасних псевдо- β титанових сплавів за механічними показниками повинні відповідати рівню механічних показників основного металу. У даній роботі досліджувався вплив аргонодугового зварювання, а також подальшої термічної обробки на фазовий склад, структуру та механічні властивості зварних з'єднань псевдо- β титанового сплаву. Було встановлено, що в результаті впливу термічного циклу зварювання в металі шва з'єднань псевдо- β сплаву VT19 фіксується переважно β -фаза в кількості 77 %. Застосування присадного дроту VT1-00св збільшує кількість дисперсних частинок α -фази і відповідно знижує кількість β -фази в металі шва до 60 %. В результаті впливу відпалу формується рівномірна, однорідна дрібнодисперсна двофазна ($\alpha+\beta$)-структура з показниками тимчасового опору розриву зварних з'єднань на рівні $\sigma_b = 1010$ МПа, що перевищує відповідні показники основного металу на 12 %. Бібліогр. 16, табл. 5, рис. 8.

Ключові слова: псевдо- β титанові сплави, TIG зварювання, механічні властивості

Конструкційні псевдо- β титанові сплави викликають великий інтерес при виготовленні складних конструкцій відповідального призначення. До цього класу сплавів відносяться сплави зі структурою, представленою однією β -фазою після гартування або нормалізації з β -області. Структура цих сплавів у відпаленому стані представлена α -фазою та великою кількістю β -фази. Коефіцієнт β -стабілізації таких сплавів $K_\beta = 1,4 \dots 2,4$. Вони зазнають перетворення β -фази за схемою $\beta \rightarrow (\beta+\alpha)$. У стабільному стані вони мають $(\beta+\alpha)$ -структуру [1–4].

Важливим фактором при використанні псевдо- β титанових сплавів в авіаційній та ракетній техніці є їх здатність до зварювання. Зварні з'єднання сучасних псевдо- β титанових сплавів за механічними показниками повинні відповідати рівню механічних показників основного металу [5, 6].

Найбільш широке застосування для зварювання титанових сплавів знайшло аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом (TIG зварювання). Зварювання може виконуватися як із застосуванням присадного металу, так і без нього. В якості присадного металу застосовують зварювальний дріт або прутки з титанових сплавів [7, 8]. З метою підвищення ефективності використання тепла дуги та збільшення її проплавної здатності при аргонодуговому зварюванні титану вольфрамовим електродом розроблено ряд різновидів цього способу, такі як зварювання зануреною дугою, зварювання наскрізним проплавленням, зварювання по шару флюсу. Останнє дозволяє отримати

шви високої щільності з відсутністю пор [9]. Застосування флюсів призводить до зменшення розмірів зварювальної ванни, скорочення часу існування металу в розплавленому стані та забезпечує тріщиностійкість зварних з'єднань, близьку до показників основного металу [10, 11].

Метою даної роботи є вивчення впливу TIG зварювання без і з використанням присадного дроту, TIG зварювання по шару флюсу, а також подальшої термічної обробки на фазовий склад, структуру та механічні властивості зварних з'єднань псевдо- β -титанового сплаву.

Матеріали та обладнання. Досліджуваний в роботі псевдо- β титановий сплав розроблений за допомогою теорії комплексного легування та містить, мас. %: основа – Ti; 2,5...3,5 Al; 5...6 Mo; 3...4 Y; 4...5 Cr; 0,5...1,5 Zr; не більше 0,15 Si, 0,10 C, 0,15 O₂, 0,05 N₂, 0,015 H₂ [12]. Сплав містить β -стабілізуючі елементи з коефіцієнтом розподілу більше та менше одиниці, а також з коефіцієнтом розподілу, що дорівнює одиниці. Вміст β -стабілізуючих елементів еквівалентний 13,7...17,0 % Mo при середньому вмісті, еквівалентному 15,3 % Mo. Співвідношення ізоморфних (еквівалентно 7,8 % Mo) та евтектоїдоутворюючих β -стабілізуючих елементів (еквівалентно 7,5 % Mo), виражене в еквівалентних молибдену величинах, дорівнює 1:1. Сплав виплавляється за допомогою електронно-променевого переплаву із проміжною ємністю.

Досліджувався вплив аргонодугового зварювання на властивості та структуру з'єднань псевдо- β титанового сплаву. Зокрема, виконувалося

С.В. Ахонін – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, В.Ю. Білоус – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0082-8030>, Р.В. Селін – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2990-1131>, І.К. Петриченко – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0476-3983>
© С.В. Ахонін, В.Ю. Білоус, Р.В. Селін, І.К. Петриченко, 2020

Таблиця 1. Режими TIG зварювання псевдо-β титанового сплаву VT19

Номер режиму	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Напруга на дузі U_d , В	Швидкість зварювання $v_{зв}$, м/год	Довжина дуги L_d , мм	Швидкість подачі дроту $v_{прис.др.}$, м/год	Кількість присадного дроту в металі шва, %
1	310	12	0	1	–	0
2	380	12	8	1	30	10...12
3	420	12	8	1	60	22...24
4	240	11	10	2	–	0

TIG зварювання наскрізним проплавленням без присадного дроту із застосуванням присадного дроту і по шару флюсу. Також досліджувалася подальша термічна обробка отриманих зварних з'єднань – відпал при температурі 760 °С протягом 1 год і охолодження в печі.

