

## ВПЛИВ ПРИСАДНОГО МАТЕРІАЛУ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT19

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

Досліджено вплив присадного матеріалу на властивості і структуру з'єднань титанового псевдо- $\beta$ -сплаву VT19, отриманих аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом. Встановлено, що в металі шва всіх з'єднань псевдо- $\beta$ -сплаву VT19 фіксується переважно  $\beta$ -фаза в кількості 60...77%. З'єднання сплаву VT19, виконані аргонодуговим зварюванням із застосуванням присадного дроту VT1-00св у кількості 20%, мають показники тимчасового опору розриву на рівні 965 МПа і перевершують міцність основного металу. Для формування однорідної структури з'єднань необхідно застосування післязварювального відпалу. В результаті впливу відпалу при температурі 760 °С в металі з'єднань, виконаних аргонодуговим зварюванням сплаву VT19, формується рівномірна, однорідна, дрібнодисперсна, двофазна ( $\alpha+\beta$ )-структура з показниками тимчасового опору розриву зварних з'єднань на рівні 980 МПа. Бібліогр. 17, табл. 3, рис. 9.

*Ключові слова:* титан; титанові сплави; зварні з'єднання; псевдо- $\beta$ -сплав; VT19; зварювання; вольфрамовий електрод; флюс; термічна обробка; відпал; мікроструктура; механічні властивості

**Вступ.** Конструкційні псевдо- $\beta$ -титанові сплави є одними з найбільш перспективних металевих матеріалів [1, 2]. Однією з переваг сучасних титанових псевдо- $\beta$ -сплавів є їх висока технологічність, що дозволяє проводити деформацію при більш низьких зусиллях і температурах [3, 4], ніж традиційних жароміцних і високоміцних сплавів з псевдо- $\alpha$ - і  $\alpha+\beta$ -структурою [5]. До таких сплавів відноситься титановий псевдо- $\beta$ -сплав VT19 [6]. Однак саме для таких сплавів вплив термічного циклу зварювання плавленням істотно знижує міцність і пластичність з'єднання.

Зварювання високоміцних титанових псевдо- $\beta$ -сплавів ускладнено у зв'язку з високим вмістом в них легуючих елементів [7, 8]. Крім того ці сплави в порівнянні з  $\alpha$ - і  $(\alpha+\beta)$ -сплавами більш чутливі до домішок впровадження (кисню, азоту, вуглецю), так як розчинність останніх в ОЦК решітці  $\beta$ -фази титану значно нижче. Вони більш схильні до розвитку в процесі зварювання хімічної і фізичної неоднорідності в литому металі і ЗТВ, в результаті чого можливе утворення крихких прошарків [9]. Висока вартість і складність виготовлення експериментальних присадних матеріалів для зварювання високоміцних титанових псевдо- $\beta$ -сплавів вимагають досліджень з можливості забезпечувати необхідний рівень міцності з'єднань за рахунок зміни хімічного складу металу шва, а саме зменшення ступеня легування металу шва [10, 11].

Аргонодугове зварювання титану плавким електродом в аргоні (MIG) має ряд технологічних

недоліків, таких як значне розбризкування присадного матеріалу і пов'язані з цим складнощі з забезпеченням якісного захисту зварного з'єднання [12]. Найбільш широке застосування для зварювання титанових сплавів знайшло аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом (АДЗ або TIG). Цей спосіб зварювання є найбільш дешевим і універсальним, оскільки дозволяє виконувати з'єднання в різних просторових положеннях в умовах обмеженого простору і не вимагає переналадження обладнання при зміні товщини зварюваного виробу і типу з'єднання [13]. АДЗ може виконуватися як з застосуванням присадного металу, так і без нього, в якості присадного металу застосовують зварювальні дроти або прутки з титанових сплавів [14].

Таким чином, для встановлення впливу присадного матеріалу на властивості і структуру з'єднань титанового псевдо- $\beta$ -сплаву VT19 доцільно порівняти властивості з'єднань, отриманих аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом як з додаванням присадного матеріалу в шов, так і без присадки.

**Методика досліджень.** Виплавку зливків експериментального титанового псевдо- $\beta$ -сплаву VT19 проведено на багатоцільовій лабораторній електронно-променевої установці UE-208M [15]. Зливки круглого перетину діаметром 110 мм отримували за технологією електронно-променевого плавлення з проміжною ємністю (ЕПП) і порційною подачею рідкого металу в водоохолоджуваній кристалізатор

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

Таблиця 1. Режими одностороннього АДЗ наскрізним проплавленням титанового псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19

Режим	Струм зварювання ( $I_{зв}$ ), А	Напруга на дузі ( $U_d$ ), В	Швидкість зварювання ( $v_{зв}$ ), м/год	Швидкість подачі присадного дроту ( $v_{прис.др.}$ ), м/год	Кількість присадного металу в металі шва, %	Витрата аргону ( $Q$ ), л/хв		
						Пальник	Сапог	Піддув
1	310	12	10	–	0	18	22	6
2	380	–»–	8	30	10...12	–»–	–»–	–»–
3	420	–»–	–»–	60	22...24	–»–	–»–	–»–
4*	220А	11	10	–	0	–»–	–»–	–»–

\*Режим зварювання із використанням флюсу.

з наступною гарячою деформаційною обробкою на реверсивному прокатному ДУО-стані Skoda 355/500 в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [16]. Виконували автоматичне аргондугове зварювання вольфрамовим електродом наскрізним проплавленням з'єднань товщиною 6 мм як без подачі, так і з подачею присадного дроту в зварювальну ванну. З'єднання збирали без розкриття кромки. Зварювали зразки розмірами  $200 \times 100 \times 6$  мм на режимі 1 та 4 без додавання присадного дроту (табл. 1). Присадний дріт — нелегований титан ВТ1-00св діаметром 2 мм. При АДЗ по шару флюсу (режим 4) довжина дуги становить 2 мм, товщина слою флюсу марки АНТ 25 — 0,1...0,2 мм. За рахунок контрагування дуги і металу розплавленим флюсом втрати тепла в навколишнє середовище менші, ніж при звичайному зварюванні поверхневою дугою, що підвищує коефіцієнт використання тепла дуги та дозволяє на 35 % знизити повну погонну енергію процесу зварювання з 1339 для режиму 1 до 871,2 кДж/м для режиму 2.

Розрахунок кількості присадного металу в металі зварного шва при зварюванні за режимами 2 та 3 виконували за результатами дослідження отриманих поперечних макрошліфів (рис. 1). За результатами проведених досліджень встановлено, що при швидкості подачі присадного дроту ВТ1-00св діаметром 2 мм 60 м/год і швидкості зварювання 8 м/год кількість присадного металу

ВТ1-00 в металі зварного шва становить 22...24 %. При швидкості подачі присадного дроту 30 м/год кількість присадного металу ВТ1-00 в металі зварного шва знаходиться на рівні 10...12 %.

