УДК 621.791.053.7:669.14.018.62 DOI: https://doi.org/10.37434/sem2025.04.08

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ПТ-3В, ОТРИМАНИХ ЗВАРЮВАННЯМ У ВУЗЬКИЙ ЗАЗОР

С.В. Ахонін, В.Ю. Білоус, Р.В. Селін

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

Аргонодугове зварювання у вузький зазор — ефективний та економічний спосіб виконання з'єднань титанових сплавів великої товщини. Особливістю розробленої технології є постійний хімічний склад металу зварного шва, причому частка основного металу в металі шва становить 89…91 %. В даній роботі розглядається вплив присадного матеріалу на структуру та властивості зварних з'єднань титанового сплаву ПТ-3В, виконаних зварюванням у вузький зазор вольфрамовим електродом з магнітокерованою дугою. Присадні дроти 2В та СПТ2 при зварюванні у вузький зазор титанового сплаву ПТ-3В забезпечують якісне формування вогнутої поверхні зварного валика, міцність зварних з'єднань, виконаних з присадним дротом 2В, знаходиться на рівні 643 МПа, що становить 86 % від міцності основного металу. Застосування присадного дроту СПТ2 для зварювання у вузький зазор титанового сплаву ПТ-3В дозволило отримати структуру метала шва схожу з структурою основного металу та забезпечити рівноміцність зварного з'єднання основному металу в стані після зварювання. Бібліогр. 13, табл. 7, рис. 8.

Ключові слова: титан, титановий сплав, псевдо-α-сплави, аргонодугове зварювання, зварювання у вузький зазор, керуюче магнітне поле, присадний дріт, мікроструктура, механічні властивості

Вступ. Аргонодугове зварювання у вузький зазор — ефективний та економічний спосіб виконання з'єднань титанових сплавів великої товщини [1, 2]. Для зварних з'єднань титанових сплавів особливо важливі зниження витрат присадного дроту, а також проста форма кромок деталей, що зварюються [3, 4]. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблений метод зварювання у вузький зазор (ЗВЗ) вольфрамовим електродом магнітокерованою дугою [5]. Цей спосіб зварювання має такі переваги як мала ширина одержуваного шва і малий об'єм присадного металу, що наплавляється [6, 7]. Особливістю розробленої технології є проста форма кромок під зварювання [8]. Крім того, зварювання за розробленою технологією виконується на постійних режимах. Метал зварного шва має постійний хімічний склад [9, 10], а частка основного металу в металі шва становить 89…91 %.

Для виконання зварних з'єднань сплаву ПТ-3В як ручним, так і автоматичним дуговим зварюванням рекомендується застосування присадних матеріалів марок ВТ1-00св та 2В згідно з ТУУ05416923.041–98 або ГОСТ27265–87. Присадний матеріал ВТ1-00св є нелегованим титановим дротом і має межу міцності $\sigma_в$ = 295…470 МПа. Оскільки зварювання вольфрамовим електродом у вузький зазор магнітокерованою дугою відрізняється великою часткою участі присадного металу у формуванні металу шва, тому властивості металу зварних з'єднань, виконаних ЗВЗ, визначаються головним чином властивостями матеріалу присадного дроту [11] і для забезпечення високої міцності металу швів і зварного з'єднання необхідно застосування присадного дроту марки 2В (система Ti–Al–V). Однак метал присадного дроту марки 2В менш легований, порівняно з основним металом титанового сплаву ПТ-3В, тому міцність металу швів і зварного з'єднання сплаву ПТ-3В поступається міцності основного металу. Для досягнення рівноміцності зварних з'єднань в разі виконання їх методом ЗВЗ доцільно було б застосування присадного дроту хімічного складу аналогічного сплаву ПТ-3В. Нажаль в ТУУ05416923.041–98 або ГОСТ27265–87 такий присадний дріт відсутній, тому доцільно дослідити можливість застосування для ЗВЗ присадних дротів іншого складу.

Таким чином, доцільно провести дослідження з метою визначення впливу хімічного складу різних присадних дротів на властивості зварних з'єднань титанового сплаву марки ПТ-3В, виконаних ЗВЗ магнітокерованою дугою.

Мета роботи. Дослідити вплив присадного матеріалу на структуру та властивості зварних з'єднань титанового сплаву ПТ-3В, виконаних зварюванням у вузький зазор вольфрамовим електродом з керуючим магнітним полем.

Матеріали і методи дослідження. Для досягнення поставленої мети виконувалося багатошарове ЗВЗ магнітокерованою дугою зразків тов-

С.В. Ахонін — https://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

© С.В. Ахонін, В.Ю. Білоус, Р.В. Селін, 2025

Таблиця 1. Хімічний склад титанового сплаву ПТ-3В (ГОСТ19807–91), мас. %

Основні компоненти			Домішки, не більше							
Ti	Al	V	Zr	Si	Fe	C	O_2	N_2	H_2	Сума інших домішок
Основа	3,5...5,0	1,2...2,5	0,3	0,12	0,25	0,1	0,15	0,04	0,015	0,30

Таблиця 2. Механічні властивості листів титанового сплаву ПТ-3В (ГОСТ 19807–91)

Товщина листа, мм	Тимчасовий опір ($\sigma_в$), МПа	Відносне подовження (δ), %	Поперечне звуження (φ), %	Ударна в'язкість (*KCU*), кДж/м^2
		не менше		
12...19	638...834	11	25	687
20...60	638...814	10	15	–»–