В якості присадного металу використовували нелегований титановий зварювальний дріт VT1-00св діаметром 2 мм. Це дозволило в невеликих межах змінювати ступінь легування металу шва. Кількість присадного металу визначалась шляхом дослідження макроструктури поперечних шліфів зварних швів.

В якості флюсу використовувався розроблений в ІЕЗ флюс АНТ-25. Він призначений для зварювання за один прохід металу товщиною 3...6 мм [13].

Зварювалися зразки розмірами 200×100×6 мм. Режими TIG зварювання псевдо-β титанового сплаву VT19 наведено в табл. 1. Приклад поперечного макрошліфу зварного з'єднання наведено на рис. 1.

Розрахунок кількості присадного металу в металі зварного шва виконували за результатами досліджень отриманих поперечних макрошліфів. Встановлено, що при зварюванні на режимі 2 кількість дроту в металі зварного шва становить 10...12 %. Відповідно при зварюванні на режимі 3 кількість присадного металу VT1-00 в металі зварного шва

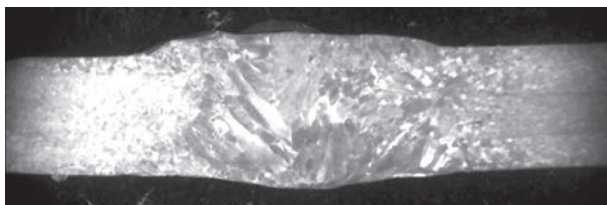


Рис. 1. Поперечний макрошліф зварного з'єднання псевдо-β титанового сплаву VT19, виконаний TIG зварюванням із застосуванням присадного дроту

становить 22...24 % [14]. Структури приведені в середині зразка товщиною 6 мм. Визначення кількості β-фази в металі шва, зоні термічного впливу (ЗТВ) і в основному металі виконувалось на мікрошліфах і засноване на тому, що різні фази протравлюються та фарбуються неоднаково. Так, β-фаза має на мікрошліфах світлий колір, α- та α'-фаза – темний колір. За результатами травлення можна виявити форму та розміри окремих зерен, кількість β-фази в залежності від місця розташування ділянки та термічних умов їх формування.

Результати. Аргонодугове зварювання наскрізним проплавленням без присадного дроту. Метал шва з'єднань, виконаних TIG зварюванням без присадного дроту на режимі 1 (див. табл. 1), складається з рівновісних і витягнутих у напрямку тепловідводу зерен β-фази, волосоподібні границі яких проявляються на фоні дендритної структури (рис. 2, а). Кількість β-фази на цій ділянці становить 77 %. Зона сплавлення (рис. 2, б) розташовується на відстані 5,4 мм від осі шва, праворуч – зерна шва на фоні дендритної структури, зліва – рівновісні β-зерна ділянки ЗТВ у зоні сплавлення. Кількість β-фази на цій ділянці становить 81 %. Безпосередньо в зоні сплавлення видно частково оплавлені зерна, що належать одночасно як до металу ЗТВ, так і до металу шва.

Ділянка ЗТВ, де сталося під час зварювання повне поліморфне перетворення, складається з рівновісних β-зерен (рис. 3, а), має ширину 4,75 мм. Кількість β-фази знаходиться на рівні 80 %. Ділянка ЗТВ, де спостерігається неповне поліморфне перетворення, має ширину 2,5 мм (рис. 3, б), в β-зернах присутні частки інших фаз, які зустрічаються в основному металі, зокрема α-фази. Кількість β-фази – 75 %.

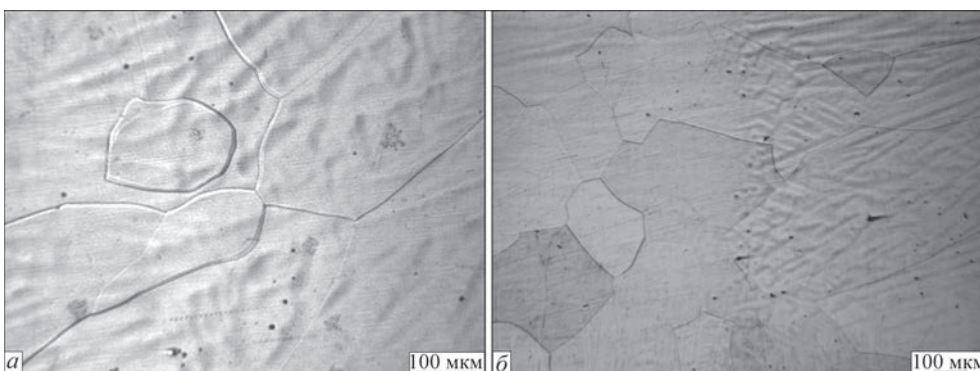


Рис. 2. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання псевдо-β титанового сплаву VT19, виконаного TIG зварюванням без застосування присадного дроту на режимі 1: а – центр шва; б – зона сплавлення

