

УДК 621.791.72.052

О. В. ФЕДОСОВ, О. В. КАРПОВИЧ, В. О. ПЕРЕРВА

*Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Україна***ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПРОМЕНЯ ДЛЯ ВІДПАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT23**

У роботі розглядається спосіб термічної обробки зварних з'єднань великогабаритних виробів з високоміцного титанового сплаву VT23, які найбільш широко використовуються у конструкціях ракетно-космічної та авіаційної техніки. Показано, що відпал такого типу зварних конструкцій доцільно проводити електронним променем у камері установки електронно-променевого зварювання. Визначено вплив відпалу електронним променем на величину ударної в'язкості всіх зон зварного з'єднання і комплекс термічної обробки зварних великогабаритних виробів з високоміцного титанового сплаву VT23.

**Ключові слова:** зона термічного впливу, високоміцні титанові сплави, електронно-променево зварювання, механічні властивості, термічний цикл зварювання, термічна обробка, електронний промінь.

**1. Сучасний стан питання та аналіз останніх досліджень і публікацій**

Електронно-променево зварювання знаходить все більш широке застосування при виготовленні конструкцій із високоміцних титанових сплавів. Найбільш перспективними є високолеговані термічно-зміцнювані титанові сплави, які дозволяють реалізувати найкраще поєднання фізико-механічних і конструктивних властивостей виробів, що виготовляються електронно-променево зварюванням (ЕПЗ). Однак зварювання таких сплавів істотно ускладнене в зв'язку з високою хімічною активністю титану за умов підвищених температур та особливостями структурних змін і фазових перетворень в шві і в зоні термічного впливу (ЗТВ) при зварювальному термічному циклі, що призводить до утворення крихких фаз і різного роду дефектів у з'єднанні [1, 2].

Для отримання бездефектних зварних швів та високих показників міцності із збереженням задовільної ударної в'язкості необхідно постійно вдосконалювати технологічні процеси виготовлення зварних конструкцій з термічно-зміцнюваних титанових сплавів. Особливо це є важливим під час виготовлення великогабаритних товстостінних вісесиметричних елементів конструкції ракетно-космічної та авіаційної техніки зі сплавів VT3-1, VT22, VT23, які мають високі фізико-механічні властивості у деформованому стані, але і високий вміст  $\beta$  – стабілізаторів у кількості більше ніж 3% (табл. 1), що призводить до виникнення шкідливих гартувальних явищ в металі зварного шва, з вірогідним утворенням крихких фаз та інтерметалідів під час старіння. Крім цього, для підвищення пластичності зварних

з'єднань зі сплаву VT3-1 рекомендується також в металі шва обмежити вміст кремнію до 0,15% [3, 4].

Великі швидкості охолодження при ЕПЗ і підвищена чутливість сплавів VT23, VT3-1 до термічної обробки, обумовлюють в ряді випадків низьку пластичність з'єднань в стані після зварювання. Удосконалення ЕПЗ і оптимізація режимів термічної обробки зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів має науковий і практичний інтереси.

Таблиця 1  
Хімічний склад і механічні властивості високоміцних титанових сплавів

Марка сплаву	Вміст легуючих елементів, %	Межа тимчасової міцності $\sigma_b$ , МПа	Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>
VT3-1	6Al; 2,5Mo; 2Cr; 0,3Si; 0,5Fe	$\geq 1200$	300-600
VT22	5Al; 5Mo; 5V; 1Fe; 1Cr	1400-1550	500
VT23	4,5Al; 2Mo; 4,5V; 0,6Fe; 1Cr	$\geq 1400$	450-550

З точки зору детального дослідження кінетики перетворень і тонкої оцінки їх впливу на зміни структури, властивостей і технологічної міцності металів при зварюванні, особливий інтерес представляють методи, що дозволяють диференційовано вивчати процеси в окремих ділянках зварних з'єднань з урахуванням основних фізичних і хімічних впливів, що викликаються сусідніми ділянками в з'єднанні. Найглибше ці методи розроблено для дослідження процесів в зоні термічного впливу, тобто в основному

металі в твердому або твердо-рідкому стані. Великий внесок у вивчення структури і властивостей зварних з'єднань титанових сплавів внесли: Б. А. Колачов, Н. Н. Рикалін, А. А. Углов, Б. Б. Чечулін, М. Х. Шоршоров, В. М. Ямпольський та ін. Дослідженнями в області концентрації напружень і пластичних деформацій сплавів займалися: Г. А. Ніколаєв, А. П. Гуляєв, А. В. Гур'єв та ін.