**Результати досліджень.** Мікроструктура зварного шва, виконаного наскрізним проплавленням без застосування присадного дроту на режимі 1, представлена на рис. 2. Метал шва представлений переважно витягнутими в напрямку тепловідводу  $\beta$ -зернами, перпендикулярними до осі шва (рис. 2, а) на тлі дендритної структури (рис. 2, б).

Метал ЗТВ зварних швів, виконаних за режимами 1–3 та 4 має однакову структуру. Метал ЗТВ, який нагрівався вище температури поліморфного перетворення ( $T_{\text{мп}}$ ), складався з рівновісних полідрічних зерен  $\beta$ -фази (рис. 3, а). В ділянці ЗТВ, що примикає до основного металу (ОМ) і де температура не перевищувала  $T_{\text{мп}}$  сплаву, на тлі  $\beta$ -фази спостерігали частинки  $\alpha$ -фази, кількість яких зменшувалася по мірі віддалення від ОМ (рис. 3, б). В ділянці ЗТВ, що не нагрівалася при зварюванні вище  $T_{\text{мп}}$ , ланцюжки рівновісних зерен  $\beta$ -фази чергуються з шарами масивної  $\beta$ -фази, витягнутої в напрямку прокату (рис. 3, в, г). В об'ємі зерен присутня пластинчаста  $\alpha$ -фаза довжиною 2...20 мкм, товщиною 1,0...1,5 мкм, а також дисперсна  $\alpha$ -фаза розміром до 1 мкм.

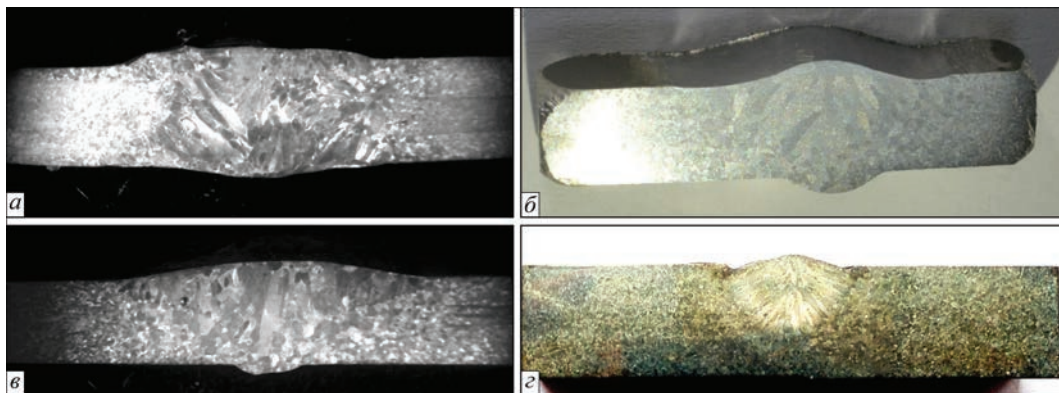


Рис. 1. Поперечні макрошліфи зварних з'єднань титанового псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19, виконаних АДЗ наскрізним проплавленням: а — без застосування присадного дроту (режим 1); б — з використанням (10 %) присадного дроту (режим 2); в — з використанням (22 %) присадного дроту (режим 3); г — по шару флюсу без застосування присадного дроту (режим 4)

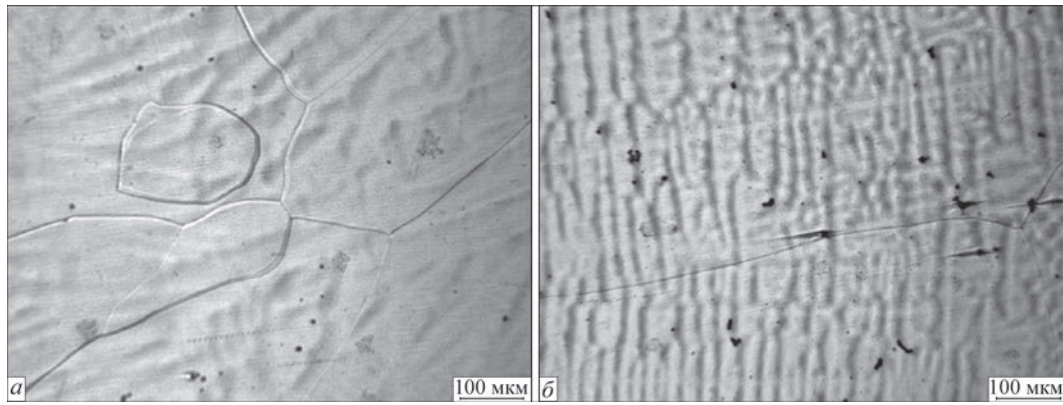


Рис. 2. Мікроструктура металу шва з'єднання псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19, виконаного АДЗ наскрізним проплавленням (режим 1), в стані після зварювання

Мікроструктура металу шва зварного з'єднання титанового псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19, виконаного АДЗ наскрізним проплавленням з подачею присадного дроту ВТ1-00св зі швидкістю 30 м/год на режимі, який забезпечує вміст ВТ1-00 в шві на рівні 10 %, в стані після зварювання представлена на рис. 4. Метал шва має дендритну структуру, на тлі якої утворилися зерна  $\beta$ -фази, витягнуті в напрямку відводу тепла (рис. 4, а). В  $\beta$ -зернах спостерігаються дисперсні частинки  $\alpha$ -фази розміром близько 1 мкм і менше (рис. 4, в, г), розподіл яких в об'ємі зерна не рівномірний (рис. 4, б, г). Мікроструктура металу ЗТВ зварного з'єднання сплаву ВТ19, виконаного із застосуванням присадного дроту ВТ1-00 зі швидкістю 60 м/год, подібна мікроструктурі цієї зони в зварному з'єднанні спла-

ву ВТ19, виконаному АДЗ без застосування присадного дроту ВТ1-00.

Мікроструктура металу шва зварного з'єднання титанового псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19, виконаного АДЗ наскрізним проплавленням з подачею присадного дроту ВТ1-00св зі швидкістю 60 м/год на режимах зварювання, які забезпечують вміст ВТ1-00 в шві 22 %, представлена в стані після зварювання на рис. 5. Метал шва складається переважно з  $\beta$ -фази, границі якої виявляються на тлі дендритної структури (рис. 5, а), присутні численні ямки травлення, що локалізуються в міждендритних проміжках (рис. 5, а, б, г). Іноді їх можна ідентифікувати з дисперсними виділеннями  $\alpha$ -фази розміром приблизно 1 мкм (рис. 5, г). Найбільш висока щільність таких виділень у верхній частині

