УДК 621.791.72.052

О. В. ФЕДОСОВ, О. В. КАРПОВИЧ

Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Україна

ПОРІВНЯЛЬНІ МЕХАНІЧНІ ТА МЕТАЛОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З ВИСОКОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ОТРИМАНИХ МЕТОДАМИ АРГОНОДУГОВОГО ТА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ

У роботі наводяться результати механічних і металографічних досліджень структури зварних з'єднань з високоміцних титанових сплавів товщиною 20-30 мм. Показано, що при аргонодуговому і електронно-променевому зварюванні високоміцних титанових сплавів існує схильність до утворення дефектів в металі шва. Наведено результати дослідження хімічного складу металу шва та зони термічного впливу, мікро- та макроструктура зварних з'єднань і вимірювання твердості. Розроблено рекомендації, які в значній мірі виключають появу дефектів в зварних з'єднаннях та підвищують їх експлуатаційні характеристики.

Ключові слова: металографічні дослідження, електронно-променеве зварювання, високоміцні титанові сплави, макроструктура, мікротвердість, зона термічного впливу.

Вступ

Останнім часом для виготовлення великогабаритних товстостінних конструкцій нових виробів, знаходять застосування високоміцні титанові сплави ВТЗ-1, ВТ23. Напівфабрикатами для виготовлення цих вузлів служать ковані або штамповані заготовки, які піддають механічній обробці.

Технологія виготовлення суцільнолитих вузлів з великогабаритних кованоштампованих заготовок має ряд істотних недоліків техніко-економічного характеру, які посилюються зі збільшенням габаритів. Це, в першу чергу, нестабільність механічних властивостей заготовок і, отже, вузлів в різних перетинах через нерівномірне термомеханічне оброблення матеріалу, низький коефіцієнт використання металу (КВМ), висока трудомісткість механічної обробки через великі припуски.

Тому задача підвищення техніко-економічних показників при виготовленні великогабаритних титанових конструкцій вельми актуальна.

Одним із шляхів раціонального вирішення цієї задачі може бути застосування зварювання. Поділ конструкції вузлів на кілька деталей з подальшим їх зварюванням, дозволяє значно зменшити габарити і перетин заготовок, підвищити стабільність їх властивостей, зменшити припуски, знизити трудомісткість механічної обробки і підвищити КВМ.

В результаті аналізу літературних джерел [1-3] встановлено, що в процесі зварювання в титанових сплавах формується крупнозерниста структура, що є однією з причин зниження механічних властивостей металу зварних з'єднань. В роботі [4] показана можливість зварювання листового технічного титану, зміцненого азотом до 0,1 мас. % і властивості отриманих з'єднань.

У промисловості досвіду зварювання великогабаритних товстостінних конструкцій з кованоштампованих заготовок сплавів типу ВТЗ-1 недостатньо, через те, що технологія зварювання високоміцних титанових сплавів відрізняється складністю процесу і потребує дороговартісного обладнання.

У зв'язку з поширенням використання високоміцних титанових сплавів в авіа- та ракетобудуванні, автомобіле- та суднобудуванні, виникла необхідність в розробці і вирішенні ряду питань, спрямованих на придбання такого досвіду.

Мета роботи полягає в дослідженні зварюваності високоміцних титанових сплавів аргонодуговим (АДЗ) і електронно-променевим (ЕПЗ) методами зварювання, виборі найбільш раціонального з них, а також визначенні типу дефектів і розробці рекомендацій щодо запобігання їх утворення.

Методика дослідження

Електронно-променеве зварювання проводили на технологічних кільцях розміром 1600х50х20 мм. Хімічний склад наведено в таблиці 1. Для зниження концентрації β-стабілізаторів у зварному шві до 3%, у стику зварювальних кромок виконували щілинне оброблення (рис. 1).



Рис. 1. Щілинне оброблення кромок

Розміри щілинного оброблення кромок розраховувалися за формулою 1:

$$h = \frac{(B+b)\cdot\delta}{2\cdot b_{p}} \cdot K , \qquad (1)$$

де h – глибина обробки;

B, b – ширина шва з лицьового боку і з боку проплаву:

δ – зварювана товщина;

b_p – ширина обробки;

К – коефіцієнт, що визначає долю присадки в зварному шві.

Коефіцієнт, що визначає долю присадки в зварному шві розраховували за формулою:

$$K = 1 - \frac{\beta_1}{\beta}, \qquad (2)$$

де β – сумарна концентрація β- стабілізаторів в основному металі;

β₁ – сумарна концентрація β- стабілізаторів в зварному шві (3%).

