

МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ, ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ СПОСОБАМИ ЗВАРЮВАННЯ

С.В. Ахонін¹, В.Ю. Білоус¹, Р.В. Селін¹, Е.Л. Вржижевський¹, С.Л. Антонюк²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: belousvy@gmail.com

²ДП «АНТК ім. О.К. Антонова». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Досліджено властивості зварних з'єднань титанових псевдо- β -сплавів ВТ19 і Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe та складнолегованого титанового ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120, отриманих електронно-променевим і аргонодуговим зварюванням та після декількох видів термічної обробки (відпал, регламентований відпал, гартування у воду, уповільнене охолодження). Перевагою технології електронно-променевого зварювання титану і сплавів на його основі крім забезпечення надійного захисту зварних з'єднань є можливість здійснення локального підігріву і подальшої термічної обробки у вакуумній камері. З метою порівняння властивостей зварних з'єднань в стані після зварювання та додаткової термообробки було запропоновано критерій якості. Встановлено, що виконання електронно-променевого зварювання з використанням локальної термічної обробки та попереднього підігріву, а також виконання з'єднань аргонодуговим зварюванням з житком присадного матеріалу, що дозволяє знизити на 10...20 % кількість легуючих елементів в металі шва порівняно з основним металом, забезпечує високу якість зварних з'єднань високоміцних титанових псевдо- β -сплавів в стані після зварювання. Бібліогр. 19, табл. 7, рис. 5.

Ключові слова: титан, титанові сплави, двофазні, ($\alpha+\beta$)-, економнолеговані, псевдо- β -, зварні з'єднання, термічна обробка, відпал, гартування, старіння, мікроструктура, механічні властивості

Вступ. В останні десятиліття спостерігається значне підвищення обсягу досліджень, метою яких є отримання титанових сплавів з новим комплексом властивостей [1–3]. У провідних світових матеріалознавчих центрах США, Китаю та ЄС проводяться інтенсивні роботи зі створення нових титанових сплавів з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Конструкційні псевдо- β -титанові сплави є одними з найбільш перспективних металевих матеріалів на основі титану. Однією з переваг сучасних псевдо- β -сплавів титану є висока технологічність, що дозволяє проводити їх деформацію при більш низьких зусиллях і температурах, ніж традиційних жароміцних і високоміцних сплавів з псевдо- α - і ($\alpha+\beta$)-структурами [3, 4]. Крім того, термічна обробка конструкцій з цих сплавів може виконуватися без перенесення в гартівне середовище, що зменшує деформаційні і залишкові напружки та виключає окислення металу [5]. Особливої уваги викликає можливість порівняння властивостей зварних з'єднань псевдо- β -сплавів з зварними з'єднаннями високоміцних ($\alpha+\beta$)-сплавів.

Для ширшого застосування сплавів титану у різних галузях промисловості необхідно як підвищувати їх механічні характеристики [6], так і знижувати вартість виробництва, що можна досягти створенням нових сплавів з поліпшеними експлу-

атаційними властивостями і застосуванням нових високоефективних технологій виробництва, в тому числі і зварювання.

Стосовно псевдо- β -сплавів титану в світовій практиці існує тенденція застосування легуючих елементів, які мали б відносно невелику вартість. Це дозволяє здешевити процес виробництва і відповідно знизити собівартість напівфабрикатів [7]. Такі сплави прийнято іменувати економнолегованими. До економнолегованих титанових сплавів відносяться низьколеговані сплави, що не містять дорогих і дефіцитних елементів (Mo, Ta, Zr, Nb, W та ін.) і мають в основі систем легування відносно дешеві компоненти технічної чистоти (Al, Fe, Cu і т. п.) [3]. Також економнолеговані сплави можуть містити в якості легуючого елемента кисень [8].

Титановими β -сплавами вважаються сплави, які при різкому охолодженні від температур β -області гартуються на β -фазу. Коефіцієнт β -стабілізації таких сплавів $K_{\beta} > 1$ [9]. Серед цих сплавів виділяють β -сплави і сплави з відносно невеликою кількістю α -фази — псевдо- β -сплави, які мають $K_{\beta} = 1,4...2,4$, при цьому поліморфне перетворення протікає за схемою $\beta \rightarrow (\beta+\alpha)$. У стабільному стані вони мають ($\beta+\alpha$)-структуру [10].

Особливістю псевдо- β -сплавів є їх висока пластичність, яка дозволяє піддавати їх інтенсивній холодній деформації. Псевдо- β - і β -титанові спла-

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>, Е.Л. Вржижевський — <http://orcid.org/0000-0001-8651-8510>

ви при обробці на твердий β -розчин порівняно з α - або $\alpha+\beta$ -сплавами, що мають рівну межу плинності, значно більш високу пластичність і в'язкість руйнування, а також більшу деформаційну здатність при різних видах навантаження. Водночас їх характеристики міцності можуть бути істотно підвищені за рахунок старіння, яке приводить до розпаду β -твердого розчину і виділенню фаз, що зміцнюють [11, 12].

Дослідження властивостей зварних з'єднань сплавів, що містять велику кількість β -стабілізаторів, виявили їх суттєві недоліки: високу схильність до ліквідації легуючих елементів, сильну залежність тривалості старіння від вмісту легуючих елементів і домішок, а також низьку термічну стабільність, яка обумовлена виділенням в структурі цих сплавів інтерметалідів, наприклад $TiCr_2$ [13]. При зварюванні економнолегованих псевдо- β -сплавів зварні з'єднання мають такі недоліки: недостатній рівень міцності, пластичності, нестабільність властивостей, внаслідок чого вони рекомендовані до застосування в основному в «наземних об'єктах» (медичні імплантати, деталі автомобілів і різні декоративні вироби).

Тому доцільно оцінити властивості зварних з'єднань, виконаних електронно-променевим (ЕПЗ) і аргонодуговим (АДЗ) зварюванням, конструктивних та економнолегованих титанових псевдо- β -сплавів та порівняти їх з властивостями зварних з'єднань високоміцного складнолегованого титанового ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120 системи $Ti-5,5Al-2,8Mo-2,3V-4Nb-1,3Cr-1Fe-2,7Zr$, а також встановити рівень зміцнення зварних з'єднань за рахунок термообробки.