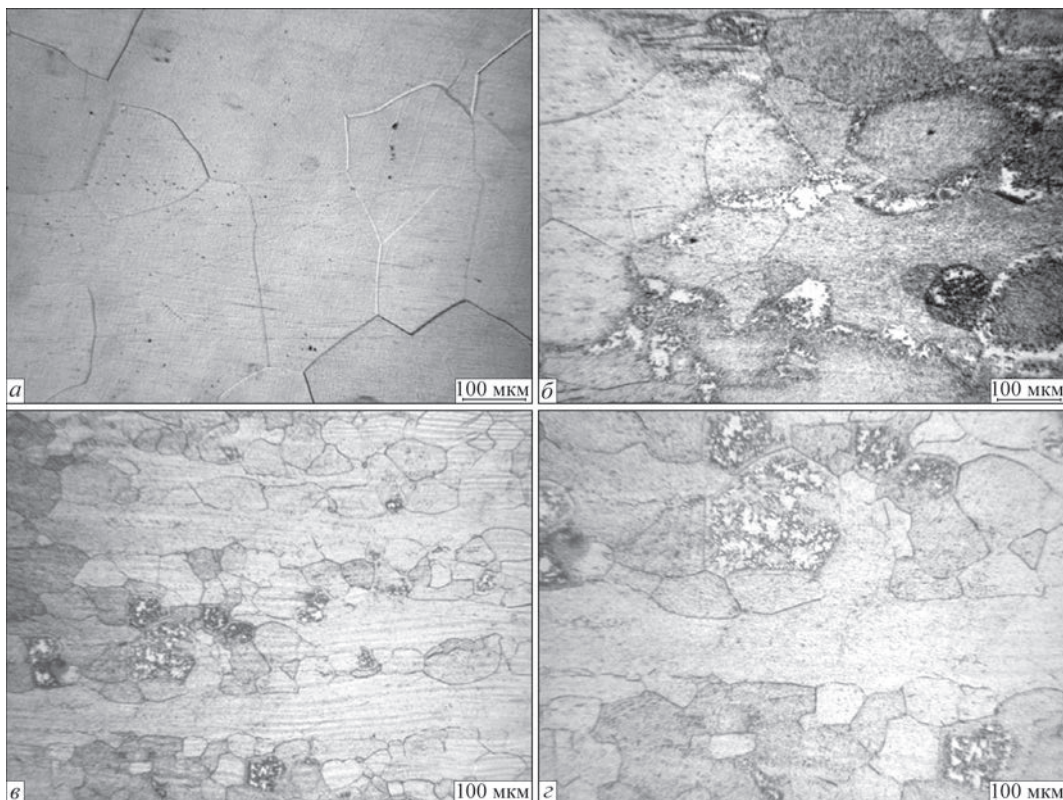


Рис. 3. Мікроструктура металу ЗТВ зварного з'єднання титанового псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19 (а-г — див. в тексті)

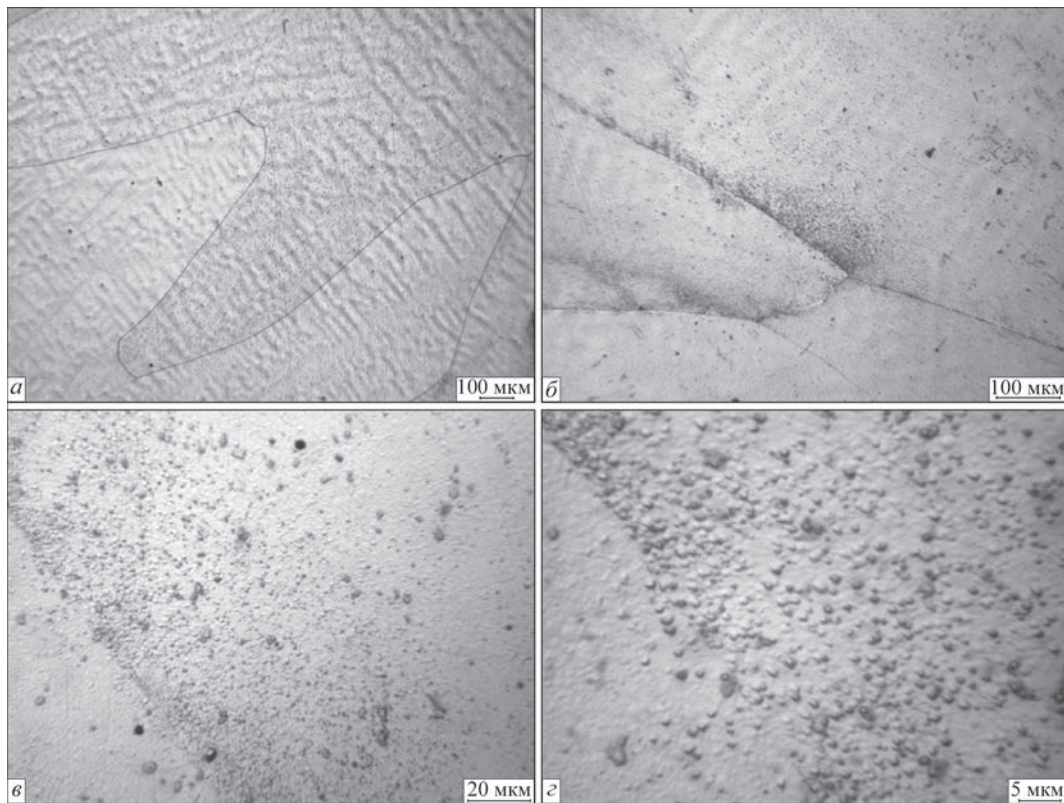


Рис. 4. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання титанового псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19, виконаного АДЗ наскрізним проплавленням з подачею присадного дроту ВТ1-00св зі швидкістю 30 м/год, в стані після зварювання

шва поблизу зони сплавлення (рис. 5, а, б), розмір деяких частинок досягає 2...3 мкм. Це можна пояснити тим, що температурний режим в процесі зварювання і охолодження сприяв збільшенню щільності та розміру частинок  $\alpha$ -фази, які виділялись в цій ділянці шва дисперсної фази.

Мікроструктура металу ЗТВ зварного з'єднання сплаву ВТ19, виконаного із застосуванням присадного дроту ВТ1-00 зі швидкістю 60 м/год, подібна мікроструктурі цієї зони в зварному з'єднанні сплаву ВТ19, виконаного АДЗ без застосування присадного дроту ВТ1-00.

Мікроструктура металу шва і навколошовної зони зварного з'єднання, виконаного АДЗ по слою флюсу зі швидкістю зварювання 10 м/год (режим 4, табл. 1) показані на рис. 6. Метал шва складається з рівновісних і нерівновісних зерен  $\beta$ -фази з тонкими границями на тлі дендритної структури, а метал навколошовної зони — із рівновісних зерен  $\beta$ -фази.

Для формування рівномірної однорідної структури, що виключає присутність метастабільних фаз, а також зняття зварювальних напружень зварні з'єднання сплаву ВТ19 необхідно піддавати термічній обробці після зварювання — відпалу [17]. Тому було проведено відпал 2-х типів зварних з'єднань титанового сплаву ВТ19, а саме, з'єднань за режимами 1 та 3. Проведений відпал

передбачав нагрів до температури 760 °С, витримку і подальше охолодження в печі.