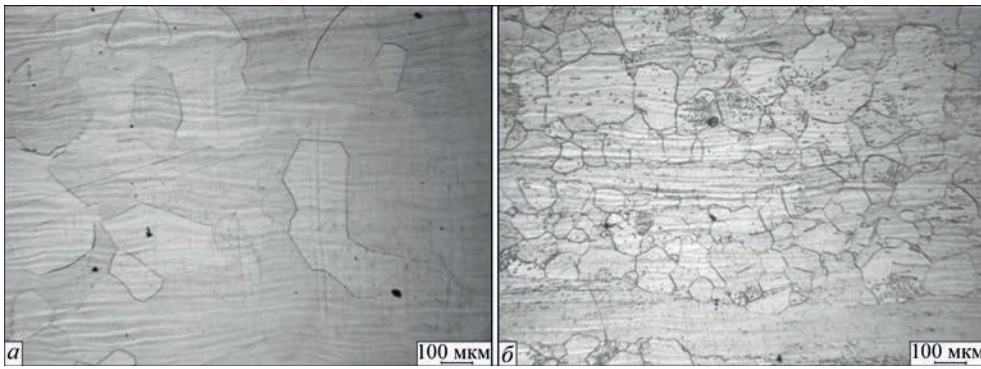


Рис. 3. Мікроструктура металу ЗТВ зварного з'єднання псевдо- β титанового сплаву VT19, виконаного TIG зварюванням без застосування присадного дроту на режимі 1: *a* – ділянка повного поліморфного перетворення; *b* – зона неповного поліморфного перетворення

На межі переходу від ділянки неповного поліморфного перетворення до основного металу кількість β -фази становить 57 %. В основному металі кількість β -фази становить 31 %.

Таким чином, дослідження мікроструктури показало, що в металі зварного з'єднання, виконаного без присадного дроту, фіксується переважно β -фаза в кількості 77 %, а в різних ділянках ЗТВ варіюється від 75 до 80 %. Для розпаду утворених метастабільних фаз і забезпечення рівномірності зварні з'єднання, виконані без присадного дроту, необхідно піддавати в подальшому термічній обробці – відпалу.

Аргонодугове зварювання наскрізним пропаленням із застосуванням присадного дроту VT1-00св. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання псевдо- β титанового сплаву VT19, виконаного TIG зварюванням на режимі 2 (див. табл. 1), представлена на рис. 4, *a*. Метал шва має дендритну структуру, на фоні якої утворилися зерна β -фази, витягнуті в напрямку відводу тепла. У β -зернах спостерігаються дисперсні частинки α -фази розміром близько 1 мкм і менше, розподіл таких частинок в обсязі зерна – нерівномірний. Кількість β -фази в металі шва становить 69,1 %.

Мікроструктура металу шва зварного з'єднання псевдо- β титанового сплаву VT19, виконаного на режимі 3 (див. табл. 1), представлена в стані після зварювання на рис. 4, *b*. Метал шва складається переважно з β -фази, границі якої проявляються на фоні

дендритної структури. У структурі металу шва також спостерігаються дисперсні виділення α -фази розміром близько 1 мкм. Найбільш висока щільність таких виділень – у верхній частині шва поблизу зони сплаву, тут розмір деяких частинок досягає 2...3 мкм. Кількість β -фази в металі шва становить 60,3 %.

Мікроструктура металу ЗТВ зварних з'єднань сплаву VT19, виконаних із застосуванням присадного дроту VT1-00 на режимах 2 і 3, подібна до структури цієї зони в з'єднаннях, виконаних без застосування присадного дроту VT1-00 на режимі 1.

Таким чином, в зварних з'єднаннях, виконаних із застосуванням присадного дроту, кількість дисперсних частинок α -фази збільшується і їх розмір збільшується до 2...3 мкм у швах з 20 % дроту VT1-00св. Збільшенню щільності та розміру часток дисперсної фази сприяв температурний режим в процесі зварювання та охолодження. Кількість β -фази в металі швів знизилась до 60 % за рахунок розлегуння металу шва і ЗТВ [15].