Метою цієї роботи є визначення впливу електронно-променевого і аргонодугового зварювання та декількох видів термічної обробки, таких як відпал, гартування в воду, регламентований відпал, уповільнене охолодження, на властивості основного металу і зварних з'єднань титанових псевдо- β -сплавів ВТ19, $Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe$

(LCB-5,1) та ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120, виконаних зварюванням плавленням.

Методика досліджень. Для досягнення поставленої мети досліджено структуру і властивості основного металу та з'єднань титанових псевдо- β -сплавів ВТ19, $Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe$ (LCB-5,1) та ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120 [14, 15], виконаних аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом наскрізним проплавленням та електронно-променевим зварюванням, які після зварювання були піддані термічній обробці.

Виконували ЕПЗ зразків товщиною 10 мм з конструктивного псевдо- β -сплаву ВТ19, з економнолегованих псевдо- β -сплавів, таких як сплав Timet LCB і $Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe$ (LCB-5,1) та ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120. Режими ЕПЗ наведені в табл. 1. Однією з переваг технології ЕПЗ титану і сплавів на його основі, крім забезпечення надійного захисту зварних з'єднань, є можливість здійснення локального підігріву і подальшої термічної обробки у вакуумній камері [16, 17]. Режими ЕПЗ з локальною термічною обробкою (ЛТО) з'єднань товщиною 10 мм зі швидкостями зварювання 7 мм/с наведено в табл. 1.

Також було виконано АДЗ зразків товщиною 6 мм сплавів ВТ19, $Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe$ (LCB-5,1) та ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120. Режими АДЗ наскрізним проплавленням без застосування присадного металу наведені в табл. 2. Для перспективних високоміцних титанових сплавів, таких як ВТ19, економнолегований сплав LCB-5,1 і ($\alpha+\beta$)-сплав Т120, відсутні зварювальні дроти відповідного хімічного складу. Тому в разі необхідності доцільно використати як присадний метал нелегований титановий дріт марки ВТ1-00св, що дозволяє, не змінюючи систему легування зварного шва, зменшити вміст легуючих елементів у металі шва, в залежності від режиму зварювання. Режими 9–12 (табл. 2) передбачають АДЗ з використанням присадного дроту.

Таблиця 1. Режими ЕПЗ дослідних псевдо- β -титанових сплавів ВТ19, LCB-5,1 та ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120

Режим	Марка сплаву	Струм променя I_n , МА	$V_{зв}$, мм/с	$T_{підігр}$, °С	Температура ЛТО, °С	Тривалість ЛТО, хв
1	ВТ19	120	7	–	–	–
2	–»–	–»–	11	–	–	–
3	Timet LCB	–»–	7	–	–	–
4	LCB-5,1	–»–	–»–	–	–	–
5	ВТ19	90	–»–	400	–	–
6	–»–	–»–	–»–	–»–	750	10
7	LCB-5,1	–»–	–»–	–»–	–	–
8	–»–	–»–	–»–	–»–	750	10
9	Т120, Т110	–»–	–»–	–	–	–
10	Т120	–»–	–»–	–	900	10

Таблиця 2. Режими АДЗ високоміцних псевдо-β-титанових сплавів BT19, LCB-5,1 та (α+β)-сплаву T120

Режим	Сплав	$I_{зв}$, А	U_d В	$V_{зв}$, м/г	$T_{підгр}$, °С	$V_{п.пр}$, м/г	Вміст присадного металу у шві, %
1	BT19	310	12	10	–	–	–
3 (по флюсу)	–»–	220	11	–»–	–	–	–
5 (по флюсу)	–»–	320	–»–	16	–	–	–
6	LCB-5,1	330	12	10	–	–	–
7	–»–	310	–»–	–»–	400	–	–
8 (по флюсу)	–»–	240	11	16	–	–	–
9	BT19	380	12	8	–	30	10
10	–»–	420	–»–	–»–	–	60	20
11	LCB-5,1	350	–»–	10	–	30	10
12	–»–	–»–	–»–	–»–	–	60	20
13	T120	380	–»–	–»–	–	–	–
14	–»–	360	11	16	–	–	–
15	–»–	320	–»–	10	–	–	–
16	–»–	350	12	–»–	–	30	10
17	–»–	–»–	–»–	–»–	–	60	20

Отримати зварні з'єднання титанових сплавів можливо на режимах з різними значеннями погонної енергії. З метою оцінки ефективності обраного режиму зварювання, а також після термообробки зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів було запропоновано критерій якості режиму зварювання в умовних одиницях, який складається з вкладу режимів зварювання і термообробки у комплексне підвищення сумарних показників міцності, пластичності та ударної в'язкості зварних з'єднань титанових сплавів відносно основного металу відповідного сплаву. Загалом для титанових сплавів підвищення одних механічних властивостей, наприклад міцності, викликає відповідне зниження пластичності та показників ударної в'язкості. Але у деяких випадках це відбувається не пропорційно. Аналіз отриманих результатів механічних характеристик зварних з'єднань дозволив зробити висновок, що в зварних з'єднаннях титанових сплавів, в яких високі показники пластичності, показники ударної в'язкості знаходяться на високому рівні. В разі, якщо прийняти до розгляду лише показники міцності і ударної в'язкості та визначити їх значимість рівними, було запропоновано коефіцієнт якості режиму зварювання і він описується наступним чином:

$$K_{рзв} = 0,5(\sigma_{зв}/\sigma_{ом}) + 0,5(KCV_{зв}/KCV_{ом}).$$

Також обчислювався коефіцієнт міцності за формулою:

$$K_{пр} = \sigma_{зв}/\sigma_{ом}.$$

Результати досліджень та їх обговорення. Властивості з'єднань після зварювання. Найбільшу міцність мають зварні з'єднання економнолегованого титанового сплаву Timet LCB. Для цього

сплаву значення міцності з'єднань в стані після зварювання становлять 1068 МПа або 89 % від міцності основного металу (табл. 3). Ударна в'язкість зразків з гострим надрізом (KCV) металу шва зварних з'єднань сплаву Timet LCB, виконаних ЕПЗ, становить 3,2 Дж/см². Міцність зварного з'єднання сплаву LCB-5,1 знаходиться на рівні 95 % від міцності основного металу в стані прокату. В цілому зварні з'єднання розглянутих економнолегованих сплавів після ЕПЗ мають міцність отриманих з'єднань в стані після зварювання на рівні не менше 90 % від міцності сплаву після прокату.

Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що найбільшу міцність зварних з'єднань сплаву BT19 мають з'єднання в стані після попереднього підігріву та ЛТО, але їх коефіцієнт якості нижче, ніж коефіцієнт якості зварних з'єднань після ЕПЗ без попереднього підігріву та ЛТО. Це пояснюється високими значеннями показників ударної в'язкості зварних з'єднань сплаву BT19 без попереднього підігріву та ЛТО. Зниження міцності цих зварних з'єднань при обчисленні показника якості скомпенсоване високими значеннями відносного подовження та ударної в'язкості. Високі значення відносного подовження та ударної в'язкості пов'язані з великою кількістю метастабільної β-фази в металі шва після ЕПЗ.

Економнолеговані псевдо-β-сплави мають менші значення показника якості в стані після ЕПЗ порівняно з конструкційним псевдо-β-сплавом BT19. Показник якості зварних з'єднань ЕПЗ високоміцного (α+β)-сплаву T120 менше, ніж значення цього показника для псевдо-β-сплавів. Найбільші значення показника якості (α+β)-сплаву T120 мають зварні з'єднання ЕПЗ після ЛТО (табл. 3).

Таблиця 3. Властивості зварних з'єднань товщиною 10 мм псевдо- β -титанових сплавів VT19, LCB-5,1 і $(\alpha+\beta)$ -сплаву T120, виконаних ЕПЗ

Зразок	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCV, Дж/см ²	$K_{рзв}$	$K_{пр}$
VT19, OM	958	887	12	29	–	–
VT19, зварне з'єднання: режим 1;	876	842	11,3	28	0,93	0,91
режим 2;	891	847	10,0	27	–»–	0,93
режим 5 (п.п. 400 °С);	893	879	12,0	20	0,8	–»–
режим 6 (п.п. 400 °С, ЛТО 750 °С)	937	868	5,3	21	0,85	0,98
Timet LCB, OM	1187	1145	12,7	13	–	–
Timet LCB, зварне з'єднання, режим 3	1068	1033	5,1	3,2	0,57	0,89
LCB-5,1, OM	1015	939	1,9	6,4	–	–
LCB-5,1, зварне з'єднання: режим 4;	960	921	3,8	3,6	0,75	0,94
режим 7 (п.п. 400 °С);	992	959	5,1	3,6	0,76	0,98
режим 4 (п.п. 400 °С, ЛТО 750 °С)	997	964	6,5	5,3	0,9	0,98
T120, OM	1133	1040	10,7	33	–	–
T120, зварне з'єднання: режим 9;	1082	1006	6,7	15,2	0,72	0,95
режим 10 (ЛТО 750 °С)	1061	1012	8,0	24	0,85	0,93
T110, OM	1130	999	6	38	–	–
T110, зварне з'єднання, режим 9	1080	–	–	11	0,62	0,96

Механічні властивості зварних з'єднань економнолегованого титанового сплаву LCB-5,1, виконаних ЕПЗ, мають нижчі значення міцності в стані після зварювання та коефіцієнта якості порівняно з конструкційним сплавом VT19. Найнижчі значення міцності в стані після зварювання та коефіцієнта якості мають зварні з'єднання $(\alpha+\beta)$ -сплаву T120.

Найбільші значення міцності в стані після зварювання і коефіцієнта якості мають з'єднання сплаву LCB-5,1, виконані ЕПЗ з застосуванням попереднього підігріву та ЛТО.

Вивчення механічних властивостей зварних з'єднань титанових псевдо- β -сплавів, виконаних АДЗ вольфрамовим електродом (в тому числі із застосуванням флюсів), показало, що значення міцності в стані після зварювання знаходяться на одному рівні, а більші значення коефіцієнту якості мають з'єднання сплаву VT19, виконані без застосування флюсів (табл. 4). Для сплаву LCB-5,1 застосування флюсів забезпечило найвищі значення показника якості для зварних швів, виконаних без зміни хімічного складу металу шва. Застосування присадного дроту і пов'язані з цим зміна хімічно-

го складу металу шва та властивостей зварного з'єднання дозволило підняти як значення показників міцності, так і значення показників якості зварних з'єднань. Значення показників якості зварних з'єднань $(\alpha+\beta)$ -сплаву T120 поступаються відповідним показникам псевдо- β -сплавів.

Найбільші значення показників якості в стані після зварювання мають зварні з'єднання сплаву VT19, виконані АДЗ з додаванням присадного дроту VT1-00св в кількості 20 %, та економнолегованого сплаву LCB-5,1, виконані з додаванням присадного дроту VT1-00св в кількості 10 %. Значення показників якості цих зварних з'єднань перевищують значення показників якості з'єднань, виконаних ЕПЗ.

Зниження міцності зварних з'єднань усіх сплавів можливо пояснити зростанням кількості β -фази в металі швів після впливу ЕПЗ (рис. 1, б) в порівнянні з основним металом (рис. 1, а). Застосування ЛТО для сплаву T120 дозволило знизити кількість β -фази майже до рівня основного металу (рис. 1, в). Найбільша кількість β -фази в стані після зварювання фіксується в металі шва зварного з'єднання псевдо- β -сплаву VT19, який складається практично з чистої β -фази (рис. 1, г). В металі швів сплавів Timet

Таблиця 4. Механічні властивості зварних з'єднань псевдо-β-сплавів VT19, LCB-5.1 та (α+β)-сплаву T120, виконаних АДЗ в стані після зварювання