Метал шва зварного з'єднання сплаву ВТ19, виконаного АДЗ без присадного дроту (режим 1), в стані після відпалу складався переважно з нерівновісних, витягнутих у напрямку тепловідводу первинних  $\beta$ -зерен (рис. 7, а) з дуже дрібною внутрізеренною структурою, що утворилася після розпаду метастабільних фаз (в основному  $\beta$ -фази) в результаті відпалу цього зварного з'єднання при температурі 760 °С протягом 1-ї год (рис. 7, б). Після стабілізації структури метал шва сформувалася рівномірна, однорідна для всього шва, дрібнодисперсна двофазна ( $\alpha + \beta$ )-структура (рис. 7, в, г, з). Пластини  $\alpha$ -фази мали довжину 2...4 мкм і товщину близько 0,5 мкм, розмір дисперсних глобулярних частинок  $\alpha$ -фази становив 0,5...1,0 мкм і менше. Уздовж границь зерен спостерігалася суцільна або переривчаста  $\alpha$ -оторочка шириною 1,0...1,5 мкм. Дрібнодисперсна структура метал шва може забезпечувати йому високу міцність.

Мікроструктура метал шва зварного з'єднання титанового псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19, виконаного АДЗ наскрізним проплавленням з присадним дротом ВТ1-00св зі швидкістю подачі 60 м/год (режим 3), що забезпечує вміст металу ВТ1-00 в шві на рівні 22...24 %, в стані після відпалу представлена на рис. 8. Метал шва складається з витягнутих в напрямку тепловідводу первинних  $\beta$ -зерен

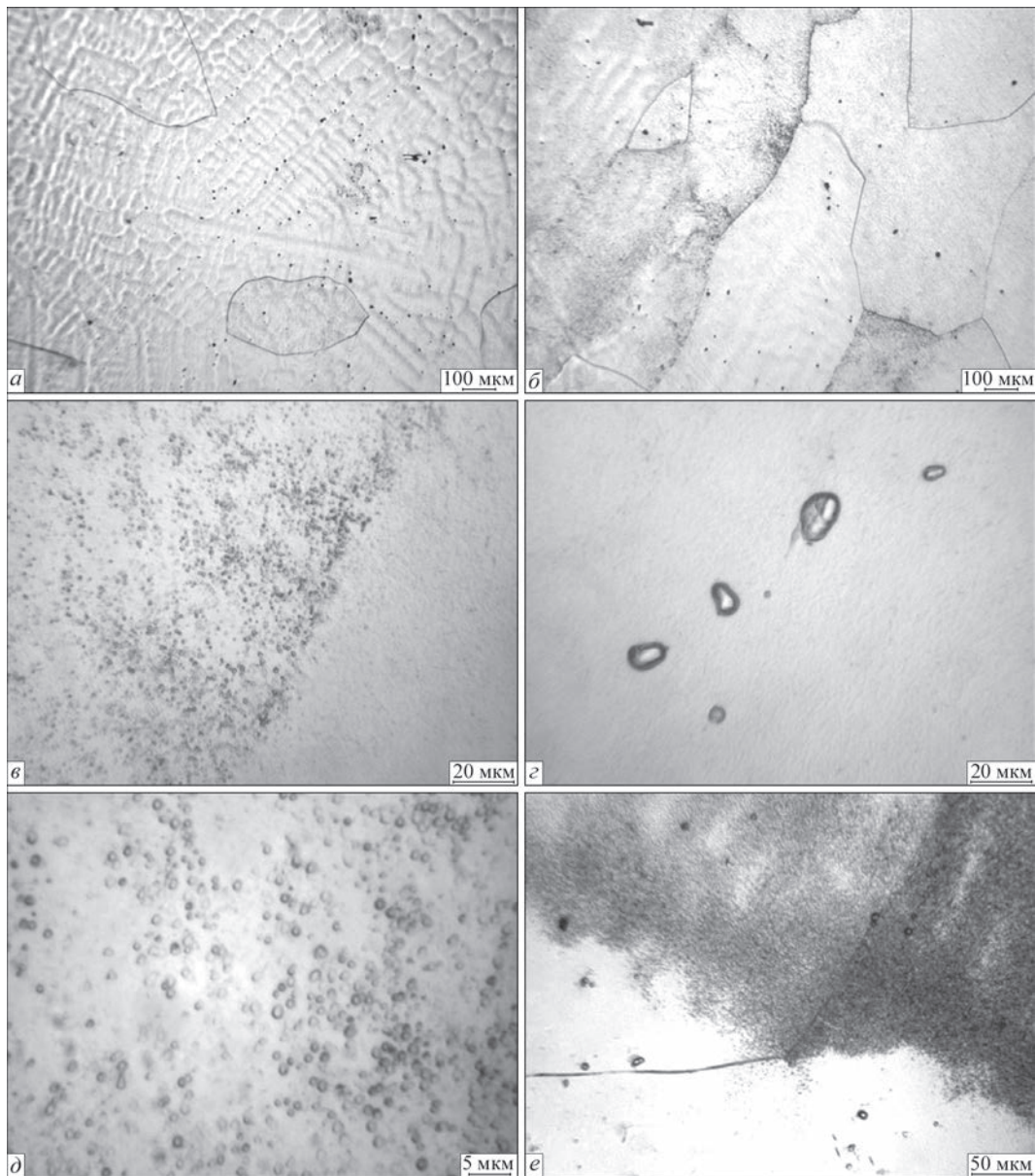


Рис. 5. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання сплаву ВТ19, виконаного АДЗ наскрізним проплавленням з присадним дротом ВТ1-00св зі швидкістю 60 м/год (вміст ВТ1-00 в шві 22 %), в стані після зварювання

(рис. 8, а) з двофазною внутрізерною структурою, що складається з дисперсних  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз (рис. 8, б). Товщина частинок  $\alpha$ -фази становить

менше 1 мкм при довжині 0,7...5,0 мкм. На кордонах  $\beta$ -зерен присутня  $\alpha$ -оторочка шириною до 2 мкм (рис. 8, в, г).