Аргонодугове зварювання по шару флюсу. Мікроструктура металу шва та навколошовної зони зварного з'єднання, виконаного зі швидкістю зварювання 10 м/год (режим 4, див. табл. 1) наведено на рис. 5. Метал шва складається з рівновісних та нерівновісних зерен β -фази з тонкими границями, на фоні дендритної структури, метал навколошовної зони складається з рівновісних зерен β -фази.

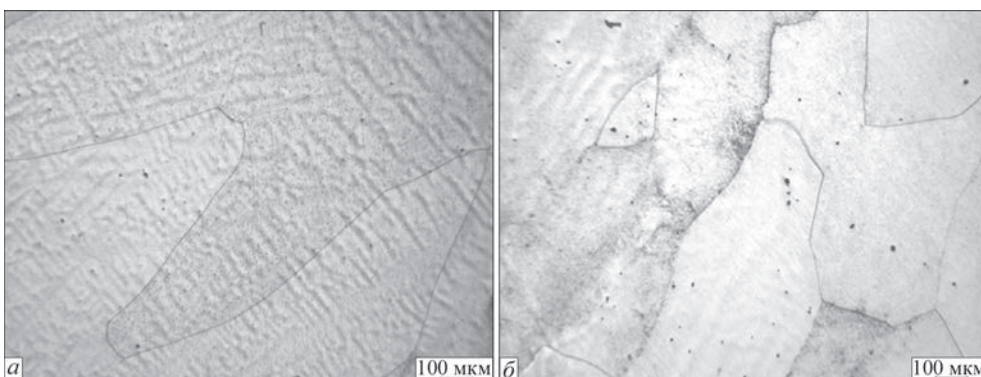


Рис. 4. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання псевдо- β титанового сплаву VT19, виконаного TIG зварюванням з присадним дротом VT1-00: *a* – на режимі 2; *b* – на режимі 3

Метал шва та навколошовної зони ЗТВ зразків 1, 2, 3 і 4, відрізняючись параметрами та конфігурацією зон, напрямком росту кристалітів, має ідентичну мікроструктуру, що складається із зерен β -фази. Кількість β -фази в металі шва становить 60...70 % для зразків 2 і 3, 77 % для зразка 1 та 97 % для зразка 4 (табл. 2).

Аналіз механічних властивостей зварних з'єднань (табл. 3) показує, що найменшу міцність та ударну в'язкість мають зварні з'єднання, виконані ТІГ зварюванням без присадного дроту по шару флюсу, на режимах 1 і 4, де $\sigma_b = 860$ МПа та $\sigma_{\text{в}} = 857$ МПа, відповідно. Таким чином, застосування флюсів при ТІГ зварюванні не має особливого впливу на міцність та ударну в'язкість зварних з'єднань, а сприяє збільшенню вмісту β -фази в металі шва за рахунок зменшення погонної

енергії та збільшення швидкості охолодження металу шва.

Найбільшу міцність мають з'єднання, виконані із застосуванням присадного дроту ВТ1-00св на режимах які забезпечують кількість металу ВТ1-00 в металі шва на рівні 22...24 % (режим 3, табл. 1).

З'єднання, виконані із застосуванням присадного дроту ВТ1-00св, в якому вміст металу ВТ1-00 у шві знаходиться на рівні 10...12 %, мають проміжні значення міцності. Це пояснюється великим вмістом β -фази в металі шва в з'єднаннях, виконаних без застосування присадного дроту. Метастабільна β -фаза має низьку міцність, тому зварні з'єднання мають низькі показники міцності.

Ударна в'язкість зразків з гострим надрізом КСЧ металу шва зварних з'єднань, виконаних із застосуванням присадного дроту ВТ1-00св із швидкістю подачі на режимі, який забезпечує вміст металу ВТ1-00 у шві на рівні 22...24 %, також максимальна та становить 32 Дж/см².

Таким чином, досліджено властивості зварних з'єднань псевдо- β сплаву ВТ19, виконаних аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом, як без присадного дроту, так і з застосуванням присадного дроту ВТ1-00св та встановлено, що з'єднання, виконані із застосуванням присадного дроту ВТ1-00св в кількості 22 % рівномірно основному металу, а кількість β -фази в металі шва знижується з 77 до 60 %. Для забезпечення рівномірної структури, розпаду метастабільних фаз і

Таблиця 2. Кількість β -фази в основному металі та металі шва зварних з'єднань титанового сплаву ВТ19, виконаних ТІГ зварюванням

Номер зразка	Тип зразка, швидкість зварювання, присадний матеріал	Кількість β -фази, %
Основний метал		55,7
1	Зварне з'єднання, 10 м/год, без присадки	77,1
2	Зварне з'єднання, 8 м/год, кількість присадки 10 %	69,1
3	Зварне з'єднання, 8 м/год, кількість присадки 22 %	60,3
4	Зварне з'єднання по шару флюсу, 10 м/год, без присадки	97,2