Таблиця 1

Тип зразків	Вміст легуючих елементів, %	Домішки
Технологічні кільця для ЕПЗ	6,2Al; 2,3Mo; 1,6Cr; 0,32Si;0,52Fe	0,01C, 0,01N ₂ , 0,002H ₂ , 0,096O ₂
Шов ЕПЗ з при- садкою ВТ2св (розрахункове)	4,72Al; 1,38Mo; 0,96Cr; 0,19Si;0,32Fe	-
Технологічні кільця для АДЗ	6,7Al; 2,3Mo; 1,5Cr; 0,28Si;0,52Fe	0,02C, 0,01N ₂ , 0,0015H ₂ , 0,007O ₂
Шов АДЗ з при- садкою ВТ2св (розрахункове)	5,2Al; 1,5Mo; 1Cr; 0,2Si;0,34Fe	-

Хімічний склад зразків

Ширина шва задається більше ширини оброблення з таким розрахунком, щоб забезпечувалося повне оплавлення стінок оброблення при зварюванні.

Необхідною умовою при реалізації запропонованого способу зниження β- стабілізаторів в зварному шві є виконання зварювання в один прохід з повним перемішуванням основного і присадкового матеріалу. При з'єднанні великої товщини ця умова найкращим чином забезпечується ЕПЗ при якій можна з досить високою точністю задавати геометричні розміри шва.

Для порівняння зварювали стики без оброблення кромок (рис. 2 в).



Рис. 2. Конструкція стика під зварювання: а – ЕПЗ з присадкою, б – АДЗ з присадкою, в – ЕПЗ без присадки, г) АДЗ з присадкою

Зварювання проводили на установці УЛ110 гарматою У530М горизонтальним променем при горизонтальному розташуванні стику. Технологічні кільця жорстко закріплювалися на пристрої, осьове і торцеве биття стику забезпечувалося не менше 0,2 мм. Перед складанням зварювані кромки обробили бензином і спиртом. Прихватку кілець проводили через кожні 250-300 мм (довжина прихвату 50-70 мм).

ЕПЗ зразків товщиною 20 мм проводилась на двох режимах зварювання:

- з нормальним фокусуванням променя (фокус на поверхні деталей, що зварюються);

 з перефокусуванням променя (фокус над поверхнею зварюваних деталей).

Обрані режими зварювання забезпечують задовільне формування швів.

Режим з перефокусуванням променя застосували при зварюванні по щілинному обробленні з присадковим дротом.

АДЗ виконували за двома варіантами: зануреною проникаючою дугою на плоских зразках

300х120х20 мм, вирізаних з поковок, хімічний склад яких наведено в таблиці 1, в два проходи, другий прохід виконувався в «косметичних» цілях і звичайним АДЗ в 4 проходи з подачею присадки. Для зварювання зануреною дугою, в стику виконували спеціальне оброблення кромок (рис. 2 б, г).

В якості присадки використовували для ЕПЗ по щілинному обробленні дріт ВТ2св, для АДЗ – ВТ20-3. Після зварювання проводили рентгеноконтроль.

Термообробку зварних зразків проводили згідно рекомендацій для даного матеріалу [5, 6].

Механічні випробування

Зварні зразки піддавались механічним випробуванням на розтяг і ударну в'язкість (табл. 2, рис. 3).

Таблиця 2

Механічні властивості зварних з'єднань з сплаву ВТЗ-1 після ТО [6]

Вид зварювання	Межа міцно- сті о _в , МПа	Ударна в'язкість КСU, Дж/см ²	
АДЗ з присадкою ВТ20-3св 4 проходи	1000- 1040	47-52	
АДЗ проникаючою дугою з присадкою ВТ2св 2 проходи	1080- 1110	25-57	
ЕПЗ с присадкою ВТ2св	1090- 1110	33-37	
ЕПЗ без присадки	1170- 1250	15-27	



Рис. 3. Характер руйнування зварних зразків: а, б – ЕПЗ (а – після відпалу, б – після термозміцнення); в, г – АДЗ (в – після відпалу, г – після термозміцнення)

Аналіз результатів показує, що безпосередньо після зварювання (ЕПЗ) межа міцності зварних з'єднань перебуває на рівні основного матеріалу (1090-1100 МПа), ударна в'язкість зварних швів і зони термічного впливу (ЗТВ) при цьому значно знижуються, приблизно на 50% від в'язкості основного матеріалу (44-54 Дж/см²).