Таблиця 3. Хімічний склад зварювальних дротів 2В і СПТ2 (ГОСТ27265–87), мас. %

Марка	Основні компоненти				Домішки, не більше						
	Ti	Al	V	Zr	Si	Fe	C	O_2	N_2	H_2	Сума інших домішок
2В	Основа	1,5...2,5	1,0...2,0	–	0,10	0,20	0,07	0,12	0,04	0,003	0,30
СПТ2	–»–	3,0...5,5	2,5...3,5	1,0...2,0	–»–	0,15	0,05	–»–	–»–	–»–	–»–

щиною 45 мм, виготовлених з титанового сплаву ПТ-3В (система Ti–Al–V), ГОСТ 19807–91. Хімічний склад титанового сплаву ПТ-3В наведено в табл. 1, а механічні властивості для металу товщиною 12…60 мм — в табл. 2. Довжина дослідних зразків для зварювання становила 600 мм.

Механічні властивості зварних з'єднань визначали при нормальній температурі на зразках, які вирізали з основного металу і металу шва. Випробування на статичний розтяг проводили на циліндричних зразках МИ-12, а для визначення ударної в'язкості (*KCV*) використовували зразки з гострим надрізом — МИ50.

Для зварювання титанового сплаву ПТ-3В рекомендовано застосовування присадних дротів з технічного титану марки ВТ1-00св або легованого присадного дроту марки 2В (система Ti–Al–V) (табл. 3). Механічні властивості присадного дроту марки 2В наведено в табл. 4. Для досягнення рівноміцності зварних з'єднань в якості присадного матеріалу було застосовано присадний дріт марки СПТ2 (система Ti–Al–V–Zr) (табл. 3). Титановий сплав ПТ-3В і присадні зварювальні дроти марки СПТ2 та 2В відносяться до групи псевдо-α-сплавів. Хімічний склад присадного дроту СПТ2 та титанового сплаву ПТ-3В схожі. Слід відзначити, що особливістю присадного дроту СПТ2 є наявність у хімічному складі легуючого елемента цирконію. Цирконій при легуванні титанових сплавів не виступає ні α-стабілізатором, ні β-стабілізатором.

Складання деталей під зварювання проводили із застосуванням підкладки, яку вручну приварюють зі зворотного боку деталей, що збираються. Ця підкладка є нижньою стінкою розкриття при виконанні першого проходу [12, 13]. Зварювання зразків титанового сплаву ПТ-3В товщиною 45 мм у вузький зазор вольфрамовим електродом магнітокерованою дугою виконували на режимі, наведеному в табл. 5. Макрошліфи зварних з'єднань наведено на рис. 1.

Макроструктура швів, виконаних ЗВЗ з застосуванням присадних марок 2В та СПТ2 аналогічні. Висота шару, що наплавляється за один прохід становить 5 мм, ширина шва для першого і послідуючих проходів становить 11,2…11,6 мм. Згідно таких геометричних параметрів макроструктури

Таблиця 4. Механічні властивості зварювальних дротів 2В і СПТ2 (ГОСТ27265–87)

Марка	Діаметр дроту, мм	Тимчасовий опір ($\sigma_в$), МПа	Відносне подовження (δ), %, не менше
2В	Від 1,6 до 7,0	490...635	20,0
СПТ2	–»–	645...845	13,0

Таблиця 5. Режим зварювання у вузький зазор вольфрамовим електродом із зовнішнім керуючим магнітним полем титанового сплаву ПТ-3В

Швидкість зварювання ($V_{зв}$), м/час	Напруга на дузі, В	Струм зварювання ($I_{зв}$), А	Швидкість подачі присадного дроту, м/г	Витрата захисного газу, л/хв
8	12…13	420…440	55…65	30

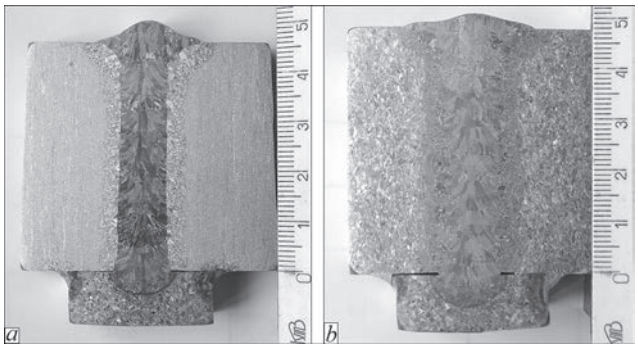

Рис. 1. Поперечні макрошліфи зварних з'єднань титанового сплаву ПТ-3В товщиною 45 мм, виконаного ЗВЗ: *а* — з присадним дротом СПТ2; *б* — з присадним дротом 2В

зварних швів частка участі присадного матеріалу в металі шва становить 89…91 %.

Застосовані присадні дроти при обраних параметрах режиму ЗВЗ титанового сплаву ПТ-3В забезпечують якісне формування вогнутої поверхні зварного валика. В металі швів відсутні пори та несплавлення.

При ЗВЗ в метал шва потрапляє не більше 11 % основного металу. Встановлення хімічного складу основного металу та металу зварних швів, виконаних ЗВЗ із застосуванням присадних дротів 2В та СПТ2, дозволило зробити висновок, що найменше всього легуючих елементів міститься в металі шва, виконаного з застосуванням присадного дроту 2В (табл. 6). В разі використання присадного дроту марки СПТ2 вміст алюмінію в металі шва менше порівняно з основним металом.