Режим	Сплав, зразок	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCV, Дж/см ²	$K_{рзв}$	$K_{пр}$
1	VT19, зварне з'єднання	860	839	13,3	19	0,77	0,89
3	VT19, зварне з'єднання по флюсу	857	815	13,3	14	0,68	—»—
5	—»—	849	813	10,7	13	0,66	0,88
6	LCB-5,1, з'єднання	921	—	—	4,9	0,89	0,85
7	LCB-5,1, з'єднання з п.п. 400	799	—	—	4,3	0,77	0,74
8	LCB-5,1, з'єднання по флюсу	972	936	10,0	5,7	0,99	0,90
9	VT19, з'єднання VT1-00св, 10 %	895	868	7,3	28	0,93	0,93
10	VT19, з'єднання VT1-00св, 20 %	963	942	6	32	1,01	0,89
11	LCB-5,1, з'єднання VT1-00св, 10 %	1002	—	—	5,5	0,98	0,93
12	LCB-5,1, з'єднання VT1-00св, 20 %	960	—	—	3,5	0,75	0,89
13	T120, $V_{зв} = 10$ м/год	1157	1076,9	—	17,6	0,79	1,02
14	T120, по флюсу, $V_{зв} = 16$ м/ч	1162	1069	—	4,6	0,58	0,12
15	T120, по флюсу, $V_{зв} = 10$ м/ч	1075	985	15,3	4,9	0,55	0,95
16	T120, присадка VT1-00св, 10 %	1110	1047	—	24,2	0,88	0,98
17	T120, присадка VT1-00св, 25 %	1006	937,8	4,0	14,1	0,67	0,89

LCB та LCB-5,1 також збільшується кількість β-фази, але її менше порівняно зі сплавом VT19.

В структурі металу швів сплаву T120, виконаних АДЗ, після зварювання також фіксується в більшій кількості β-фаза (рис. 2). Причому засто-

сування флюсу призводить до збільшення кількості β-фази (рис. 2, б), а додавання нелегованого присадного металу VT1-00св та зменшення вмісту легуючих елементів призводить до зменшення кількості β-фази в металі шва (рис. 2, в).

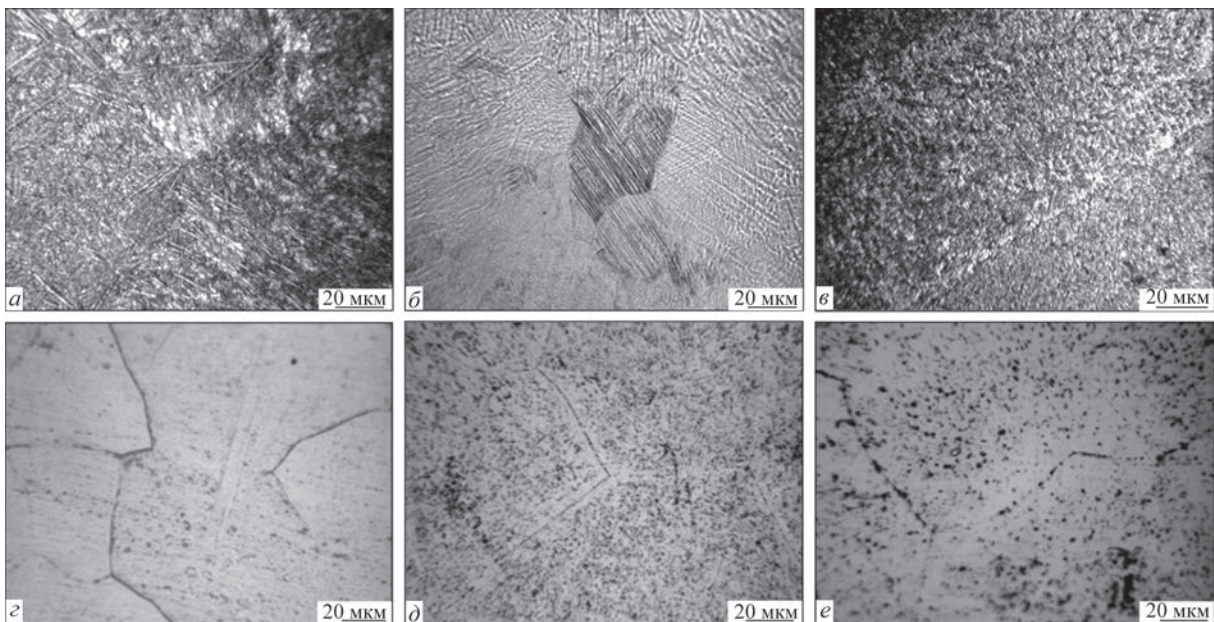


Рис. 1. Мікроструктура металу швів зварних з'єднань, виконаних ЕПЗ: а — основний метал T120; б — метал шва T120; в — метал шва T120 після ЛТО 850 °С; г — метал шва VT19; д — метал шва Timet LCB; е — метал шва LCB-5,1

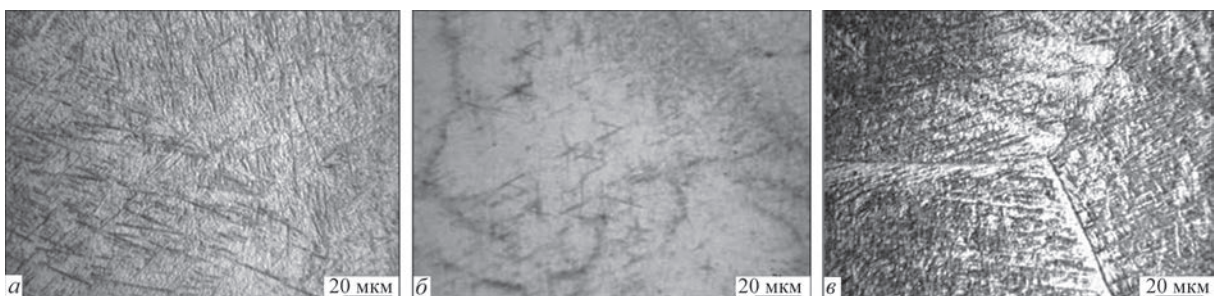


Рис. 2. Мікроструктура металу шва зварних з'єднань сплаву T120, виконаних АДЗ: а — метал шва (режим 13); б — метал шва, по флюсу (режим 14); в — метал шва, виконаний присадним дротом VT1-00св (режим 16)

Таблиця 5. Режими пічної термообробки зварних з'єднань псевдо- β -сплавів VT19, LCB-5,1 та $(\alpha+\beta)$ -сплаву T120