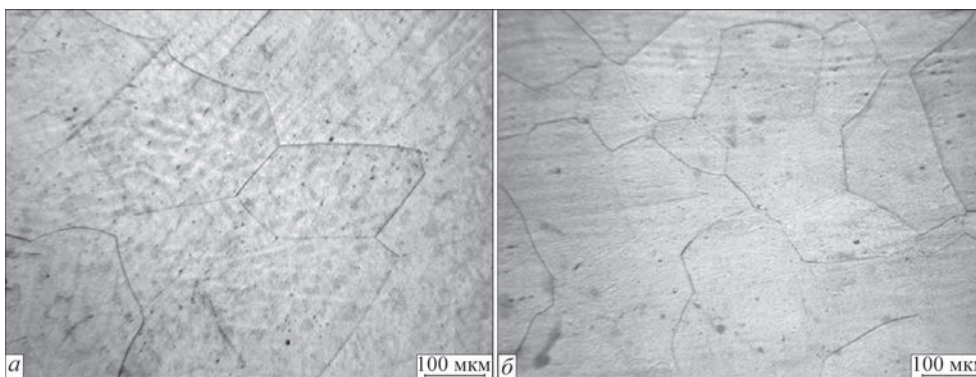


Рис. 5. Мікроструктура металу шва (а) і навколошовної зони (б) зварного з'єднання псевдо- β титанового сплаву ВТ19, виконаного ТІГ зварюванням (режим 4) вольфрамовим електродом по шару флюсу

Таблиця 3. Механічні властивості зварних з'єднань титанового псевдо- β сплаву ВТ19

Номер режиму	Тип зразка, стан	Тимчасовий опір розриву σ_b , МПа	Межа плинності σ_p , МПа	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження Ψ , %	Ударна в'язкість КСЧ, Дж/см ²	
						шов	ЗТВ
ОМ		887	958	12	42	22	
1	Після зварювання	860	839	13,3	60	19	22
2	Після зварювання	895	868	7,3	25,4	28	26
3	Після зварювання	963	942	6	24,5	32	24
4	Після зварювання	857	815	13,3	55	14	26

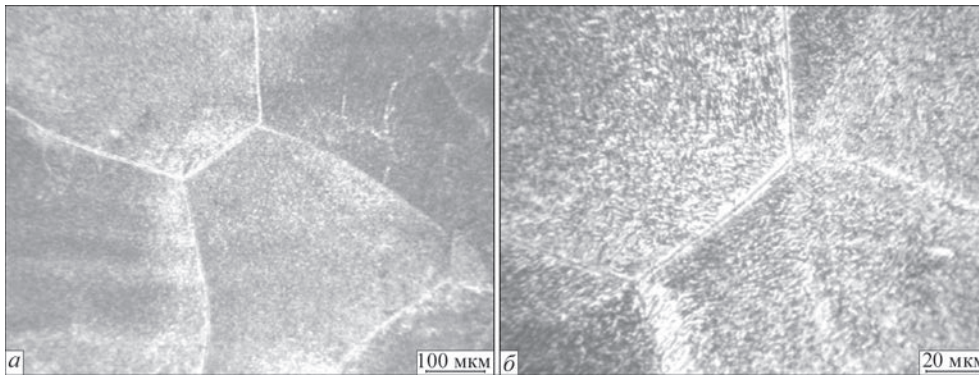


Рис. 6. Мікроструктура металу ЗТВ (а) зварного з'єднання псевдо-β титанового ВТ19, виконаного аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом наскрізним проплавленням в стані після відпалу 760 °С, б – внутрішньозеренна структура

отримання рівномірності з'єднань, виконаних без застосування технічного титану ВТ1-00 як присадного матеріалу і в результаті розлегування металу шва з'єднання необхідно піддавати у подальшому термічній обробці [16].

В якості термічної обробки обрано відпал, який передбачає нагрів до температури 750...760 °С, витримку та подальше охолодження в печі.

Отримана після термообробки мікроструктура металу ЗТВ зварного з'єднання на режимі 1 (без застосування флюсу або присадного дроту) представлена на рис. 6.

Метал ЗТВ складається з рівновісних полієдричних зерен із рівномірною однорідною двофазною (α+β)-структурою всередині зерна. Внутрішньозеренна структура металу ЗТВ складається з пластинчастої α-фази довжиною 2...5 мкм і товщиною до 1 мкм, між якими розташовуються дисперсні частинки α- і β-фази, розмір яких становить менше 1 мкм. У деяких зернах у β-матриці виділяються дисперсні глобулярні частинки розміром до 1 мкм. Мікроструктура металу шва даного зварного з'єднання представлена на рис. 7. Метал шва зварного з'єднання складається переважно з нерівновісних, витягнутих у напрямку тепловідводу первинних β-зерен (рис. 7, а) з дуже дрібною внутрішньозеренною структурою, що утворилася після розпаду метастабільних фаз (в основному β-фази) в результаті відпалу цього зварного

з'єднання при температурі 760 °С протягом 1 год (рис.7, б).