Дослідження мікроструктури зварних з'єднань титанового сплаву ПТ-3В, виконаних ЗВЗ. Мікроструктура основного металу сплаву ПТ-3В представлена на рис. 2. Структура основного металу складається з рівноосних первинних β-зерен різного розміру, обрамлених стрічкою суцільної або переривчастої α-фази (рис. 2, *а*) товщиною до 15 мкм. Внутрішньозеренна структура складається з пластинчастої α-фази товщиною до 1,5 мкм, структура пластинчастої α-фази ламелярна з дрібними паралельними межам (рис. 2, *б*). В проміжках між α-пластинами можлива присутність невеликої кількості β-фази, яка не завжди виявляється при дослідженні на оптичному мікроскопі.

Таким чином, основний метал містить переважно α-фазу з залишковою β-фазою, стабілізованою

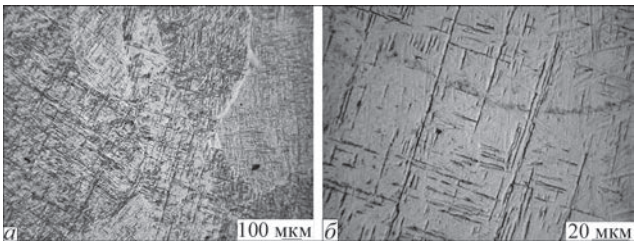

Рис. 2. Мікроструктура основного металу титанового сплаву ПТ-3В: *а* — ×50; *б* — ×100

ванадієм. Відносно висока щільність пластинчастих структур, що перетинаються, вказує на хорошу пластичність і деформаційну здатність сплаву.

Мікроструктура металу шва сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ з застосуванням присадного дроту марки СПТ2, в його середній частині показана на рис. 3. Метал шва складається з рівноосних первинних β-зерен, утворення яких відбувалося при температурах β-області (рис. 3, *а, б*). Границі первинних зерен обрамлені суцільною або переривчастою α-оторочкою товщиною до 15 мкм. Мікроструктура в обсязі первинних зерен пластинчастого типу. Пластини α-фази зібрані в колонії, в межах однієї колонії α-пластини паралельні (рис. 3, *в, г*).

Мікроструктура металу шва у його верхній частині, де розташовано підсилення шва, сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ із застосуванням присадного дроту марки СПТ2, не відрізняється від мікроструктури решти шва (рис. 4, *а, б*). Мікроструктура металу шва також складається з рівноосних первинних β-зерен. Мікроструктура в обсязі первинних зерен пластинчастого типу, пластини α-фази зібрані в колонії, а в межах однієї колонії α-пластини паралельні.

Мікроструктура металу шва сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ з застосуванням присадного дроту марки 2В, в його середній частині показана на рис. 5. В металі шва утворюються рівноосні та витягнуті первинні зерна різних розмірів, в яких розташовані тонкі пакети пластинчастої α-фази, границі зерен чітко виражені. Незважаючи на відмінності конфігурації та розміри первинних зерен, внутрішньозеренна мікроструктура металу шва, виконаного ЗВЗ дротом марки 2В пластинчастого типу, дуже схожа на мікроструктуру ОМ (рис. 5, *а, б*). В металі шва

Таблиця 6. Хімічний склад основного металу і металу зварних швів сплаву ПТ-3В, виконаних ЗВЗ із застосуванням присадних дротів 2В та СПТ2, мас. %

Тип зразка	Ti	Al	V	Zr	Cr	Si	Mo	Fe
Основний метал	Основа	3,95	2,14	0,05	0,01	0,01	–	0,08
Зварний шов, присадка СПТ2	–»–	3,87	3,0	1,5	–»–	–»–	0,07	0,04
Зварний шов, присадка 2В	–»–	2,58	1,70	0,03	–»–	–»–	–	–»–