Відпал зварних з'єднань при температурі 850 °С протягом 0,5-1,5 години, незалежно від способу зварювання, підвищує ударну в'язкість зварних швів і ЗТВ до рівня основного металу, межа міцності при цьому практично не змінюється (зварні з'єднання руйнуються по основному металу).

Відпал при температурі 900 °С протягом 1,5 години з подальшим старінням при температурі 650 °С протягом 3 годин, підвищує межу міцності основного металу в середньому до 1059 МПа, міцність зварних швів при цьому вище 0,9 від міцності основного матеріалу, а показники ударної в'язкості не нижче 25 Дж/см², гартування (T = 850 °C, 1 година), з подальшим старінням (T = 650 °C, 0,5 год.) підвищує межу міцності зварних з'єднань ЕПЗ і АДЗ в середньому до 1100-1200 МПа.

Ударна в'язкість ЗТВ на зразках, виконаних АДЗ і ЕПЗ (без присадки), після термічного зміцнення практично однакова в середньому становить 21 Дж/см². Однак різниця полягає в тому, що на зразках, виконаних АДЗ, руйнування відбувається безпосередньо по ЗТВ, ширина якої 6 мм. Після ЕПЗ руйнування безпосередньо по ЗТВ не спостерігається, можливо, через малі її розміри (до 1 мм). Лінія зламу при цьому зміщується в бік шва, що підтверджується однаковими показниками в'язкості шва і ЗТВ. На зразках, виконаних ЕПЗ з присадкою, показники в'язкості ЗТВ значно вище в середньому 34 Дж/см² і знаходяться на рівні в'язкості шва і основного матеріалу.

Це, ймовірно, також пов'язане з малими розмірами ЗТВ і зміщенням лінії зламу в сторону шва, або в сторону основного металу.

Металографічні дослідження

Дослідження мікроструктури зварних з'єднань проводились на шліфах, які протравлено в реактиві наступного складу: 10 обсягів НГ (40%), 90 обсягів НО₂.

Для зварних швів, виконаних АДЗ, характерна крупнозерниста будова з стовпчастими зернами, витягнутими від лінії сплавляння вгору і до центру шва. Зона термічного впливу в зварних швах, виконаних АДЗ з присадкою, найбільша, до 6 мм, при АДЗ – 3-4 мм. У зоні термічного впливу спостерігається укрупнення зерна, величина якого залежить, швидше за все, від вихідної структури (рис 3 б, г). Мікротвердість зварних з'єднань вимірювалась на приладі ПМТ-3 при навантаженні 50 г. Результати вимірів наведено в таблиці 3.

Аналіз результатів показує, що мікротвердість зварних швів, основного металу і ЗТВ, незалежно від способу зварювання і режиму термообробки, за винятком ЗТВ на зразках, виконаних АДЗ, коливається приблизно в однакових межах, (3040-4120 МПа) що на перший погляд, пояснюється неоднорідністю структури. Мікротвердість ЗТВ на зразках, виконаних ЕПЗ, значно вище (4120-4920 МПа), що пов'язано, вочевидь, з високими швидкостями охолодження. Мікроструктура зварних з'єднань досліджувалася на мікроскопі МІМ-8 при збільшенні х500.

Таблиця 3

Мікротвердість зварних з'єднань МПа [6]						
Режим зміц- нення	Вид сварки	шов	3TB	ОМ		
Відпал	ЕПЗ	3520- 3800	3650- 4120	3650- 4120		
	ЕПЗ з при- садкою	3380- 3650	3650- 3800	3380- 3800		
	АДЗ з при- садкою	3260- 4120	3380- 4120	3150- 4120		
Гарту- вання	ЕПЗ	3520- 3960	4120- 4920	3520- 3800		
	ЕПЗ з при- садкою	3650- 3800	4310- 4920	3800- 3960		
	АДЗ з при- садкою	3040- 3960	3520- 4120	3380- 3960		
	АДЗ	3380- 3800	3260- 3800	3380- 3800		

Зварні шви, виконані ЕПЗ, незалежно від варіанту, після зварювання мають крупнозернисту структуру з лікваційною неоднорідністю, що виявляється в нерівномірній протравленості шва. Усередині зерен спостерігається рельєф α '- фази мартенситного типу з окремими виділеннями α - фази на межі зерен. Аналогічну структуру мають зварні шви після термозміцнення (рис. 4).