Режим ТО	Тип зміцнювальної ТО
1	Відпал VT19, LCB-5,1: нагрівання до температури 750 °С, витримка 1 год, охолодження з піччю.
2	Загартування та старіння VT19, LCB-5,1: нагрівання до температури 750 °С, витримка 1 год, гартування у воду, старіння при 450 °С, витримка 4 год, охолодження на повітрі.
3	Уповільнене охолодження VT19, LCB-5,1: нагрівання до температури 750 °С, витримка 1 год, охолодження з регламентованою швидкістю 1 °С/хв.
4	Регламентований відпал VT19, LCB-5,1: нагрівання і витримка при температурі 750 °С 1 год; охолодження до 680 °С, витримка 1 год; охолодження до 380 °С, витримка 8 год, охолодження на повітрі; старіння при 450 °С, витримка 4 год, охолодження на повітрі.
5	Відпал T120: нагрівання до температури 900 °С, витримка 1 год, охолодження з піччю.
6	Регламентований відпал T120: нагрівання до 870 °С, витримка 1 год, охолодження з піччю до 800 °С, витримка 1 год, охолодження на повітрі; старіння при 380 °С 8 год, охолодження на повітрі; 550 °С 2 год, охолодження на повітрі.
7	Загартування та старіння T120: нагрівання до температури 850 °С, витримка 1 год, загартування у воду, старіння при 550 °С, витримка 4 год, охолодження на повітрі.

Таким чином, досліджено властивості зварних з'єднань псевдо- β -сплавів VT19, LCB-5,1 та $(\alpha+\beta)$ -сплаву T120, виконаних ЕПЗ та АДЗ, і встановлено, що в стані після зварювання найбільші показники якості мають з'єднання, виконані з додаванням присадного дроту VT1-00св на режимах,

що забезпечують вміст металу VT1-00 в шві на рівні 10 % для сплаву LCB-5,1, а для сплаву VT19 на рівні 20 %.

Вплив термічної обробки на властивості зварних з'єднань. Термічну обробку (ТО) зварних з'єднань псевдо- β -титанових сплавів проводять з

Таблиця 6. Механічні властивості зварних з'єднань псевдо- β -сплавів VT19, LCB-5,1 і $(\alpha+\beta)$ -сплаву T120, виконані АДЗ та ЕПЗ в стані після відпалу

Зразок	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCV, Дж/см ²	$K_{рзв}$	$K_{пр}$
VT19, з'єднання ЕПЗ, $V_{зв} = 7$ мм/с, попередній підігрів 400 °С	1027	986	12,0	26	0,98	1,07
VT19, з'єднання ЕПЗ, $V_{зв} = 11$ мм/с	1024	984,9	8,7	24	0,94	1,06
VT19, з'єднання АДЗ без присадки	981	946	9,7	29,4	1,01	1,02
VT19, з'єднання АДЗ з присадкою, кількість VT1-00св в шві 20 %	1011	989	9,1	25,9	0,97	1,05
LCB-5,1, ОМ	1071	971	–	7,2	–	–
LCB-5,1, з'єднання ЕПЗ	1169	1141	1,3	4,8	0,87	1,09
LCB-5,1, з'єднання АДЗ без присадки	1082	1033	–	5,3	0,87	1,01
LCB-5,1, з'єднання АДЗ по флюсу	1197	1146	–	6,0	0,97	1,11
LCB-5,1, з'єднання АДЗ з присадкою, кількість VT1-00св в шві 10 %	1463	–	–	7,3	1,18	1,36
T120, з'єднання ЕПЗ	1051,3	942,6	14,7	51,9	1,3	0,92
T120, з'єднання АДЗ без присадки	1013	936,3	4,0	42,9	1,13	0,89
T120, з'єднання АДЗ по флюсу, $V_{зв} = 16$ м/год	1151	1074	–	34,6	1,06	1,02
T120, з'єднання АДЗ з 10 % VT1-00св	1168	1083,6	4,0	48	1,29	1,03
T120, з'єднання АДЗ з 25 % VT1-00св	921	841	5,1	49	1,19	0,81

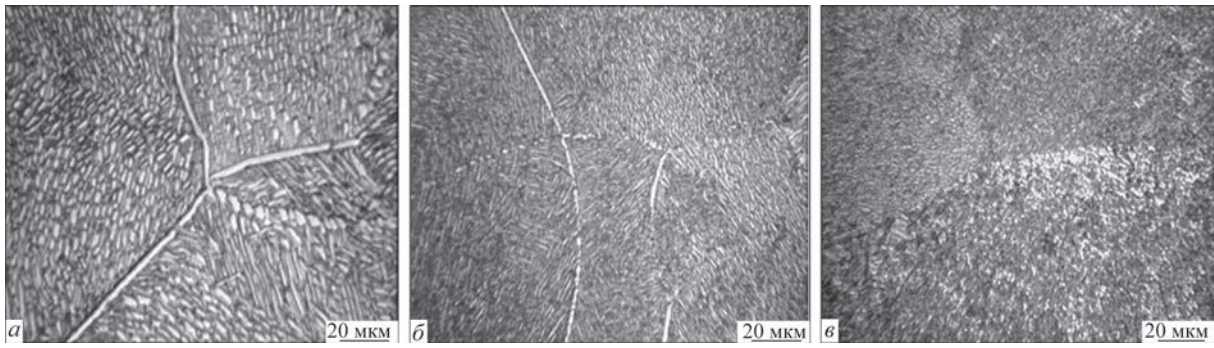


Рис. 3. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання титанового сплаву Т120 у стані після ТО: *а* — відпал; *б* — гартування; *в* — регламентований відпал

метою зняття внутрішніх напруг, отримання оптимальних фізико-механічних властивостей і стабільної структури не схильної до зміни фазового складу та властивостей при тривалому нагріванні при робочих температурах. З цією метою досліджували

вплив пічного відпалу, загартування з наступним старінням та уповільненого охолодження з пічкою зі швидкістю 1 °С/хв на властивості зварних з'єднань псевдо-β-титанових сплавів ВТ19 та LCB-5,1, виконаних як ЕПЗ, так і АДЗ, у тому числі із застосу-