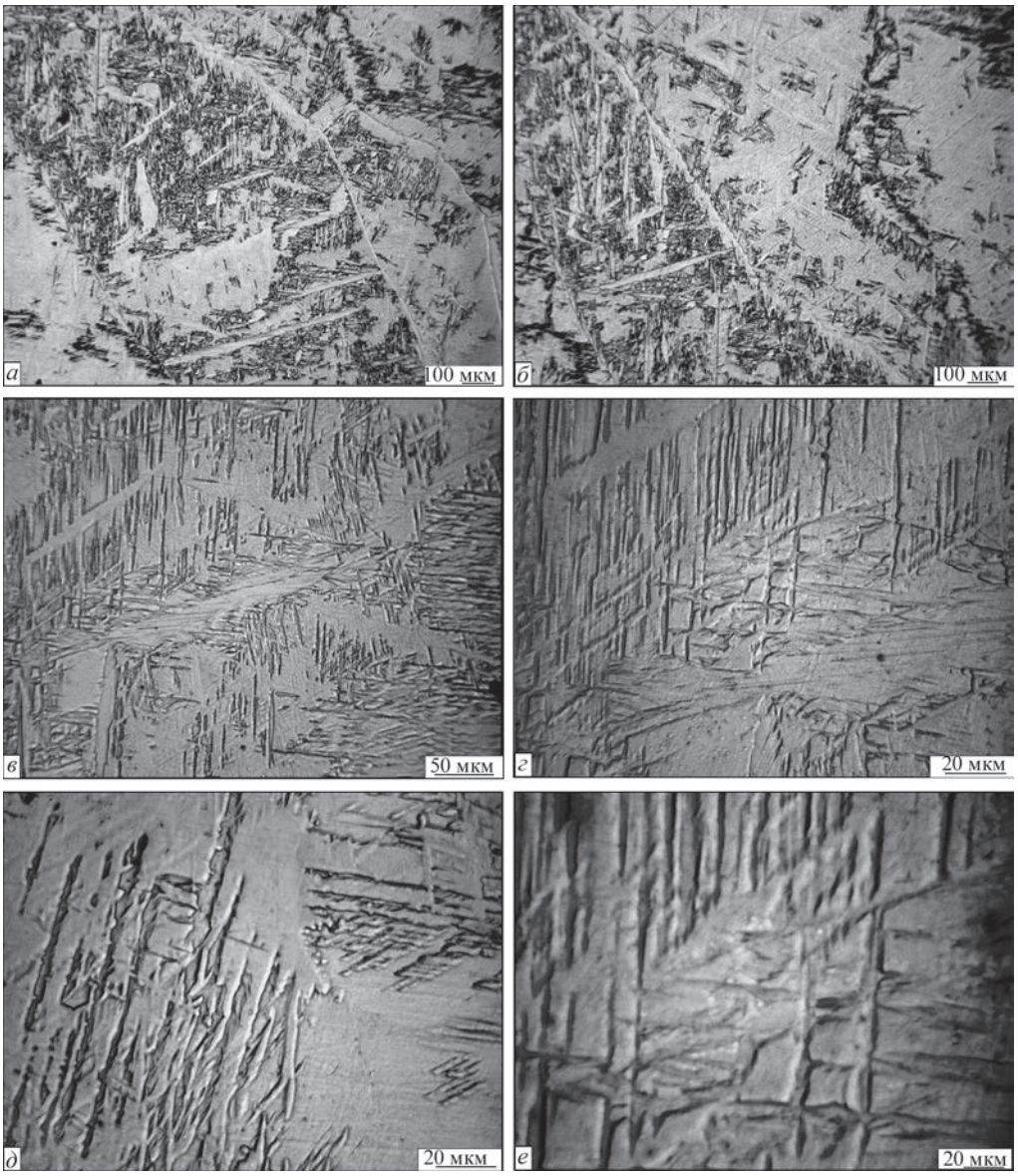

Рис. 3. Мікроструктура металу шва титанового сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ з застосуванням присадного дроту марки СПТ2

також присутні α-пластини з різними напрямками зростання, що вказують на складну орієнтацію та неоднорідність формування α-фази. В деяких зонах спостерігаються дрібнодисперсні α-структури, які могли виникнути внаслідок додаткового переохолодження.

Мікроструктура металу в зоні сплавлення зварного з'єднання сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ з застосуванням присадного дроту марки СПТ2, наведена на рис. 6. В зоні сплавлення спостерігається утворення дрібних первинних зерен (рис. 6, *а*), у той час як внутрішньозеренна структура подібна до

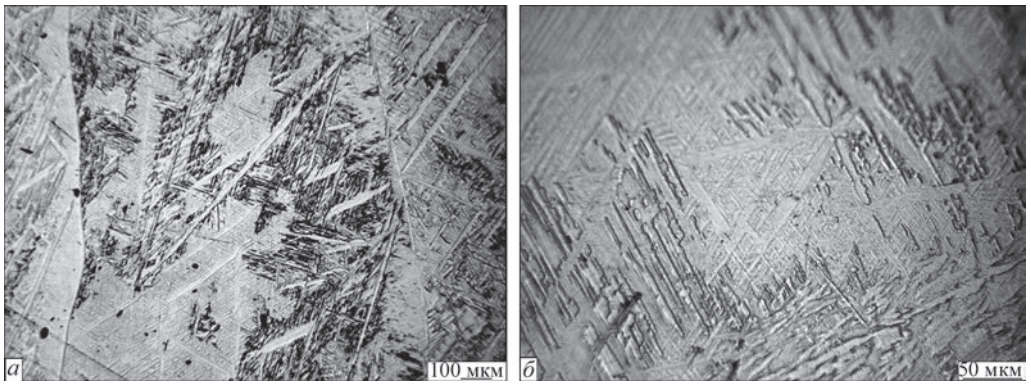

Рис. 4. Мікроструктура металу верхньої частини шва титанового сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ з застосуванням присадного дроту марки СПТ2