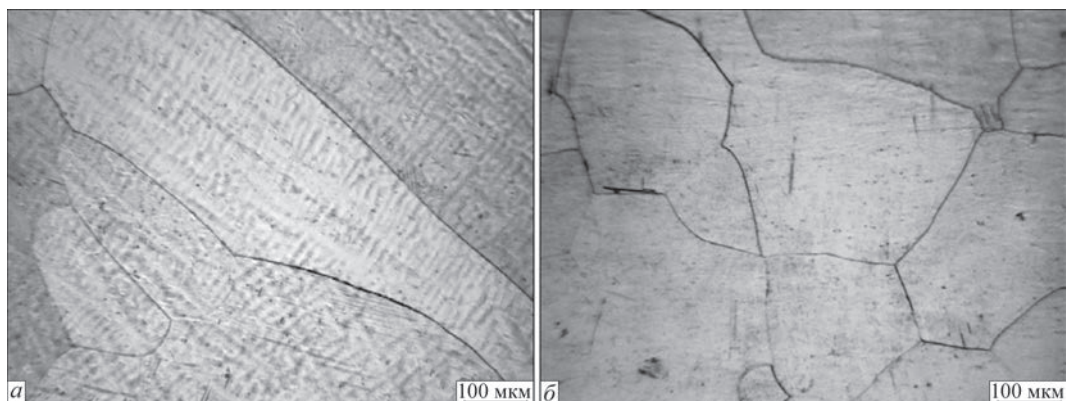


Рис. 6. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ВТ19, виконаного АДЗ (режим 4) вольфрамовим електродом по шару флюсу, в стані після зварювання: а — метал шва; б — метал ЗТВ в ділянці, що нагрівалася вище  $T_{\min}$

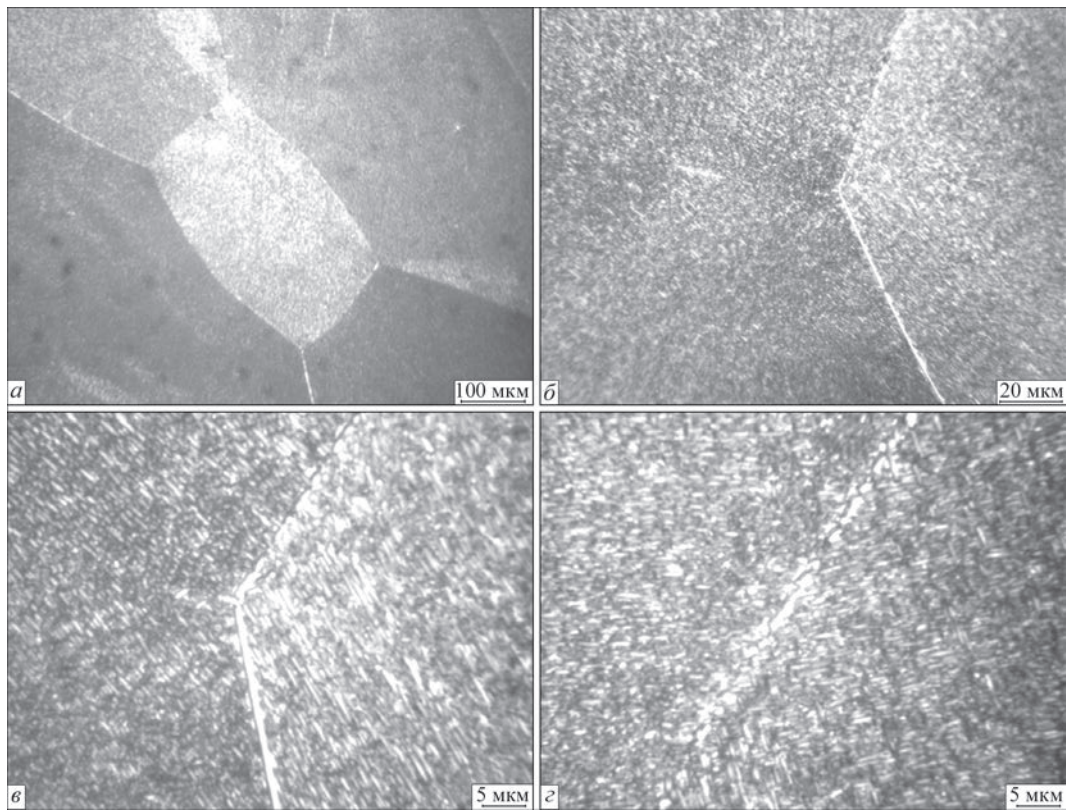


Рис. 7. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання титанового псевдо- $\beta$ -сплаву VT19, виконаного АДЗ наскрізним проплавленням (режим 1), в стані після відпалу 760 °С

Кількість  $\beta$ -фази в металі зварних з'єднань найбільша при зварюванні без застосування при-

садного дроту (табл. 2). При зварюванні із застосуванням присадного дроту VT1-00св кількість

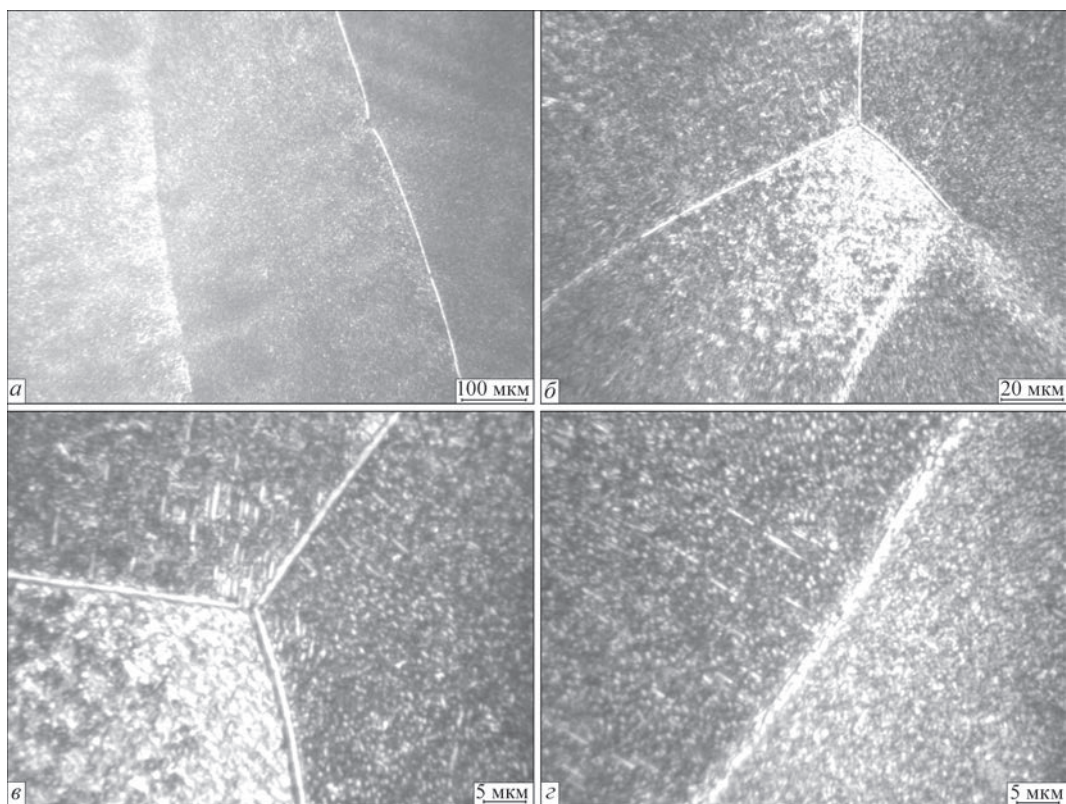


Рис. 8. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання титанового псевдо- $\beta$ -сплаву VT19, виконаного АДЗ вольфрамовим електродом наскрізним проплавленням із застосуванням присадного дроту VT1-00 (вміст в шві 22...24 %), в стані після відпалу 760 °С

Таблиця 2. Кількість  $\beta$ -фази в ОМ і металі шва зварних з'єднань титанового сплаву ВТ19, виконаних АДЗ

Зразок	Тип зразка/швидкість подачі присадного дроту	Стан зразків	Кількість $\beta$ -фази, %
–	Основний метал	Після зварювання	55,7
1	Зварне з'єднання без присадки	Після: зварювання відпалу	77,1 43,72
2	Зварне з'єднання/30 м/год	Після зварювання	69,1
3	Зварне з'єднання/ 60 м/год	Після: зварювання відпалу	60,3 29,87
4	Зварне з'єднання по флюсу без присадки	Після зварювання	76,8

$\beta$ -фази в металі швів знижується до 60 %. Після відпалу в металі всіх швів знижується кількість  $\beta$ -фази. В швах, виконаних АДЗ з застосуванням ВТ1-00св в кількості 22 %, після відпалу міститься  $\beta$ -фаза на рівні 30 %. В швах без застосування присадного дроту кількість  $\beta$ -фази після відпалу фіксується на рівні 43 %.