Після стабілізації структури металу шва сформувалася рівномірна, однорідна для всього шва дрібнодисперсна двофазна (α+β)-структура. Пластини α-фази мають довжину 2...4 мкм і товщину близько 0,5 мкм, дисперсні глобулярні частинки – розміром 0,5...1 мкм і менше. Уздовж границь зерен спостерігається суцільна або переривчаста α-оторочка шириною 1,0...1,5 мкм. Дрібнодисперсна структура металу шва може забезпечувати йому високу міцність.

Для порівняння, мікроструктура металу шва зварного з'єднання псевдо-β титанового сплаву ВТ19, виконаного аргонодуговим зварюванням наскрізним проплавленням із присадним дротом ВТ1-00св на режимах, що забезпечують вміст металу ВТ1-00 у шві на рівні 22...24 % представлена на рис. 8. Метал шва складається з витягну-

Таблиця 4. Кількість β-фази в основному металі та металі зварних з'єднань сплаву ВТ19

Тип зразка	Стан зразка	Кількість β-фази, %
Основний метал	Після відпалу 760 °С, 1 год, охолодження з пиччу	22,98
Метал шва без присадки, після відпалу	Після відпалу 760 °С, 1 год, охолодження з пиччу	43,72
Метал шва з присадкою ВТ1-00св, вміст у шві 22...24 %	Після відпалу 760 °С, 1 год, охолодження з пиччу	29,87

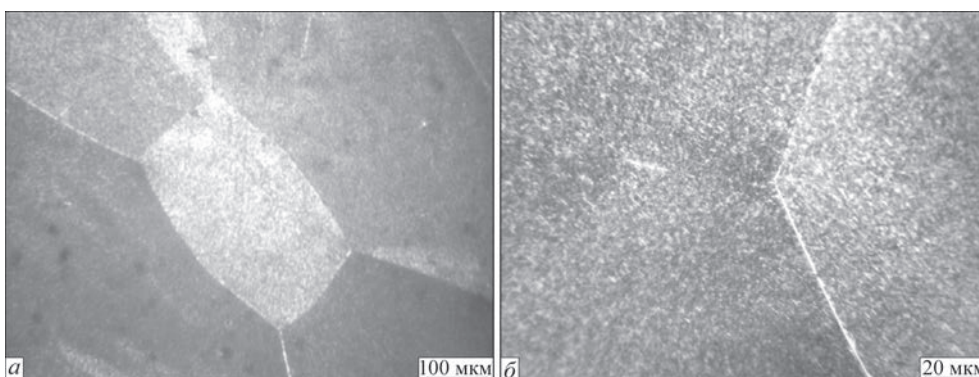


Рис. 7. Мікроструктура металу шва зварного (а) з'єднання псевдо-β титанового ВТ19, виконаного аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом наскрізним проплавленням в стані після відпалу 760 °С, б – внутрішньозеренна структура

Таблиця 5. Механічні властивості зварних з'єднань титанового псевдо- β сплаву VT19, виконаних аргонодуговим зварюванням (АДЗ) в стані після відпалу 760 °С, 1 год охолодження з піччю

Тип зразка	Тимчасовий опір розриву σ_b , МПа	Межа пластичності σ_p , МПа	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження Ψ , %	Ударна в'язкість КСЧ, Дж/см ²
АДЗ без присадки	981	946	9,7	15,3	29,4
АДЗ із присадним дротом VT1-00св, в кількості 22...24 %	1011	989	9,1	15,1	25,9

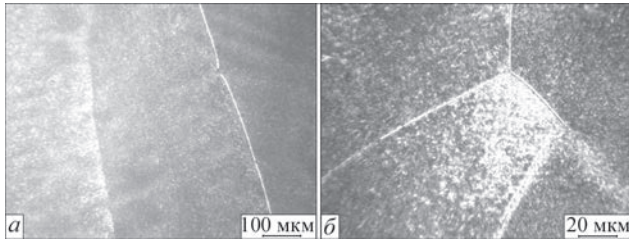


Рис. 8. Мікроструктура металу шва (а) зварного з'єднання псевдо- β титанового VT19, виконаного аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом наскрізним проплавленням із застосуванням присадного дроту VT1-00 (вміст в шві 22...24 %) в стані після відпалу 760 °С, б – внутрішньозеренна структура

тих в напрямку тепловідводу первинних β -зерен (рис. 8, а) з двофазною внутрішньозеренною структурою, що складається з дисперсних α - і β -фаз (рис. 8, б). Товщина частинок α -фази менше 1 мкм при довжині 0,7...5 мкм. На границях β -зерен присутня α -оторочка шириною до 2 мкм.