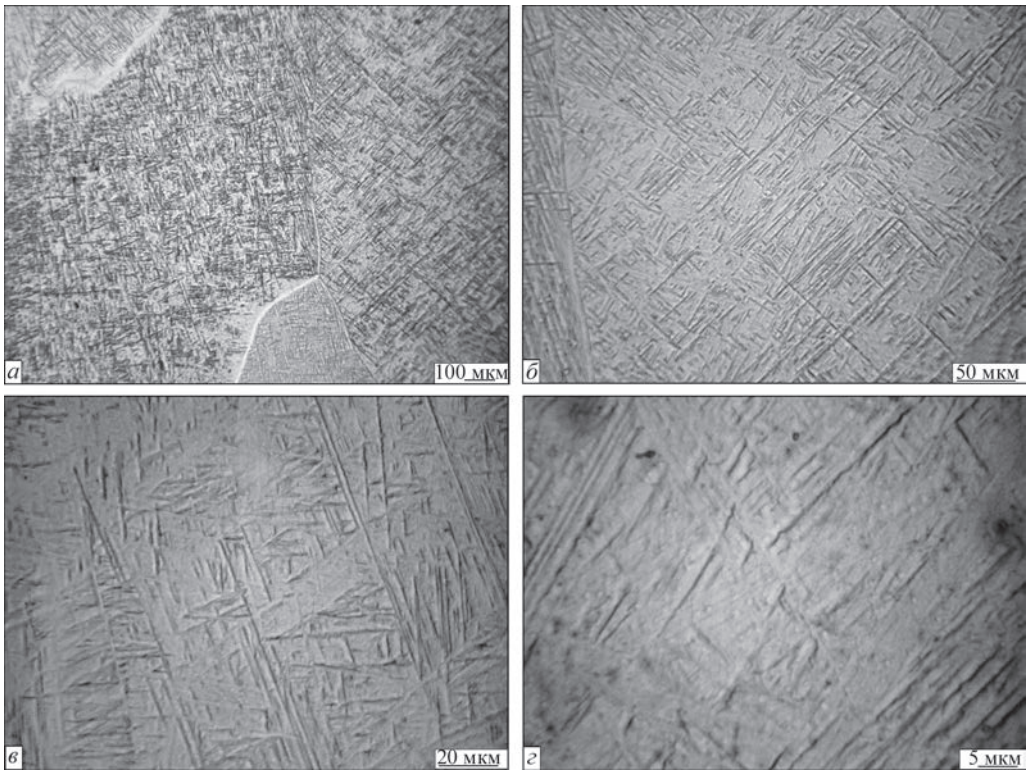

Рис. 5. Мікроструктура металу шва титанового сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ із застосуванням присадного дроту марки 2В

структури ОМ. Мікроструктура дрібних первинних зерен пластинчаста, складається з α-фази, виділеної у вигляді ламелів, які можуть бути як паралельні, так і перетинатися в середині колишніх β-зерен, що типово для псевдо-α-структур (рис. 6, *б*). Така морфологія вказує на досить високу швидкість охолодження цієї ділянки при зварюванні.

Мікроструктура металу в зоні сплавлення сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ із застосуванням присадного дроту марки 2В, наведена на рис. 7. В зоні сплавлення спостерігається утворення дрібних первинних зерен (рис. 7, *а*), у той час як внутрішньозеренна структура подібна до структури ОМ (рис. 7, *б*).

Мікроструктура металу ЗТВ, виконаного із застосуванням дротів марок СПТ2 та 2В, відразу за зоною сплавлення, а саме ділянка великого зерна сплаву ПТ-3В однакова та представлена на рис. 8. Метал цієї зони складається з рівноосних первинних зерен (рис. 8, *а*) з мікроструктурою, схожою з внутрішньою структурою в обсязі зерна метала шва (рис. 8, *б*, *в*). В структурі присутні укрупнені зерна та подовжені α-пластини, орієнтовані переважно паралельно градієнту тепла (рис. 8, *б*). Помітна перерозподілена α-структура у вигляді слабо впорядкованих пакетів, що перекриваються. Місцями простежуються межі первинних β-зерен, частково перетворених на α-фазу.

На рис. 8, *г* можна спостерігати розміщення дисперсних частинок другої фази, найімовірніше β-фази, вздовж границь α-пластин. Розміри таких частинок становлять 0,5 мкм і менше (рис. 8, *г*). Мікроструктура металу ЗТВ поблизу ОМ (рис. 8, *д*, *е*) також дуже подібна з іншими ділянками звар-

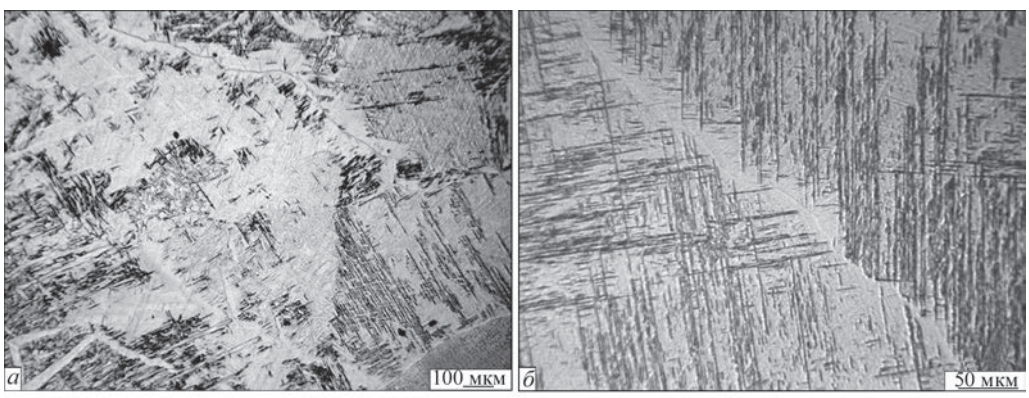

Рис. 6. Мікроструктура металу зони сплавлення титанового сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ із застосуванням присадного дроту марки СПТ2