Таким чином, дослідження мікроструктури отриманих зварних з'єднань дозволило зробити висновок, що в результаті впливу термічного циклу зварювання в металі швів фіксується переважно  $\beta$ -фаза. В  $\beta$ -зернах спостерігаються дисперсні частинки  $\alpha$ -фази розміром близько 1 мкм, причому в швах, виконаних з застосуванням присадного дроту ВТ1-00св в кількості 10 і 20 %, кількість дисперсних частинок  $\alpha$ -фази росте і їх розмір збільшується до 2...3 мкм в швах з 20 % присадного металу ВТ1-00св. В металі ЗТВ також фіксуються метастабільні фази, довжина пластинчастої  $\alpha$ -фази становить 2...20 мкм, а товщина 1,0...1,5 мкм. Метал зварних швів сплаву ВТ19, виконаних із застосуванням присадного дроту ВТ1-00св в кількості 10 і 20 %, належить до металу типу псевдо- $\beta$ .

Механічні властивості зварних з'єднань титанового псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19, виконаних АДЗ вольфрамним електродом як без присадного дроту, так і з застосуванням присадного дроту ВТ1-00св, показали, що найнижчі значення міцності в стані

після зварювання мають з'єднання, виконані без присадного дроту (табл. 3). Найбільші показники міцності характерні з'єднанням, виконаним із застосуванням присадного дроту ВТ1-00св, що мають вміст металу ВТ1-00 в шві на рівні 22...24 %.

Міцність матеріалу присадного дроту ВТ1-00св (295...470 МПа) набагато менше міцності основного металу ВТ19 (960 МПа) і не може бути легуючим матеріалом, що зміцнює. З'єднання, виконані із застосуванням присадного дроту ВТ1-00св, в якому вміст металу ВТ1-00 в шві знаходиться на рівні 10...12 %, мають проміжні значення міцності. Це пояснюється великим вмістом  $\beta$ -фази в металі шва в з'єднаннях, виконаних без застосування присадного дроту. Метастабільна  $\beta$ -фаза має низьку міцність, тому зварні з'єднання також мають низькі показники міцності.

Ударна в'язкість зразків з гострим надрізом (KCV) металу шва зварних з'єднань, виконаних з застосуванням присадного дроту ВТ1-00св з найбільшою швидкістю подачі (60 м/год) на режимах, що забезпечують вміст металу ВТ1-00 в шві на рівні 22...24 %, також максимальна і становить 32 Дж/см<sup>2</sup>.

Міцність зварних з'єднань, виконаних АДЗ вольфрамним електродом із застосуванням флюсів (режим 4), така ж сама, як у з'єднань, виконаних АДЗ без застосування флюсів і присадного дроту (режим 1, табл. 3), де  $\sigma_b = 860$  МПа. Ударна в'язкість

Таблиця 3. Механічні властивості зварних з'єднань титанового псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19, виконаних АДЗ, в стані після зварювання

Режим	Тип зразка, стан	Тимчасовий опір розриву ( $\sigma_b$ ), МПа	Межа плинності ( $\sigma_T$ ), МПа	Відносне подовження ( $\delta$ ), %	Відносне звуження ( $\psi$ ), %	Ударна в'язкість, (KCV), Дж/см <sup>2</sup>
–	Основний метал, після: прокату відпалу	958 978	887 —»—	12 —»—	42 —»—	22 —
1	Після: зварювання відпалу	860 981	839 946	13,3 9,7	60,0 15,3	19 29
2	Після зварювання	895	868	7,3	25,4	28
3	Після: зварювання відпалу	963 1011	942 989	6,0 9,1	24,5 15,1	32 26
4	Після зварювання	863	820	10	40	13

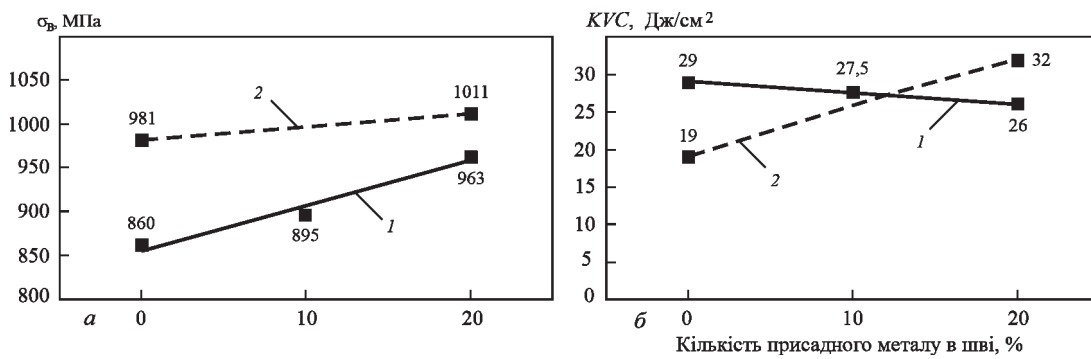


Рис. 9. Вплив присадного металу VT1-00св в металі шва зварного з'єднання титанового псевдо- $\beta$ -сплаву VT19, виконаного АДЗ, на показники: міцності ( $\sigma_{0,2}$ ) (а) та ударної в'язкості зразків з гострим надрізом (KCV) (б); 1 — після зварювання; 2 — після відпалу

зразків з гострим надрізом (KCV) металу шва зварних з'єднань, виконаних з застосуванням флюсів, становить 13 Дж/см<sup>2</sup>. Такі результати дозволяють зробити висновок, що застосування флюсів при АДЗ титанового сплаву VT19 особливо не впливає на вміст  $\beta$ -фази в металі шва та на показники міцності.

**Обговорення результатів.** Внаслідок впливу термічного циклу зварювання в металі шва всіх з'єднань титанового псевдо- $\beta$ -сплаву VT19, виконаних АДЗ, фіксується переважно  $\beta$ -фаза. В  $\beta$ -зернах спостерігаються дисперсні частинки  $\alpha$ -фази розміром близько 1 мкм, максимальна кількість  $\beta$ -фази у металі швів зварних з'єднань, виконаних без присадного матеріалу VT1-00св, становить 77 %.