Для ЗТВ характерна крупнозерниста структура мілкогольчатої будови. Мартенситний рельєф всередині окремих зерен виражений менш чітко, ніж в направленому металі, і зникає при наближенні до основного металу. В цілому структура металу швів залежить від режиму термообробки, за своєю будовою дуже близька і відрізняється, в основному, формою і орієнтацією голок. Мікроструктура металу зварних швів, виконаних АДЗ з присадкою, після відпалу має мілкопластичну будову. Після термозміцнення структура металу зварного шва нагадує структуру основного матеріалу (рис. 5). Зварні шви, виконані АДЗ з присадкою ВТ20-3, мають мілкогольчату структуру з окремими глобулярними виділеннями (рис. 5 в).

ЗТВ має крупнозернисту будову з виділенням всередині зерен голок або пластинок, форма, розміри і орієнтація яких змінюється в залежності від режиму термообробки. На рисунку 5 показана, для порівняння, структура металу зварного з'єднання, яка виконана багатошаровим зварюванням з присадкою ВТ2св.



Рис. 4. Мікроструктура зварних з'єднань з титанового сплаву ВТЗ-1 (х500): І – без ТО; ІІ – відпал і старіння; ІІІ – гартування і старіння; а – шов без присадки; б – шов с присадкою ВТ2св; в – ЗТВ; г – основний метал





При зварюванні з нормальним фокусуванням променя із зворотного боку шва формується рівний проплав висотою 3 мм, з лицьового боку шов має незначне заниження, проте в межах допуску. При невдало підібраному співвідношенні струму і швидкості зварювання, спостерігається нерівномірне формування проплавлення у вигляді «пробки». Цей режим має істотний недолік, що полягає в тому, що в результаті звуження зварного шва (шов має клиноподібну форму) в його нижній частині (корені) можуть утворюватися непровари, приховані від візуального виявлення виступаючим проплавом, також приховані від виявлення рентген контролем через злипання країв (рис. 6 а, б.).



Рис. 6. Макрошліфи зварних з'єднань: а – ЕПЗ з перефокусуванням променя; б – ЕПЗ з нормальним фокусуванням променя; в, г – АДЗ з присадкою ВТ2св

Причиною цих непроварів є зміщення променя зі стику в процесі зварювання, або неточна його настройка перед зварюванням.

При зварюванні на режимі з перефокусуванням, проплав формується врівень з основним металом, місцями спостерігається нерівні підрізи глибиною до 0,5 мм. Причиною підрізів є, швидше за все, досить висока концентрація потужності променя на виході з металу, що викликає інтенсивне його розбризкування. З лицьового боку шва спостерігається незначне заниження та місцеві підрізи, які легко усуваються додатковим проходом. Цей режим є найкращим, особливо при зварюванні по щілинному обробленні кромок з присадкою, оскільки шов має прямокутну форму (ширина шва з лицьового боку і ширина проплаву практично однакові), що забезпечує оплавлення стінок щілини по всій глибині, і в більшій мірі гарантує виключення непроварів в корені шва.

Істотною перевагою при зварюванні з перефокусованим променем є те, що зміна струму зварювання в значних межах не порушує стабільність формування шва.

Особливістю АДЗ є однопрохідне проплавлення товщиною 20 мм з одночасною подачею присадкового дроту. Цьому сприяє спеціальна щілинна форма оброблення кромок.

Додатково виконані у верхній частині щілини фаски (див. рис. 2 б), дозволяють заглибити електрод на зварювану товщину, що спільно зі щілиною створює умови для концентрованого введення тепла (плавлення) за рахунок обтиску зварювальної дуги стінками щілини. Виконана із зворотного боку стику вузька щілина полегшує проплавлення.

В результаті утворюється вузький зварний шов з рівномірним проплавом. Ширина проплаву може коливатися в залежності від параметрів режиму зварювання (рис. 6 в, г). Подача присадкового дроту по цілині забезпечує заповнення оброблення при зварюванні в один прохід. При цьому відбувається перемішування основного і присадкового матеріалу і вирівнювання хімічного складу шва по перетині.

Макроструктура зварних швів, виконаних ЕПЗ, характеризується витягнутими в напрямку до центру шва зернами, величина яких різна в залежності від варіанту зварювання (без присадки або з присадкою). Зона термічного впливу в середньому становить 1 + 1,5 мм. Під час проведення макродосліджень, в зварному шві виявлено ряд дефектів: ланцюжок дрібних пор в межах допуску, непровар в корені шва величиною до 2 мм, підріз з лицьового боку шва і з боку проплаву.