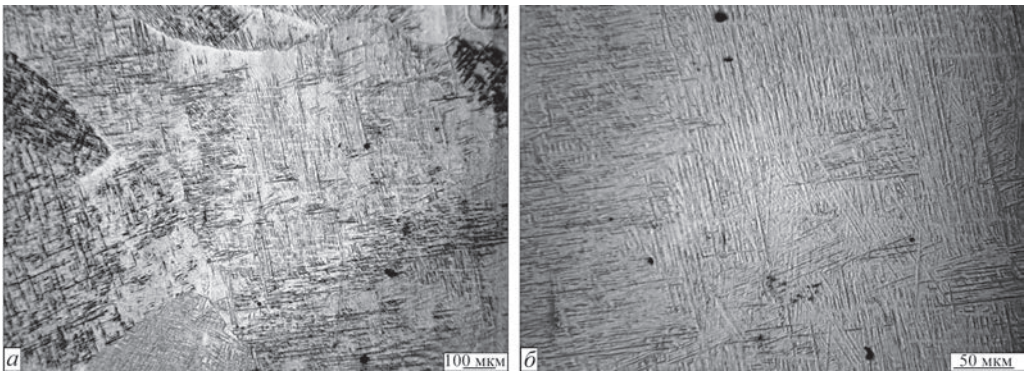

Рис. 7. Мікроструктура металу зони сплавлення титанового сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ із застосуванням присадного дроту марки 2В

ного з'єднання сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ із застосуванням присадного дроту марки 2В.

Таким чином, мікроструктури металу зварних швів сплаву ПТ-3В, виконаних ЗВЗ з присадними дротами СПТ2 та 2В, схожі. Подібність мікроструктур різних ділянок зварних з'єднань сплаву ПТ-3В може бути підтвердженням близькості їх фазового складу. Це забезпечує ряд переваг застосованих присадних матеріалів, які відносяться до класу псевдо-α-сплавів. А саме, сплави практично не сприймають зміцнювальну термічну обробку, мартенситна α′-фаза, що утворюється при охо-

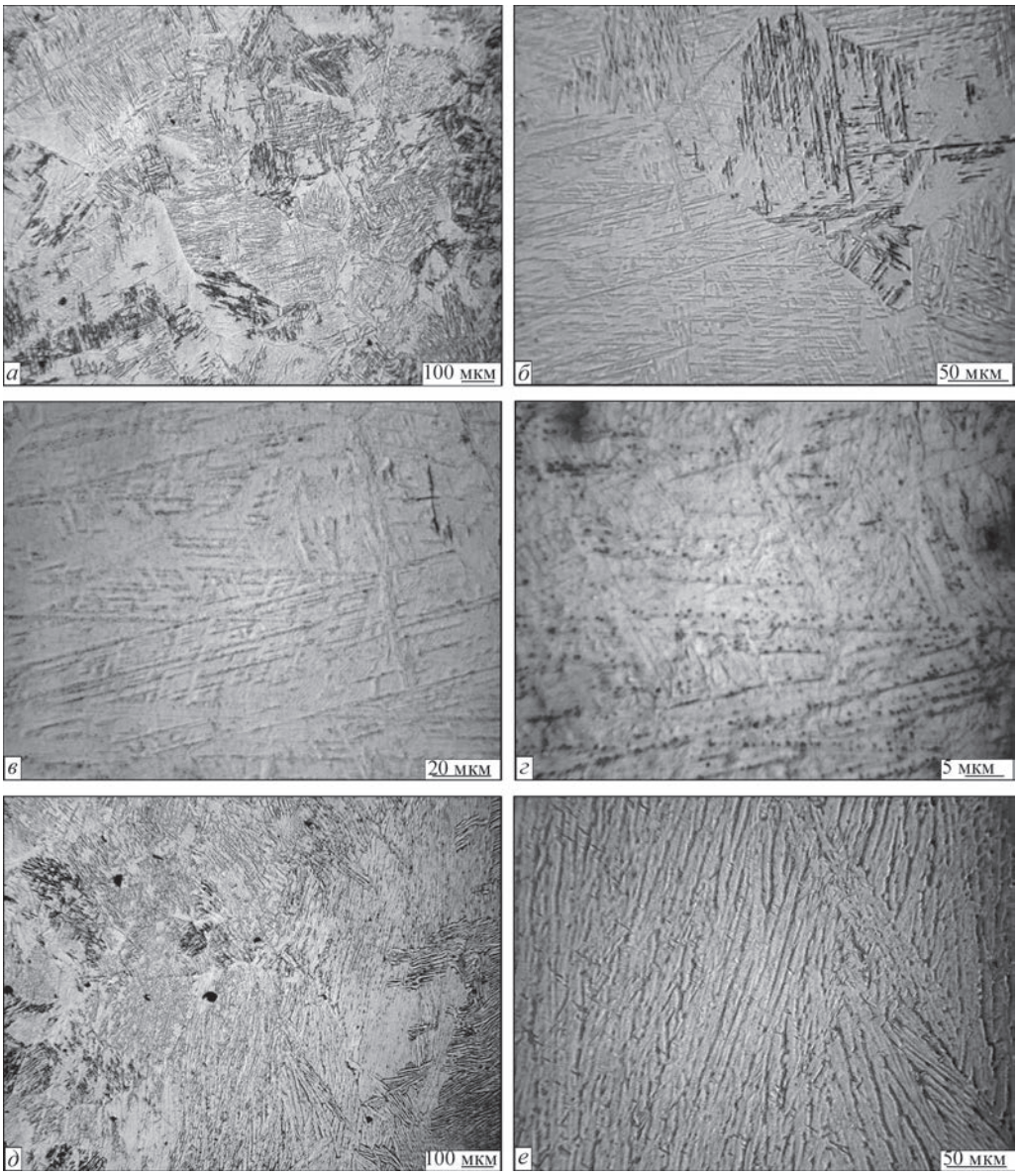

Рис. 8. Мікроструктура металу ЗТВ сплаву ПТ-3В, виконаного ЗВЗ

Таблиця 7. Механічні властивості основного металу та зварних з'єднань товщиною 45 мм з титанового сплаву ПТ-3В, виконані ЗВЗ*