В результаті проведених досліджень властивостей зварних з'єднань псевдо- $\beta$ -сплаву VT19, виконаних АДЗ вольфрамовим електродом як без присадного дроту, так і з застосуванням його, встановлено, що з'єднання, виконані із застосуванням присадного дроту VT1-00св в кількості 10 %, рівномічні основному металу, а при 20 % перевершують його міцність. При збільшенні частки присадного металу в шві кількість  $\beta$ -фази в металі шва знижується з 69 до 60 %. Але метал зварних швів сплаву VT19, виконаних з застосуванням присадного дроту VT1-00св в кількості 10 і 20 %, все одно ще належить до металу типу псевдо- $\beta$ . Однак структура металу шва після зварювання значно відрізняється від структури ОМ та ділянки ЗТВ, яка не нагрівалася вище  $T_{\text{нп}}$ . Тому для забезпечення рівномірної структури з'єднання, розпаду метастабільних фаз та підвищення міцності усі з'єднання необхідно піддавати подальшій термічній обробці.

В результаті впливу відпалу при температурі 760 °С в металі з'єднань, виконаних АДЗ сплаву VT19, формується рівномірна, однорідна, дрібнодисперсна двофазна ( $\alpha+\beta$ )-структура з пластинами  $\alpha$ -фази довжиною 2...4 мкм і товщиною 0,5 мкм з показниками тимчасового опору розриву зварних з'єднань на рівні 980 МПа. Крім того слід відмітити, що застосування флюсів при АДЗ дозволяє знизити погонну енергію процесу зварювання,

зменшити розміри званих швів, але не надає впливу на вміст  $\beta$ -фази в металі шва, а міцність на розрив з'єднань, виконаних АДЗ вольфрамовим електродом із застосуванням флюсів, відповідає міцності з'єднань, виконаних АДЗ без застосування флюсів і присадного дроту. Якщо рекомендувати присадний матеріал для виконання зварних з'єднань при зварюванні в розкриття, то доцільніше за все використовувати матеріал, хімічний склад якого відповідає металу шва, отриманого з додаванням 20 % VT1-00св. В цьому випадку метал шва матиме найбільші значення міцності та ударної в'язкості як після зварювання, так і після відпалу (рис. 9).

В металі шва, виконаного із додаванням присадного металу VT1-00св, також збільшується розмір виділень частинок  $\alpha$ -фази. В швах без присадки фіксуються пластини  $\alpha$ -фази довжиною 2...4 мкм і товщиною 0,5 мкм, а в швах з 20 % VT1-00св товщина пластин  $\alpha$ -фази становить близько 1 мкм при довжині 0,7...5,0 мкм. Збільшення розмірів структурних елементів сприяє збільшенню показників ударної в'язкості.

Зміни в хімічному складі швів впливають на ступінь зміцнення і в результаті відпалу. Так, з'єднання, виконані АДЗ наскрізним проплавленням, після відпалу зміцнилися на 120 МПа, а із застосуванням присадного дроту — на 48 МПа.

## Висновки

1. Внаслідок впливу термічного циклу зварювання в металі шва всіх з'єднань псевдо- $\beta$ -сплаву VT19, виконаних АДЗ, фіксується переважно  $\beta$ -фаза, в  $\beta$ -зернах спостерігаються дисперсні частинки  $\alpha$ -фази розміром близько 1 мкм, максимальна кількість  $\beta$ -фази в металі швів зварних з'єднань, виконаних без присадного матеріалу VT1-00св, становить 77 %.

2. В зварних швах псевдо- $\beta$ -сплаву VT19, виконаних із застосуванням присадного дроту VT1-00св (10 і 20 %), кількість дисперсних частинок  $\alpha$ -фази росте, їх розмір збільшується до 2...3 мкм в швах з вмістом 20 % дроту VT1-00св, а кількість  $\beta$ -фази в металі швів знижується до 60 %.



3. З'єднання сплаву VT19, виконані АДЗ із застосуванням присадного дроту VT1-00св у кількості 20 %, мають показники тимчасового опору розриву на рівні 965 МПа і перевершують міцність основного металу, а з'єднання, що містять 10% присадного дроту VT1-00св, рівномірні основному металу.

4. В результаті впливу відпалу при температурі 760 °С в металі з'єднань, виконаних АДЗ сплаву VT19, формується рівномірна, однорідна дрібнодисперсна двофазна( $\alpha+\beta$ )-структура з показниками тимчасового опору розриву зварних з'єднань на рівні 980 МПа.

5. Присадний метал для виконання з'єднань АДЗ в розкриття кромки для сплаву VT19, хімічний склад якого відповідає металу шва сплаву VT19, отриманого з додаванням 20 % VT1-00св, забезпечить з'єднанням показники тимчасового опору розриву на рівні 963 МПа після зварювання, а після відпалу при температурі 760 °С — на рівні 1010 МПа при показниках ударної в'язкості 29...32 Дж/см<sup>2</sup>.

#### Список літератури

- Lütjering G., Williams J.C. (2003) *Titanium (engineering materials and processes)*. Berlin, Springer-Verlag.
- Boyer R.R., Williams J.C. (2011) Developments in research and applications in the titanium industry in the USA. *Proc. of 12th World Conf. on Titanium*. Vol. I., 10–19.
- Dobrescu M., Dimitriu S., Vasilescu M. (2011) Studies on Ti–Al–Fe low-cost titanium alloys manufacturing, processing and applications. *Metalurgia International*, 16(4), 73.
- (2003) *Titanium and titanium alloys*. Eds by M. Peters, C. Leyens. Wiley–VCH, Weinheim, Germany.
- (1994) *Materials properties handbook. Titanium alloy*. Ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. ASM International. The Material Information Society.
- Хорев А.И. (2012) Сверхпрочный титановый сплав VT19. *Технология машиностроения*, 6, 5–8.
- Моисеев В.Н., Куликов Ф.Р., Кириллов Ю.П. и др. (1978) *Сварные соединения титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
- D.S.dos Santos, Bououdina M., Fruchart D. (2002) Structural and thermodynamic properties of the pseudo-binary  $TiCr_2-xV_x$  compounds with  $0.0 \leq x \leq 1.2$ . *Journal of Alloys and Compounds*, 340(1–2), 101–112.
- Gavze A.L., Petrova E.N., Chusov S.Y., Yankov V.P. (2009) Investigation of properties of titanium alloys with mechanically stable beta-structure for body armor application. *Techniczne Wzrosty Włókiennicze*, 17(2–3), 54–57.
- Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В. (2018) Воздействие термического цикла аргонодуговой сварки на структуру и свойства псевдо- $\beta$ -титановых сплавов. *Автоматическая сварка*, 8, 32–38. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.08.05>
- Гуревич С.М., Замков В.Н., Кушниренко Н.А. и др. (1980) *Изыскание присадочного материала для сварки ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов. Актуальные проблемы сварки цветных металлов*. Киев, Наукова думка, сс. 314–320.
- Гуревич С.М., Замков В.Н., Блашук В.Е. и др. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Киев, Наукова думка.
- Paton V.E., Zamkov V.N., Prilutsky V.P. (1996) Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium. *Welding J.*, 5, 37–41.
- Ахонин С.В., Белоус В.Ю. (2017) Аргонодуговая сварка титана и его сплавов с применением флюсов (Обзор). *Автоматическая сварка*, 2, 8–14.
- Ахонин С.В., Пикулин А.Н., Березос В.А. и др. (2019) Лабораторная электронно-лучевая установка УЭ-208М. *Современная электрометаллургия*, 3, 15–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.03.03>
- Ахонин С.В., Северин А.Ю., Белоус В.Ю. и др. (2017) Структура и свойства титанового сплава VT19, полученного способом электронно-лучевой плавки, после термомеханической обработки. *Там же*, 19–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2017.03.04>
- Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В., Петриченко И.К. (2020) Термічна обробка отриманого способом ЕПП високоміцного псевдо- $\beta$ -титанового сплаву та його зварних з'єднань. *Сучасна електрометалургія*, 1, 14–25. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.02>