Таблиця 7. Механічні властивості зварних з'єднань сплавів ВТ19, LCB-5,1 і Т120, виконаних АДЗ та ЕПЗ, в стані після зміцнюючої ТО

Зразок	Режим ТО	$\sigma_{в?}$ МПа	$\sigma_{02?}$ МПа	δ , %	KCV , Дж/см ²	$K_{рзв}$	$K_{пр}$
LCB-5,1, АДЗ по флюсу	2, гартування у воду і старіння	1156	1127	4,2	6,9	1,10	1,13
LCB-5,1, АДЗ з присадкою ВТ1-00св 10 %	—»—	1055	1055	2,8	5,3	0,93	1,04
LCB-5,1, АДЗ з присадкою ВТ1-00св 10 %	3, уповільнене охолодження	958	958	1,3	6,5	0,98	0,94
LCB-5,1, ЕПЗ	2, гартування у воду і старіння	1204	1199	8,6	4,2	0,92	1,19
LCB-5,1, ЕПЗ	3, уповільнене охолодження	964	905	4,7	7,1	1,02	0,95
ВТ19, ЕПЗ	Гартування у воду і старіння	1285	1234	4,7	23,0	1,06	1,34
ВТ19, АДЗ	—»—	1273	—	—	11,0	0,85	1,33
ВТ19, ЕПЗ	ЕПЗ, уповільнене охолодження	1068	1012	11,3	23,0	0,95	1,11
ВТ19, АДЗ	АДЗ, уповільнене охолодження	1033	1005	6,0	24,0	0,95	1,07
Т120, ЕПЗ	7, гартування у воду і старіння	1348	1275,3	1,3	8,3	0,73	1,19
Т120, ЕПЗ	6, регламентований відпал	1204,6	1109,3	4,5	13,2	0,74	1,06
Т120, АДЗ без присадки	7, гартування у воду і старіння	1350,6	1255	—	9,7	0,75	1,19
Т120, АДЗ без присадки	6, регламентований відпал	1253,1	1165,2	2	16,3	0,81	1,1
Т120, АДЗ з присадкою ВТ1-00св 10 %	7, гартування у воду і старіння	1318	1305,7	2,7	10,8	0,75	1,16
Т120, АДЗ з присадкою ВТ1-00св 10 %	2, регламентований відпал	1105,6	1040,4	—»—	18,1	0,77	0,98

ванням присадного дроту ВТ-00св [18, 19]. Режими термообробки наведено у табл. 5.

Вивчення механічних властивостей зварних з'єднань титанових псевдо- β -сплавів ВТ19 і сплаву LCB-5,1 дозволило зробити висновок, що в стані після відпалу найбільші значення показника якості мають з'єднання, виконані АДЗ, причому для сплаву ВТ19 — без присадного дроту, а для сплаву LCB-5,1 — з присадним дротом в кількості 10 % в металі шва (табл. 6).

Загалом міцність багатьох зварних з'єднань в стані після відпалу знаходиться на рівні не меншій за рівень основного металу.

Найбільші значення показника якості ($\alpha+\beta$ -сплаву Т120 мають зварні з'єднання, виконані АДЗ з присадним дротом в кількості 10 % в металі шва за рахунок високих значень ударної в'язкості.

Аналіз механічних властивостей зварних з'єднань титанового економнолегованого псевдо- β -сплаву LCB-5,1 і конструкційного псевдо- β -сплаву ВТ19, що були піддані таким видам термічного зміцнення як гартування у воду зі старінням і сповільненому охолодженню з регламентованою швидкістю 1 °С/хв, дозволив зробити висновок, що найбільші значення показника якості мають з'єднання, виконані без зміни хімічного складу металу шва, а саме ЕПЗ та АДЗ без присадки (табл. 7). Найвищі значення міцності мають зварні з'єднання, виконанні ЕПЗ.

Порівнюючи вплив ТО без перенесення в гартівне середовище, а саме відпалу та уповільненого охолодження, найбільші значення міцності мають з'єднання, які були піддані відпалу. Відпал дозволяє забезпечити рівномірність зварних з'єднань титанового сплаву ВТ19 та економнолегованого LCB-5,1.

Всі проведені ТО призводять до формування однорідної структури в зварному з'єднанні та зниження кількості β -фази в металі шва (рис. 3). Причому після гартування внутрішньозеренна структура зварних з'єднань сплаву Т120 складається з пластинчастої α -фази, яка при цьому утворює візерунок кошикового плетіння, а товщина пластинчастої α -фази найменша і становить 0,7...1,0 мкм (рис. 3, б). Після регламентованого відпалу в металі шва утворюються пластини α -фази різних розмірів, які відрізняються великою різноманітністю параметрів структурних елементів з високими показниками ударної в'язкості (рис. 3, в).

Після ТО мікроструктура металу швів псевдо- β -сплавів також складається з рівновісних витягнутих в напрямку тепловідводу первинних β -зерен, які при відпалі зазнали розпад β -фази з утворенням рівномірної однорідної ($\alpha+\beta$ -структури з пластинчастою α -фазою різної довжини (1...5 мкм) і товщини (0,5...1,0 мкм) (рис. 4).

Після гартування та старіння мікроструктура металу швів найбільш дрібнодисперсна, розмір продуктів розпаду найчастіше не перевищує