На основі узагальнень технологічних матеріалів [1-3] по ЕПЗ деталей і вузлів з титанових сплавів виявлено, що важливу роль у забезпеченні пластичності і в'язкості зварних з'єднань титанових сплавів, мають термічні цикли зварювання, в яких враховується інтервал оптимальних швидкостей охолодження шва і біляшовної зони та тривалість перебування основного металу вище температури рекристалізації. Задовільні властивості ЗТВ отримуються за умов, що швидкості охолодження повинні бути відносно великими, більш ніж  $60^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , або дуже малими, меншими за  $0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Щоб забезпечити такі швидкості охолодження у біляшовній зоні під час ЕПЗ заготовок з товщиною 30...50 мм необхідно зварювання виконувати на швидкостях більш ніж 20 м/год [3].

Проведений аналіз факторів, що впливають на процес отримання надійних зварних конструкцій з високоміцних титанових сплавів ВТ3-1, ВТ23, які описані в роботах [4, 5], показав, що для отримання оптимальних фізико-механічних властивостей у зварному з'єднанні необхідно вирішити такі завдання:

- змінення хімічного складу зварного шва для зменшення в ньому кількості  $\beta$ -стабілізаторів;
- управління властивостями ЗТВ під час ЕПЗ;
- зменшення залишкових зварних напружень.

Очевидно, що з практичної точки зору, доцільно продовження робіт щодо вдосконалення методів отримання зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів, що задовольняють вимоги до зварних конструкцій літальних апаратів.

Метою даної роботи є визначення способу підвищення властивостей ЗТВ під час електронно-променевого зварювання.

## 2. Постановка задачі. Теоретичні та експериментальні дослідження

Проведена велика кількість досліджень процесів ЕПЗ титанових сплавів, які описані набором і обробкою експериментальних даних [1-8]. За результатами цих робіт можна зробити загальні висновки щодо вирішення поставлених завдань:

1. Зниження концентрації  $\beta$ -стабілізаторів у зварному з'єднанні виконується за рахунок видалення з області зварного шва визначеної частини основного матеріалу й заміною його присадковим

матеріалом, який не містить  $\beta$ -стабілізуючих елементів. Це завдання вирішили шляхом виконання у стику щільної розділки, співмірної з розмірами зварного шва. Такий метод ЕПЗ з присадкою використовується для з'єднання високоміцних титанових сплавів ВТ3-1, ВТ23 [1-4].

2. Механічні характеристики зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів мають нижчі значення, ніж сплави, оброблені термічною обробкою (ТО) після кування. Це пов'язано з різним характером дифузійних процесів, фазових і структурних перетворень, що відбуваються при термозміцненні в литому металі зварного шва і термомеханічно обробленому основному металі. У зварних з'єднаннях також утворюються дефекти у вигляді пор, непроварів і ліквациї легуючих елементів, розмір і кількість яких визначається хімічним складом сплаву і технологією зварювання. Для запобігання утворення дефектів у зварному шві необхідно забезпечити і підтримувати під час ЕПЗ оптимальні параметри процесу, що дозволить забезпечити постійність форми і розмірів зварювальної ванни і повне проплавлення зварюваних кромок. Деякі дефекти, розташовані ближче до зовнішньої поверхні зварювальних деталей, можуть видалятися згодом механічною обробкою і не впливати на якість зварної конструкції.

3. Багатопрхідність зварного шва під час ЕПЗ забезпечує більш рівномірний розподіл легуючих елементів; зменшення кількості і розміру пір; зниження вмісту домішок і більш легкоплавких металів за рахунок їх випаровування в процесі зварювання; зниження залишкових напружень у ЗТВ. Також це дозволяє регулювати тепловкладення з перспективою отримання необхідної структури і властивостей ЗТВ. Експериментальні дослідження показали можливість отримання з необхідними механічними властивостями зварних з'єднань із титанового сплаву, який зварюється без присадкових матеріалів, але з двократним переплавом зварного шва на основному режимі зварювання.