Застосування присадного дроту при аргонодуговому зварюванні сплаву VT19 дозволяє знизити вміст β -фази в металі шва та в стані після відпалу. Так, після відпалу в металі швів, виконаних із застосуванням VT1-00 в кількості 22 % містять β -фазу на рівні 30 % (табл. 4). У швах без застосування присадного дроту кількість β -фази фіксується після відпалу на рівні 43 %.

Таким чином, після відпалу в металі шва сформувалася рівномірна, однорідна для всього шва дрібнодисперсна двофазна ($\alpha+\beta$)-структура з пластинами α -фази довжиною 2...4 мкм і товщиною 0,5 мкм, уздовж границь зерен сформувалася α -оторочка шириною 1,0...1,5 мкм. Дрібнодисперсна структура металу шва забезпечує йому високу міцність. У металі шва, виконаного із застосуванням присадного дроту VT1-00св в кількості 20 %, розмір часток α -фази більше – товщина частинок α -фази близько 1 мкм при довжині 0,7...5 мкм. У металі ЗТВ товщина α -фази внаслідок відпалу збільшилася до 1,5...2,0 мкм.

Вивчення механічних властивостей зварних з'єднань титанового псевдо- β сплаву VT19, виконаних аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом як без присадного дроту, так і з застосуванням присадного дроту VT1-00св показало, що як і в стані після зварювання, так і в стані після відпалу 760 °С найнижчі значення міцності мають з'єднання, виконані без присадного дроту (табл. 5).

Однак ступінь зміцнення внаслідок відпалу у з'єднань різна. Так, з'єднання, виконані аргонодуговим зварюванням наскрізним проплавленням, після відпалу зміцніли на 120 МПа, а виконані із застосуванням присадного дроту, зміцніли на 48 МПа. У подальших дослідженнях буде доцільно вивчити вплив зміцнюючої термічної обробки на структуру та властивості зварних з'єднань з псевдо- β титанового сплаву VT19.

Висновки

1. За результатами впливу термічного циклу зварювання в металі шва з'єднань псевдо- β -сплаву VT19, виконаних ТІГ зварюванням без застосування присадного дроту, фіксується переважно β -фаза, в β -зернах спостерігаються дисперсні частинки α -фази розміром близько 1 мкм, а кількість β -фази в металі зварних з'єднань максимальна і становить 77 %.

2. У зварних швах псевдо- β сплаву VT19, виконаних ТІГ зварюванням із застосуванням присадного дроту VT1-00св в кількості 10 і 20 %, кількість дисперсних частинок α -фази збільшується та їх розмір збільшується до 2...3 мкм у швах з 20 % дроту VT1-00св, а кількість β -фази в металі швів знижується до 60 %.

3. З'єднання сплаву VT19, виконані ТІГ зварюванням із застосуванням присадного дроту VT1-00св в кількості 22 %, мають показники тимчасового опору розриву на рівні $\sigma_b = 965$ МПа і рівномічні основному металу. З'єднання сплаву VT19, виконані аргонодуговим зварюванням без застосування присадного матеріалу, мають показники тимчасового опору розриву на рівні $\sigma_b = 860$ МПа, для розпаду метастабільних фаз і забезпечення рівномічності цих з'єднань їх необхідно піддавати подальшій термічній обробці – відпалу.

4. В результаті впливу відпалу при температурі 760 °С в металі з'єднань сплаву VT19, виконаних аргонодуговим зварюванням, формується рівномірна, однорідна дрібнодисперсна двофазна ($\alpha+\beta$)-структура з пластинами α -фази довжиною 2...4 мкм і товщиною 0,5 мкм з показниками тимчасового опору розриву зварних з'єднань на рівні $\sigma_b = 980$ МПа. З'єднання сплаву VT19, виконані аргонодуговим зварюванням із застосуванням присадного дроту VT1-00св на режимах, що забезпечують вміст присадного металу в шві 22...24 %

після відпалу 760 °С мають показники тимчасового опору розриву на рівні $\sigma_b = 1010$ МПа.