#### References

- Lütjering, G., Williams, J.C. (2003) *Titanium (Engineering materials and processes)*. Berlin, Springer-Verlag.
- Boyer, R.R., Williams, J.C. (2011) Developments in research and applications in the titanium industry in the USA. In: *Proc. of 12th World Conf. on Titanium*. Vol. I., 10–19.
- Dobrescu, M., Dimitriu, S., Vasilescu, M. (2011) Studies on Ti–Al–Fe low-cost titanium alloys manufacturing, processing and applications. *Metalurgia Intern.*, 16(4), 73.
- (2003) *Titanium and titanium alloys*. Ed. by M. Peters, C. Leyens. Wiley–VCH, Weinheim, Germany.
- (1994) *Materials properties handbook. Titanium alloy*. Ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. ASM International. The Material Information Society.
- Khorev, A.I. (2012) Titanium superalloy VT19. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 6, 5–8 [in Russian].
- Moiseev, V.N., Kulikov, F.R., Kirillov, Yu.P. et al. (1978) *Welded joints of titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
- D.S.dos Santos, Bououdina, M., Fruchart, D. (2002) Structural and thermodynamic properties of the pseudo-binary  $TiCr_2-xV_x$  compounds with  $0.0 \leq x \leq 1.2$ . *J. of Alloys and Compounds*, 340(1–2), 101–112.
- Gavze, A.L., Petrova, E.N., Chusov, S.Y., Yankov, V.P. (2009) Investigation of properties of titanium alloys with mechanically stable beta-structure for body armor application. *Techniczne Wzrosty Włókiennicze*, 17(2–3), 54–57.
- Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Selin, R.V. (2018) Effect of thermal cycle of TIG welding on structure and properties of pseudo- $\beta$ -titanium alloys. *The Paton Welding J.*, 8, 28–34. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tpwj2018.08.05>
- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Kushnirenko, N.A. et al. (1980) *Search of filler material for welding of ( $\alpha+\beta$ )-titanium alloys. Current problems of welding of nonferrous metals*. Kyiv, Naukova Dumka, 314–320 [in Russian].
- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Paton, V.E., Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. (1996) Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium. *Welding J.*, 5, 37–41.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.02.02>

15. Akhonin, S.V., Pikulin, A.N., Berezos, V.A. et al. (2019) Laboratory electron beam unit UE-208M. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 15–22 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.03.03>
16. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Belous, V.Yu. et al. (2019) Structure and properties of new high-strength titanium alloy T120, produced by the method of EBR after deformational and heat treatment. *Ibid.*, **2**, 19–24 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2017.03.04>
17. Akhonin, S.V., Bilous, V.Yu., Selin, R.V., Petrichenko, I.K. (2020) Heat treatment of high-strength pseudo- $\beta$ -titanium alloy produced by EBM process and of its welded joints. *Suchasna Elektrometall.*, **1**, 14–25 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.02>

## INFLUENCE OF FILLER MATERIAL ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH VT19 TITANIUM ALLOY

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](mailto:office@paton.kiev.ua)

The influence of filler material on the properties and structure of joints of VT19 titanium pseudo- $\beta$ -alloy, produced by tungsten electrode argon-arc welding was studied. It was established that predominantly  $\beta$ -phase in the amount of 60...77 % was present in the weld metal of all the joints of VT19 pseudo- $\beta$ -alloy. Joints of VT19 alloy produced by argon-arc welding, using VT1-00sv filler wire in the amount of 20 %, have the tensile strength values at the level of 965 MPa, and exceed the base metal strength. To produce a homogeneous structure of the joints, it is necessary to use postweld annealing. The impact of annealing at the temperature of 760 °C results in formation in the metal of the joints produced by argon-arc welding of VT19 alloy, of a uniform, homogeneous, fine two-phase ( $\alpha+\beta$ )-structure with values of tensile strength of welded joints on the level of 980 MPa. Ref. 17, Tabl. 3, Fig. 9.

*Key words:* titanium; titanium alloys; welded joints; pseudo- $\beta$ -alloy; VT19; welding; tungsten electrode; flux; heat treatment; annealing; microstructure; mechanical properties

Надійшла до редакції



КОНФЕРЕНЦІЯ

## ЗВАРЮВАННЯ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ



м. Київ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
17 листопада 2022 р.

### Тематика конференції

- Зварювання та споріднені технології з'єднання та обробки перспективних конструкційних і функціональних матеріалів, фізико-хімічні процеси при їх реалізації
- Фізична та конструкційна міцність матеріалів, зварних з'єднань і конструкцій, їх діагностика та продовження ресурсу експлуатації
- Автоматизація і роботизація технологій з'єднання та обробки матеріалів, математичне моделювання процесів та інформаційні технології
- Створення нових функціональних та конструкційних матеріалів і технологій їх отримання методами спеціальної електрометалургії
- Нові процеси і технології нанесення покриттів різного призначення та інженерія поверхні
- Матеріали, технології і виробі медичного призначення
- Адитивні технології отримання виробів і елементів конструкцій на основі лазерних, електронно-променевих і дугових джерел енергії
- Технології ремонту та відновлення інфраструктурних і промислових об'єктів.

### Контрольні дати

Подання заявок для участі в конференції  
(доповідь наживо / on-line доповідь / стендова доповідь / без доповіді)

- |   |               |
|---|---------------|
| – тез доповідей                             | до 20.10.2022 |
| – без доповіді                              | до 10.11.2022 |
| Розсилка програми та збірки тез конференції | до 04.11.2022 |
| Оплата організаційного внеску               | до 16.11.2022 |

Організаційний комітет конференції  
тел./факс: (38044) 205-23-90  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[www.pwi-scientists.com/ukr/wtd2022](http://www.pwi-scientists.com/ukr/wtd2022)