Аналіз виявлених дефектів показує, що ланцюжок дрібних пор, виявлених в одному з шліфів, носить випадковий характер. Причиною їх появи може бути забруднення стику в процесі підготовки зразків під зварювання.

Непровар в корені шва, що утворився, є наслідком зміщення електронного променя зі стику. Для попередження таких непроварів необхідна ретельна настройка променя на стик. Виявлені підрізи з боку проплаву характерні для режиму зварювання з перефокусованим пучком. На реальних конструкціях, де є припуск, підрізи усуваються наступною механічною обробкою.

Аналіз отриманих механічних властивостей і структури зварних з'єднань показує, що простежити будь-які залежності, пов'язані зі зміною властивостей зварних швів і їх структури, не представляється можливим. Так, наприклад, різна структура швів, виконаних ЕПЗ з присадкою (рис. 4 в) і АДЗ (рис. 4 б), забезпечує практично однакові механічні властивості ($\sigma_{\rm B} = 1090$ МПа, КСU = 33-37 Дж/см²). У той же час, близька за будовою структура зварних швів (характерна для ЕПЗ), термооброблених по різним режимам, має істотну відмінність механічних властивостей.

Можливо ефект зміни властивостей пов'язаний, головним чином, зі зміною фазового складу металу, що залежить від ступеня легування і дисперсності фазових частинок.

Висновки

В результаті проведених досліджень дугового і електронно-променевого зварювання високоміцного титанового сплаву ВТ3-1 щодо великогабаритних конструкцій, встановлено наступне:

1. ЕПЗ і АДЗ сплаву ВТЗ-1 з легуванням зварних швів після термообробки забезпечує межу міцності зварних швів в середньому 1100 МПа. Показники ударної в'язкості при цьому відповідають в'язкості основного металу.

 Багатошарове аргонодугове зварювання сплаву ВТ3-1 з присадкою, після термозміцнення забезпечує межу міцності зварних швів на рівні 0,85 від міцності основного металу, при показнику ударної в'язкості вище показників основного металу.

3. Ударна в'язкість ЗТВ на зразках, виконаних без присадки, після термозміцнення майже однакова як при ЕПЗ, так і при АДЗ (в середньому 21 Дж/см²). Однак різниця полягає в тому, що на зразках після АДЗ руйнування відбувається безпосередньо по ЗТВ (ширина ЗТВ = 6 мм), а після ЕПЗ руйнування по ЗТВ не спостерігається можливо через її малі розміри (3TB = 1 мм). Лінія зламу при цьому зміщується в бік шва, що підтверджується однаковими показниками в'язкості шва і 3TB. На зразках, виконаних ЕПЗ з присадкою, показники в'язкості 3TB значно вище (в середньому 34 Дж/см²) і знаходяться на рівні в'язкості шва і основного металу. При цьому руйнування безпосередньо по 3TB також не спостерігається. З огляду також на той факт, що при випробуванні зварних зразків на розрив, руйнування відбувається, як правило, або по шву, або по основному металу у віддаленні від 3TB, можна припустити, що 3TB через малі розміри істотно не впливає на експлуатаційні характеристики зварних з'єднань.

В результаті проведених досліджень, можна зробити висновок, що ЕПЗ більш перспективне в порівнянні з АДЗ для з'єднання товстостінних конструкцій відповідального призначення виробів ракетно-космічних літальних апаратів.

Література

1. Heat Transfer and Fluid Flow during Electron Beam Welding of 304L Stainless Steel Alloy [Text] / B. Y. R. Ray [et al] // Welding Journal. Mach. - 2009. – Vol. 88. – pp. 54-61.

2. Tao, J. Effect of trace solute hydrogen on the fatigue life of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy joints [Text] / J. Tao, S. Hu, L. Ji // Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 684. – pp. 542-551. doi: 10.1016/j.msea.2016.12.102.

3. Wei, P. S. Prediction of pore size in high power density beam welding [Text] / P. S. Wei, T. C. Chao // International Journal of Heat and Mass Transfer. -2014. – Vol. 79. – pp. 223-232.

4. Электронно-лучевая сварка листового технического титана ВТІ-0, упрочненного азотом в процессе дугошлакового переплава, и свойства полученных соединений [Текст] / В. Я. Саенко, А. А. Полишко, В. А. Рябинин, С. Н. Степанюк // Автоматическая сварка. – 2014. – № 11. – С. 50-53.