4. Залежно від умов експлуатації зварні з'єднання високоміцних титанових сплавів необхідно піддавати відпалу або зміцнюючій ТО – гартуванню і старінню, що покращує механічні властивості основного металу, зварного шва, ЗТВ і знижує залишкові напруження в конструкції.

Згідно висновків, структура і хімічний склад зварного з'єднання може контролюватись ретельним виконанням всіх етапів технологічного процесу виробництва вісесиметричних великогабаритних і товстостінних вузлів нових виробів, що виготовляються з високоміцних титанових сплавів ВТ3-1, ВТ23. Але залежність структури зварного з'єднання від кількості проходів і режимів ЕПЗ під час цих проходів потребують додаткових теоретичних і екс-

периментальних досліджень, що дозволять визначити оптимальні параметри ЕПЗ для кожного проходу переплаву металу шва з очікуваним тепловкладенням у ЗТВ і можливістю отримання потрібної структури і механічних властивостей ЗТВ.

Можливість підвищення ударної в'язкості в ЗТВ була виявлена під час дослідження впливу швидкостей охолодження в діапазоні 10...600°C/с на ударну в'язкість ЗТВ [11].

Було встановлено, що змінення швидкостей охолодження під час гартування практично не впливає на значення ударної в'язкості, але підвищення температури гартування до температур поліморфного перетворення збільшує ударну в'язкість ЗТВ і підтверджує необхідність високотемпературного відпалу ЗТВ. Збільшення значень ударної в'язкості під час гартування пояснюється тим, що за умов високих температур параметр решітки  $\beta$ -фази значно збільшується, що свідчить про збіднення  $\beta$ -фази від легованих елементів і, відповідно, призводить до зменшення міцності і підвищення в'язкості.

Найбільш зручним способом відпалу ЗТВ товстостінних зварних з'єднань, і як наслідок зменшення залишкових напружень, може бути термообробка електронним променем за рахунок тепла, яке утворюється під час повторного переплаву зварного шва. Однак експерименти показали, що трикратний переплав зварного шва на режимі першого зварювального проходу дозволяє отримати тільки незначне підвищення середніх значень ударної в'язкості, можливо, за рахунок рафінування металу в шві та зменшення твердості в шві і ЗТВ після термозміцнення. Отримані результати доводять неможливість використання основного зварювального режиму для відпалу ЗТВ через велике тепловкладення, яке приводить до багаторазового високотемпературного впливу на зварне з'єднання практично без змінення значень механічних характеристик ЗТВ.

Покращення властивостей ЗТВ можливе, якщо відпал виконувати електронним променем, який під час повторного проходу забезпечить більш вузький зварний шов, ніж отриманий після основного зварювального режиму (рис. 1).

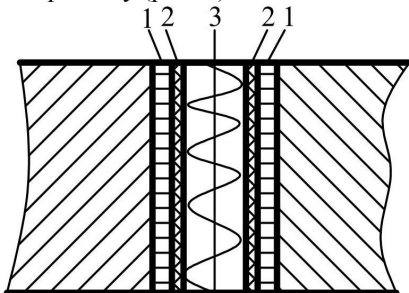


Рис. 1. Схема відпалу ЗТВ зварних товстостінних титанових конструкцій електронним променем:  
1 – ЗТВ; 2 – основний шов; 3 – шов відпалу

Відпалювальний прохід повинен виконуватись на таких режимах ЕПЗ, які дозволять сформувати температурне поле із забезпеченням умов високотемпературного відпалу у лінії сплавлення зварного шва з основним металом. Розрахунок температурних полів і параметрів теплового джерела основного і відпалювального проходу ЕПЗ титанових сплавів виконувався за методикою, наведеною у [9, 10], згідно якої визначалось температурне поле граничного стану для рухомого лінійного джерела тепла, що прийнятно для умов глибокого проплавлення матеріалу:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda\delta} \exp\left(\frac{-vx}{2a}\right) K_0\left(\frac{vr}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}\right), \quad (1)$$

де  $\Delta T = (T_n - T_p)$ ;

$T_n$  – температура нагріву;

$T_p$  – початкова температура, К;