Зразок	$\sigma_в$	σ_{02}	δ,%	ψ, %	*KCV*, Дж/см²	
	МПа				Шов	ЗТВ
Основний метал ПТ-3В, δ = 45 мм	747	678	12,7	30,8	95,3	
Зварне з'єднання, присадка 2В	643	604	–»–	41,2	107	78
Метал шва, присадка 2В	609	506	18,3	47,4	107	
Зварне з'єднання, присадка СПТ2	759	691	12,1	30,1	79	77
Метал шва, присадка СПТ2	818	716	11,8	36,9	79	
Метал шва, присадка 2В після відпалу 780 °С	799	750	10,7	45,1	89,2	

*Наведено середні значення із трьох результатів.

лодженні з температур вище критичної, за фізико-механічними властивостями близька до α-фази. Крім того, кількість β-фази у сплавів цього класу настільки мала, що її евтектоїдний розпад, якщо він і має місце, не може призвести до помітного погіршення фізико-механічних властивостей. Завдяки цьому застосований присадний метал марок 2В і СПТ2 відрізняються гарною зварюваністю, властивою псевдо-α-сплавам, та високою термічною стабільністю.

Обговорення результатів. Встановлення механічних властивостей зварних з'єднань титанового псевдо-α-сплаву ПТ-3В, виконаних ЗВЗ з присадними дротами СПТ2 та 2В, дозволило зробити висновок, що найнижчі значення міцності в стані після зварювання мають з'єднання, виконані з присадним дротом 2В, та складають 643 МПа (табл. 7), що становить 86 % від міцності основного металу.

Найбільші значення міцності в стані після зварювання мають зварні з'єднання, виконані ЗВЗ з присадним дротом СПТ2, та становлять 759 МПа (табл. 7). Значення міцності з'єднань, виконаних з застосуванням присадного дрота СПТ2, знаходяться на рівні міцності основного металу (табл. 7). Причому слід відзначити, що міцність металу шва дещо вища та становить 818 МПа або 109 % порівняно з міцністю основного металу. Руйнування зразків МИ-12 для встановлення міцності зварних з'єднань відбувалося по шву в разі використання присадного дроту 2В та по основному металу в разі використання присадного дроту СПТ2. Таким чином, метал зварного шва з'єднань, виконаних з застосуванням присадного дроту СПТ2 в стані після зварювання, має дещо більшу міцність на 9 % порівняно з основним металом.

Значення показників ударної в'язкості зразків з гострим надрізом зварних з'єднань, виконаних з присадним дротом 2В, перевищують значення показників ударної в'язкості для основного металу, що пов'язано з меншим вмістом легуючих елементів в металі шва, який складається на 90 % з присадного металу зварювального дроту марки 2В. Значення показників ударної в'язкості зварних з'єднань (з'єднання виконані із застосуванням присадного дроту СПТ2) знаходяться на рівні 83 % від основного металу та відповідають значенням ударної в'язкості ЗТВ зварного з'єднання. Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що застосування присадного дроту СПТ2 для зварювання у вузький зазор титанового сплаву ПТ-3В дозволило отримати структуру металу шва схожу з структурою основного металу та забезпечити рівноміцність зварного з'єднання основному металу. Для порівняння працездатності зварних з'єднань, виконаних ЗВЗ з присадними дротами СПТ2 та 2В, потрібно проведення досліджень з малоциклової втомної міцності.

Слід зазначити, що при використанні присадного дроту марки 2В міцність зварних з'єднань менше міцності основного металу сплаву ПТ-3В, проте при дуговому зварюванні титанових сплавів легування металу шва також здійснюється переходом елементів з основного металу в шов. Це дозволяє застосовувати менш легований, в порівнянні з основним металом, присадний дріт. Висока працездатність зварних з'єднань титанових сплавів значної товщини в цьому разі може бути забезпечена за рахунок високої пластичності та ударної в'язкості металу шва.

Для підвищення міцності зварних з'єднань сплаву ПТ-3В при використанні присадного дроту марки 2В можливе застосування відпалу. Так відпал при 780 °С з подальшим охолодженням у печі дозволяє підняти міцність металу шва до 799 МПа при значеннях ударної в'язкості $KCV = 89$ см² (див. табл. 7). Однак не завжди можливе практичне застосування відпалу для зварних з'єднань титанових сплавів значної товщини.

Таким чином, застосування присадного дроту СПТ2 для зварювання у вузький зазор титанового сплаву ПТ-3В магнітокерованою дугою дозволило забезпечити рівноміцність зварного з'єднання основному металу в стані після зварювання.

Висновки

1. Присадні дроти 2В і СПТ2 при зварюванні у вузький зазор магнітокерованою дугою титанового сплаву ПТ-3В забезпечують якісне формування вогнутої поверхні зварного валика, міцність зварних з'єднань, виконаних з присадним дротом 2В, знаходиться на рівні 643 МПа, що становить 86 % від міцності основного металу.