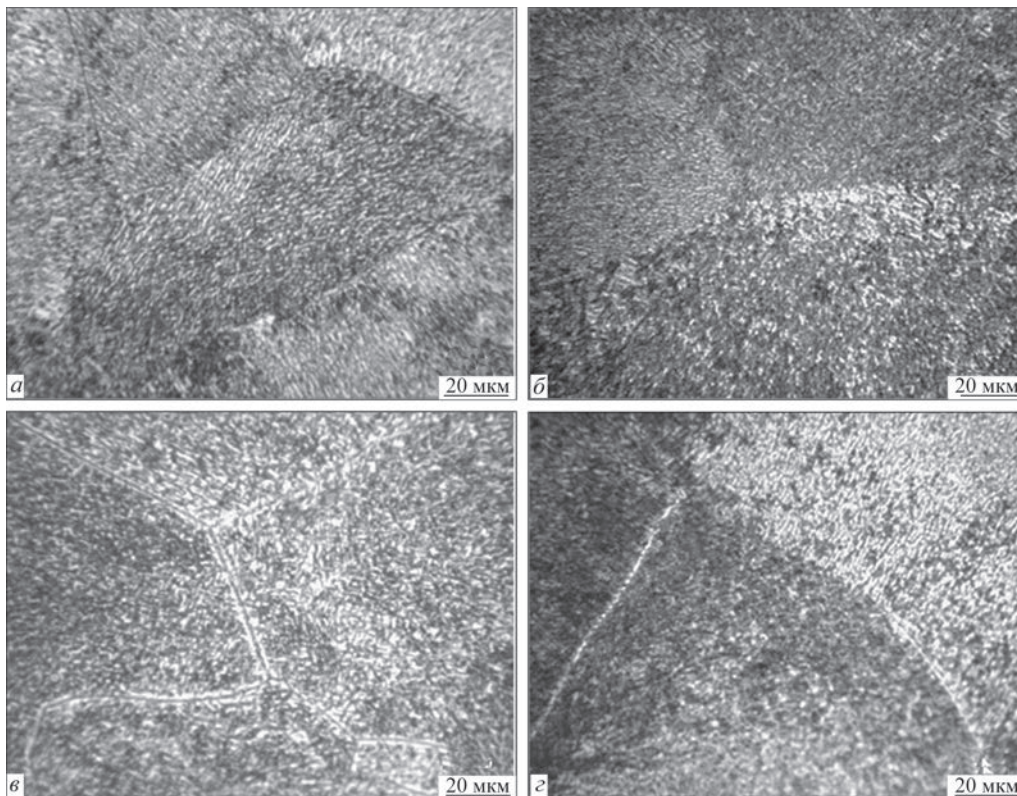


Рис. 4. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання псевдо- β -сплаву ВТ19, виконаного ЕПЗ, у стані після ТО: а — відпал; б — гартування і старіння; в — уповільнене охолодження; з — регламентований відпал

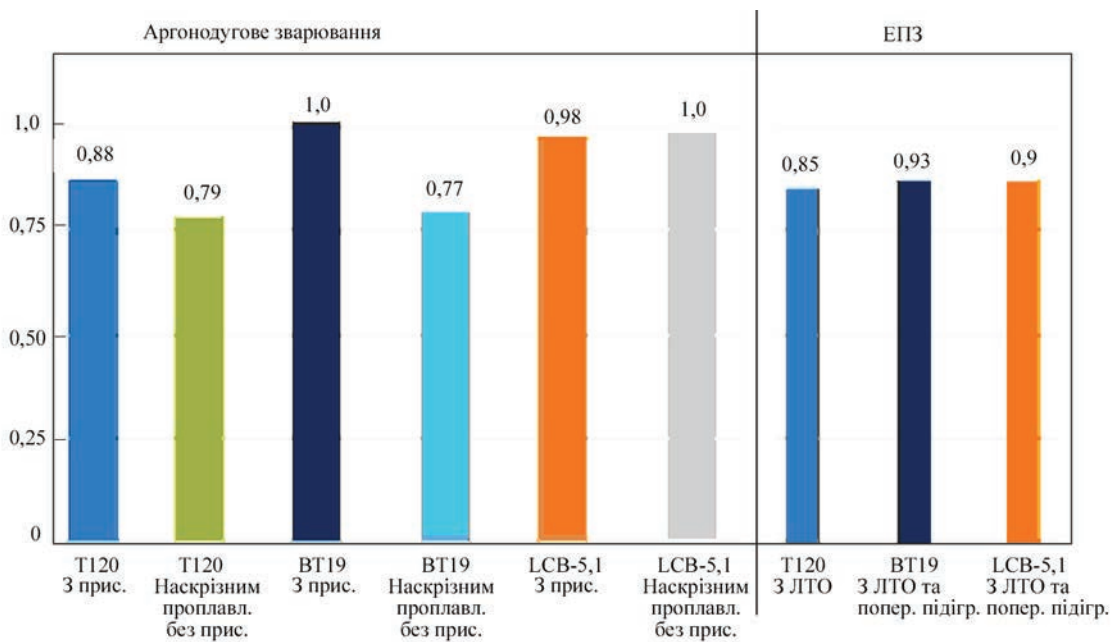


Рис. 5. Коефіцієнти якості зварних з'єднань деяких режимів АДЗ і ЕПЗ в стані після зварювання

1 мкм (рис. 4, б). Після уповільненого охолодження з регламентованою швидкістю $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ та регламентованого відпалу в структурі металу швів фіксуються частинки α -фази товщиною 1,0...1,5 мкм (рис. 4, в, з).

Таким чином, порівняння коефіцієнтів якості режимів зварювання для псевдо- β -титанового сплаву BT19 і LCB-5,1 дозволяє зробити висновок, що для конструкційного сплаву BT19 найбільш ефективним режимом зварювання є АДЗ з подачею менш легованого присадного матеріалу (рис. 5). Причому для конструкційного сплаву BT19 доцільно зниження ступеня легування металу шва на 20 %, а для економнолегованого псевдо- β -сплаву LCB-5,1 — на 10 %. Цю різницю можна пояснити більшою кількістю легуючого елемента Fe, внесок якого в зміцнення сплаву LCB-5,1 великий.

Порівняння показників міцності зварних з'єднань псевдо- β -сплавів, виконаних ЕПЗ, дозволило зробити висновок, що найбільше зміцнення зварних з'єднань порівняно зі станом металу після прокату забезпечує гартування у воду і старіння, а найменше — уповільнене охолодження з регламентованою швидкістю.

Висновки

1. Встановлено, що можливо забезпечити високу якість зварних з'єднань перспективних високоміцних титанових псевдо- β -сплавів в стані після зварювання за рахунок виконання ЕПЗ із застосуванням ЛТО і попереднього підігріву, а також виконання зварних з'єднань АДЗ із застосуванням присадного матеріалу, що дозволяє знизити на 10...20 % кількість легуючих елементів в металі шва порівняно з основним металом.

2. Зниження міцності зварних з'єднань псевдо- β -сплавів пов'язано зі збільшенням кількості β -фази в металі шва та ЗТВ.