Список літератури / References

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник*. Москва, ВИЛС-МАТИ.
- Iiin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties: Refer. book*. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
2. Хорев А.И. (2012) Создание титанового β -сплава VT19 на основе комплексного легирования. *Вестник машиностроения*, 7, 69–71.
- Khorev, A.I. (2012) Development of titanium β -alloy VT19 on the base of complex alloying. *Vestnik Mashinostroeniya*, 7, 69-71 [in Russian].
3. Хорев А.И. (2012) Сверхпрочный титановый сплав VT19. *Технология машиностроения*, 6, 2–5.
- Khorev, A.I. (2012) Titanium superalloy VT 19. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 6, 2-5 [in Russian].
4. Моисеев В.Н. (1998) Бета-титановые сплавы и перспективы их развития. *МТМ*, 12, 11–14.
- Moiseev, V.N. (1998) β -titanium alloys and prospects of their development. *Metal Science and Heat Treatment*, 12, 11–14 [in Russian].
5. Хорев А.И. (2002) Титан – это авиация больших скоростей и космонавтика. *Технология легких сплавов*, 4, 92–97.
- Khorev, A.I. (2002) Titanium is a high-speed aviation and cosmonautics. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 4, 92-97 [in Russian].
6. Cui C., Hu B., Zhao L., Liu, S. (2011) Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. *Materials&Design*, 32, 3, 1684–1691.
7. Блашук В.Е., Шеленков Г.М. (2005) Сварка плавлением титана и его сплавов (Обзор). *Автоматическая сварка*, 2, 35–42
- Blashchuk, V.E., Shelenkov, G.M. (2005) Fusion welding of titanium and its alloys (Review). *The Paton Welding J.*, 2, 35-42.
8. Patel N.S., Patel R.B. (2014) A review on parametric optimization of TIG welding. *International Journal of Computational Engineering Research*, 4, 1, 27–31.
9. Huang J.L., Warnken N., Gebelin J.C. (2012) On the mechanism of porosity formation during welding of titanium alloys. *Acta Materialia*, 60, 6-7, 3215–3225.
10. Замков В.Н., Прилуцкий В.П. (2004) Теория и практика TIG-F сварки (A-TIG) (Обзор). *Автоматическая сварка*, 9, 11–14.
- Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. (2004) Theory and practice of TIG-F (A-TIG) welding (Review). *The Paton Welding J.*, 9, 11-14.
11. Dey H.C., Albert S.K., Bhaduri A.K., Mudali U.K. (2013) Activated flux TIG welding of titanium. *Welding in the world*, 57, 6, 903–912.
12. Костин К.В., Петунин П.В., Боязитов Р.Б., Кудрявцев И.А. (2016) Влияние комплексного легирования на повышение механических свойств и прочности титановых сплавов. *Омский научный вестник*, 4(148), 45–47.
- Kostin, K.V. et al. (2016) Influence of complex alloying on improvement of mechanical properties and strength of titanium alloys. *Omsky Nauchny Vestnik*, 4(148), 45–47.
13. Гуревич С.М., Замков В.Н., Прилуцкий В.П. и др. (1974) *Сварочный флюс. СССР. А.с. 439363*.
- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. et al. *Welding flux. USSR author's cert. 439363* [in Russian].
14. Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Петриченко И.К., Селин Р.В. (2016) Влияние присадочного металла на структуру и свойства сварных соединений высокопрочных двухфазных титановых сплавов, выполненных аргонодуговой сваркой. *Автоматическая сварка*, 1, 42–46.
- Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Petrichenko, I.K., Selin, R.V. (2016) Influence of filler metal on structure and properties of welded joints of high-strength two-phase titanium alloys produced using argon arc welding. *The Paton Welding J.*, 1, 39–43.
15. Akhonin, S.V., Belous, V.Y., Berezos, V.A., Selin, R. V. (2018) Effect of TIG welding on the structure and mechanical properties of the pseudo- β -titanium alloy VT19 welded joints. *Mat. Sci. Forum*, 927, 112-118.
16. Hryhorenko, S.G., Achonin, S.W., Belous, W.J., Selin, R.W. (2016) Heat treatment effect on the structure and properties of electron beam welded joints made of high-alloy titanium. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 60(5), 90-95.

IMPACT OF TIG WELDING ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF JOINTS OF PSEUDO-B-TITANIUM ALLOY

S.V. Akhonin, V.Yu. Bilous, R.V. Selin, I.K. Petrichenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Structural pseudo- β -titanium alloys attract a lot of interest in fabrication of critical structures. This alloy class includes alloys with the structure represented by one β -phase after hardening or normalizing in the β -region. The alloy weldability is an important factor at application of pseudo- β -titanium alloys in aircraft and rocket engineering. By their mechanical characteristics, the welded joints of modern pseudo- β -titanium alloys should match the level of base metal mechanical properties. In this work, the impact of argon arc welding, as well as further heat treatment on the phase composition, structure and mechanical properties of welded joints of pseudo- β -titanium alloy was studied. It was established that as a result of the impact of thermal cycle of welding predominantly β -phase in the amount of 77% is recorded in the weld metal of joints of pseudo- β -alloy V19. Application of VT1-00sv filler wire enhances the quantity of dispersed α -phase particles and reduces the quantity of β -phase in the weld metal to 60%, respectively. Annealing results in formation of a uniform, homogeneous finely-dispersed two-phase ($\alpha+\beta$)-structure with ultimate tensile strength values of welded joints on the level of $\sigma_t = 1010$ МПа, that exceed the respective base metal values by 12%. 16 Ref., 5 Tabl., 8 Fig.

Keywords: pseudo- β -titanium alloys, TIG welding, mechanical properties

Надійшла до редакції
07.11.2020