2. Мікроструктура металу зварних швів сплаву ПТ-3В, виконаних ЗВЗ з присадними дротами СПТ2 та 2В, схожа та складається з рівноосних та нерівноосних первинних β-зерен, мікроструктура в обсязі первинних зерен — α-фаза пластинчастого типу, подібність мікроструктури різних ділянок зварних з'єднань сплаву ПТ-3В може бути підтвердженням близькості їх фазового складу.

3. Застосування присадного дроту СПТ2 для зварювання у вузький зазор титанового сплаву ПТ-3В дозволило отримати структуру металу шва схожу з структурою основного металу та забезпечити рівноміцність зварного з'єднання основному металу в стані після зварювання.

Список літератури/References

1. Hori, K., Heneda, M. (1999) Narrow gap arc welding. *J. of the JWC*, **3**, 41–62.
2. Jae-Ho Jun, Sung-Ryul Kim, Sang-Myung Cho (2016) A study on productivity improvement in narrow gap TIG welding. *J. of Welding and Joining*, 34 (**1**), 68–74. DOI: https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.68
3. Gaurav Dak, Navneet Khanna, Chandan Pandey (2023) Study on narrow gap welding of martensitic grade P92 and austenitic grade AISI 304L SS steel for ultra-supercritical power plant application. *Archiv. Civ. Mech. Eng.*, 23(**14**), DOI: https://doi.org/10.1007/s43452-022-00540-3
4. Fang, N., Guo, E., Huang, R. et al. (2021) Effect of welding heat input on microstructure and properties of TC4 titanium alloy ultra-narrow gap welded joint by laser welding with filler wire. *Materials Research Express*, 8(**1**), 016511. DOI: http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/abd4b3
5. Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Romanyuk, V.S. et al. (2010) Narrow-gap welding of up to 110 mm thick high-strength titanium alloys. *The Paton Welding J.*, **5**, 34–38. https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/as/2010/05/07
6. Dong, Z., Tian, Y., Zhang, L. et al. (2024) Research status of high efficiency deep penetration welding of medium-thick plate titanium alloy: A review. *Defence Technology*, **45**, March, 178–202. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.08.004
7. Fang, D.S. (2017) *Study on the characteristics of three-wire indirect arc and its thick-wall narrow gap welding process under gas protection*: Ph.D. Thesis, Dalian University of Technology, Dalian, China.
8. Akhonin, S.V., Bilous, V.Yu., Selin, R.V. et al. (2023) Narrow-gap TIG welding of thick steel 20. *The Paton Welding J.*, **6**, 21–26. https://doi.org/10.37434/as2023.06.04
9. Ding, L., Qin, B., Ge, K. et al. (2023) Microstructures and mechanical properties of thick Ti–6Al–3Nb–2Zr–1Mo joint by magnetron-controlled narrow gap TIG welding. *Metals and Materials Inter.*, 29(**8**), 2304–2315. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s12540-02-01367-6
10. Wan, L., Huang, Y., Lv, S. et al. (2016). Narrow-gap tungsten inert gas welding of 78-mm-thick Ti–6Al–4V alloy. *Materials Sci. and Technology*, 32(**15**), 1545–1552. DOI: https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1131941
11. Xinyu Bao Yonglin Ma, Shuqing Xing, Yongzhen Liu, Weiwei Shi (2022) Effects of pulsed magnetic field melt treatment on grain refinement of Al–Si–Mg–Cu–Ni alloy direct-chill casting billet. *Metals*, 12(**7**), 1080. DOI: https://doi.org/10.3390/met12071080
12. Belous, V.Yu., Akhonin, S.V. (2011) Formation of narrow-gap welded joints on titanium using the controlling magnetic field. *The Paton Welding J.*, **4**, 19–23. https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/as/2011/04/04
13. Yujun Hu, Hongjin Zhao, Xuede Yu et al. (2022) Research progress of magnetic field regulated mechanical property of solid metal materials, *Metals*, **12**, 1988. DOI: https://doi.org/10.3390/met12111988

STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF TITANIUM ALLOY PT-3V PRODUCED BY NARROW-GAP WELDING

S.V. Akhonin, V.Yu. Bilous, R.V. Selin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: titan.paton@gmail.com

Narrow-gap argon arc welding is an effective and cost-efficient method of making thick titanium alloy joints. A feature of the developed technology is the constant chemical composition of the weld metal, the proportion of the base metal in the weld metal being 89…91 %. This work considers the influence of the filler material on the structure and properties of welded joints of the titanium alloy PT-3V, performed by tungsten electrode narrow-gap welding with a magnetically controlled arc. Filler wires 2 V and SPT2 in narrow-gap welding of the titanium alloy PT-3V ensure high-quality formation of the concave surface of the welded bead, the strength of welded joints produced with filler wire 2 V is at the level of 643 MPa, which is 86 % of the strength of the base metal. The use of filler wire SPT2 for narrow-gap welding of titanium alloy PT-3V made it possible to obtain a weld metal structure similar to the structure of the base metal and to ensure equal strength of the welded joint to the base metal in the as-welded state. 13 Ref., 7 Tabl., 8 Fig.

Keywords: titanium, titanium alloy, argon-arc welding, narrow-gap welding, control magnetic field, filler wire, microstructure, mechanical properties

Отримано 10.07.2025
Отримано у переглянутому вигляді 17.07.2025
Прийнято 07.10.2025