5. Карпович, Е. В. Способы получения крупногабаритных осесимметричных изделий из высокопрочных титановых сплавов [Текст] / Е. В. Карпович, В. Г. Бессалый // Системное проектирование и анализ характеристик аэрокосмической техники. – 2010. – Т. 10. – С. 30-40.

6. Федосов, О. В. Застосування електронного променя для відпалу зварних з'єднань титанового сплаву ВТ23 [Текст] / О. В. Федосов, О. В. Карпович, В. О. Перерва // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2015. – № 6 (123). – С. 52-58.

References

1. Ray, B. Y. R. at all. Heat Transfer and Fluid Flow during Electron Beam Welding of 304L Stainless Steel Alloy. *Welding Journal*, 2009, vol. 88, pp. 54-61. 2. Tao, J., Hu, S., Ji, L. Effect of trace solute hydrogen on the fatigue life of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy joints. *Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 684, pp. 542-551. doi: 10.1016/j.msea.2016.12.102.

3. Wei, P. S., Chao, T. C. Prediction of pore size in high power density beam welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 79, pp. 223-232.

4. Sayenko, V. Ya., Polishko, A. A., Ryabinin, V. A., Stepanyuk, S. N. Elektronno-luchevaya svarka listovogo tekhnicheskogo titana VT1-0, uprochnen-nogo azotom v protsesse dugoshlakovogo pereplava, i svoystva poluchennykh soyedineniy [Electron beam welding of sheet technical titanium VT1-0 hardened with nitrogen in the process of arc-choking remelting,

and the properties of the obtained compounds]. Avtomaticheskaya svarka, 2014, no. 2, pp. 50-53.

5. Karpovich, E. V., Bessalyy V. G. Sposoby polucheniya krupnonogabaritnykh osesimmetrichnykh izdeliy iz vysokoprochnykh titanovykh splavov [Methods for obtaining large-sized axisymmetric products from high-strength titanium alloys]. *Sistemnyye proyekty i analiz kharakteristik aerokosmichnoii tekhniki*, 2010, vol. 10, pp. 30-40.

6. Fedosov, O. V., Karpovich, O. V., Pererva, V. O. Zastosuvannya elektronnogo promenya dlya vidpalu zvarnykh z'ednan' titanovogo splavu VT23 [The use of electron beam welds annealing of titanium alloy VT23]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 6 (123), pp. 52-58.

Надійшла до редколегії 12.05.17, розглянута на редколегії 8.06.2017

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АРГОНОДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

А. В. Федосов, Е. В. Карпович

В работе приводятся результаты механических и металлографических исследований структуры сварных соединений из высокопрочных титановых сплавов толщиной 20-30 мм. Показано, что при аргонодуговой и электронно-лучевой сварке высокопрочных титановых сплавов существует склонность к образованию дефектов в металле шва. Приведены результаты исследований химического состава металла шва и зоны термического влияния, микро- и макроструктура сварных соединений и измерение твердости. Разработаны рекомендации, которые в значительной степени исключают появление дефектов в сварных соединениях и повышают их эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: металлографические исследования, электронно-лучевая сварка, высокопрочные титановые сплавы, макроструктура, микротвёрдость, зона термического влияния.

COMPARATIVE MECHANICAL AND METALLOGRAPHIC INVESTIGATIONS OF WELDED COMPOUNDS WITH HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOYS OBTAINED BY METHOD OF TIG AND EBW

A. V. Fedosov, E. V. Karpovich

The paper presents the results of mechanical and metallographic studies of the welded joints structure of the high-strength titanium alloys 20-30 mm width. In the paper is shown that with TIG and EBW welding of high-strength titanium alloys, there is a tendency to form defects in the weld metal. The results of metal chemical composition are shown in the paper as well thermal influence, micro- and macrostructure of welded joints and the measurement of hardness are presented. Recommendations are developed, which in a great degree exclude the appearance of defects in welded joints and increase their performance characteristics.

Key words: metallographic studies of electron-beam welding, high-strength titanium alloys, macrostructure, micro hardness, heat-affected zone.

Федосов Олексій Вікторович – викладач каф. технології виробництва, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, Україна, e-mail: fedosov.fav@gmail.com.

Карпович Олена Володимирівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, Україна, e-mail: kelv@ua.fm.

Fedosov Oleksii Viktorovych – Lecturer at the Dept. of Production technology, Dnipro National University named after O. Honchar, Dnipro, Ukraine, e-mail: fedosov.fav@gmail.com.

Karpovich Olena Volodymyrivna – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Production technology, Dnipro National University named after O. Honchar, Dnipro, Ukraine, e-mail: kelv@ua.fm.