3. Встановлено, що найбільший коефіцієнт якості зварних з'єднань конструкційного псевдо- β -титанового сплаву BT19 і $(\alpha+\beta)$ -сплаву T120 забезпечує АДЗ з подачею нелегованого присадного матеріалу BT1-00св на режимах зварювання, які забезпечують вміст присадного металу в шві в кількості 10 %.

4. Найбільший коефіцієнт якості зварних з'єднань економнолегованого псевдо- β -титанового сплаву LCB-5,1 забезпечує ЕПЗ, яке передбачає застосування попереднього підігріву та ЛТО.

5. Значення показника якості та коефіцієнта міцності зварних з'єднань $(\alpha+\beta)$ -сплаву T120 поступаються відповідним показникам псевдо- β -сплавів.

Список літератури/References

- 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*, **1**, 10–19.
- (2013) *Titanium Metal: Market Outlook to 2018*. 6th Ed. Roskill Information Services Ltd, USA.
- Dobrescu, M., Dimitriu, S., Vasilescu, M. (2011) Studies on Ti–Al–Fe low-cost titanium alloys manufacturing, processing and applications. *Metalurgia Int.*, **16**(4), 73.
- Boyer, R.R., Briggs, R.D. (2005) The use of β titanium alloys in the aerospace industry. *J. Mater. Eng. and Performance*, **14**(6), 681–685.
- Cotton, J.D., Briggs, R.D., Boyer, R.R. et al. (2015) State of the art in beta titanium alloys for airframe applications. *JOM*, **67**(6), 1281–1303.
- Liu, H., Wang, Haomin, Zhang, Zhen et al. (2019) Enhancing the mechanical properties of electron beam welded TC17 titanium alloy joint by post-weld heat treatment. *J. of Alloys and Compounds*, **810**, 151–937.

7. Bolzoni, Leandro, Elisa María Ruiz-Navas, Elena Gordo (2017) Quantifying the properties of low-cost powder metalurgy titanium alloys. *Materials Sci. and Eng.: A*, **687**, 47–53.
8. Kaur, M., Singh, K. (2019) Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopedic applications. *Materials Sci. and Eng.: C*, **102**, 844–862.
9. Froes, F.H. (2015) *Titanium physical metallurgy processing and applications*. USA, ASM Int., 265–269.
10. Weiping, F., Xiao, T., Zhang, Y.P. et al. (2019) Stress corrosion crack sensitivity of ultra-thick TC4 titanium alloy electron beam welding joints. *Transact. of the China Welding Institution*, **40**, 121–8.
11. Tang, B., Kou, H., Zhang, X. et al. (2016) Study on the formation mechanism of α lamellae in a near β titanium alloy. *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, **26**, 385–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.PNSC.2016.06.009>
12. Fan, J.K., Kou, H.C., Lai, M.J. et al. (2013) Hot deformation mechanism and microstructure evolution of a new near β -titanium alloy. *Materials Sci. and Eng. A*, **584**, 121–132.
13. Moiseev, V.N., Kulikov, R.F., Kirillov, Yu.G. et al. (1979) *Welded joints of titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
14. Khorev, A.I. (2012) Titanium superalloy VT19. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **6**, 2–5 [in Russian].
15. Akhonorin, S.V., Severin, A.Yu., Belous, V.Yu. et al. (2017) Structure and properties of titanium alloy VT19, produced by the electron beam melting, after thermomechanical treatment. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 19–24 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2017.03.04>
16. Li, Y., Wang, H., Han, K. et al. (2017). Microstructure of Ti–45Al–8.5 Nb–0.2 W–0.03 Y electron beam welding joints. *J. Mater. Proc. Technol.*, **250**, 401–409.
17. Liu, P., Zhang, G.M., Zhai, T., Feng, K.Y. (2017) Effect of treatment in weld surface on fatigue and fracture behavior of titanium alloys welded joints by vacuum electron beam welding. *Vacuum*, **141**, 176–180.
18. Akhonorin, S.V., Bilous, V.Yu., Selin, R.V., Petrichenko, I.K. (2020) Heat treatment of high-strength pseudo- β -titanium alloy produced by EBM process and of its welded joints. *Suchasna Elektrometal.*, **1**, 14–25 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.02>
19. Akhonorin, S.V., Bilous, V.Yu., Selin, R.V. et al. (2021) Influence of heat treatment on the structure and properties of welded joints of high-strength titanium alloys based on β -phase. *Suchasna Elektrometal.*, **4**, 51–58 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.08>

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOYS PRODUCED BY VARIOUS WELDING METHODS

S.V. Akhonorin¹, V.Yu. Bilous¹, R.V. Selin¹, E.L. Vrzhyzhevskiy¹, S.L. Antonyuk²
¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

¹¹ Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: belousvy@gmail.com

²SC «O.K. Antonov ANTK». 1 Academic Tupolev Str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@antonov.com

Properties of welded joints of VT19 and Ti–2.8Al–5.1Mo–4.9Fe titanium pseudo- β -alloys and complex T120 titanium ($\alpha+\beta$)-alloy, produced by electron beam and argon-arc welding and after several kinds of heat treatment (annealing, regulated annealing, quenching in water, delayed cooling) were studied. In addition to reliable protection of welded joints, another advantage of the technology of electron beam welding of titanium and alloys on its base is the possibility of performing local preheating and further heat treatment in the vacuum chamber. A quality criterion was proposed in order to compare the properties of welded joints in as-welded condition and after additional heat treatment. It was determined that performance of electron beam welding using local heat treatment and preheating, as well as making the joints by argon-arc welding using filler material, which allows lowering by 10...20 % the amount of alloying elements in the weld metal, compared to base metal, ensures a high quality of welded joints of high-strength titanium pseudo- β -alloys in as-welded condition. 19 Ref., 7 Tabl., 5 Fig.

Keywords: titanium, titanium alloys, two-phase, ($\alpha+\beta$)-, sparsely-alloyed, pseudo- β -, welded joints, heat treatment, annealing, quenching, aging, microstructure, mechanical properties

Надійшла до редакції 02.10.2023



**VII INTERNATIONAL
CONFERENCE ON WELDING
AND RELATED TECHNOLOGIES**

7-10 October 2024 Kyiv, Ukraine

www.wrt2024.com.ua