$q$  – ефективна тепла потужність, Вт;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К);

$\delta$  – товщина зварюваних деталей, м;

$v$  – швидкість зварювання, м/с;

$x$  – координата точки за віссю, у напрямку якої рухається джерело тепла, м;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

$K_0$  – функція Бесселя другого роду нульового порядку;

$r$  – радіус-вектор положення точки, визначається за формулою:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (2)$$

де  $y$  – координата точки за віссю перпендикулярною до напрямку руху джерела тепла, м;

$b$  – коефіцієнт температуровіддачі, 1/с. Визначається за формулою:

$$b = \frac{2\alpha}{c\rho\delta}, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$c$  – питома теплопровідність, Дж/(кг·К);

$\rho$  – щільність матеріалу кг/м<sup>3</sup>.

Під час зварювання електронним променем деталей у вакуумі конвективний обмін теплом відсутній і коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  приймається рівним нулю. Визначення розподілу температури у ЗТВ виконувалось у поперечному перерізі з'єднання з координатою  $x=0$ . Тоді рівняння (1) буде мати вигляд:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda\delta} K_0\left(\frac{v \cdot y}{2a}\right), \quad (4)$$

Діапазон по координаті у розраховується з ширини ЗТВ:

$$y = \frac{2l}{2} = \frac{q\sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}}}{2vc\rho\delta\Delta T_1}, \quad (5)$$

де  $\Delta T_1 = (T_{пл} - T_n)$ ;

$T_{пл}$  – температура плавлення матеріалу, К.

Для чисельного аналізу приймалися теплофізичні характеристики чистого титану за нормальних умов без врахування їх температурної залежності. Товщина зварюваних деталей –  $40 \cdot 10^{-2}$  м. Режими ЕПЗ: прискорююча напруга  $U=27$  кВ; струм зварювання  $I=410$  мА; швидкість зварювання  $v=3 \cdot 10^{-3}$  м/с.

За результатами розрахунків визначено, що ЗТВ поширюється до 3 мм, а лінія сплавлення (ЛС) зварного шва з основним металом знаходиться на відстані 0,4 мм від осі шва. Згідно даним рис. 2, під час високотемпературного відпалу ЗТВ на лінії сплавлення від основного проходу температура повинна складати 1173 К і потужність джерела тепла для відпалу  $q_B$  можна визначити за формулою

$$q_B = \frac{\Delta T_B \cdot 4\pi\lambda\delta}{K_0 \left( \frac{v \cdot y_B}{2a} \right)}, \quad (6)$$

де  $\Delta T_B = (T_{пл} - T_B)$ ;

$T_B$  – температура у точці відпалу, К;

$y_B$  – координата точки відпалу, м.

Зона проплавлення під час відпалюючого проходу буде складати біля 0,1 мм (рис. 2). За величиною  $q_B$  визначено параметри ЕПЗ для відпалу з'єднання за умови незмінності швидкості зварювання і прискорюючої напруги:  $U=27$  кВ;  $I=228$  мА; швидкість зварювання  $v=3 \cdot 10^{-3}$  м/с.

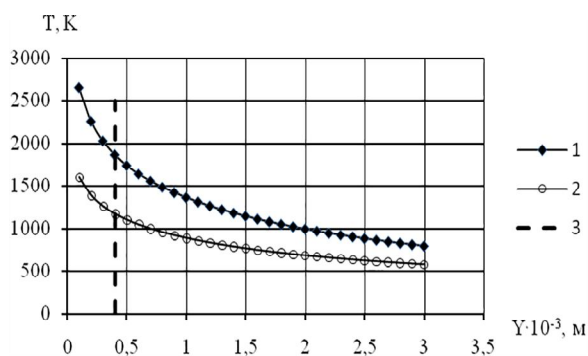


Рис. 2. Розрахунковий розподіл температури в ЗТВ з'єднань з титанових сплавів: 1 – основний режим ЕПЗ; 2 – відпалювальний прохід електронним променем; 3 – лінія сплавлення основного проходу

Експериментальна перевірка розрахункових результатів проводилась на зразках зі сплаву ВТ23 за методикою ІМЕТ-І [12] за умови, що ЗТВ являє собою ділянку зварного з'єднання з монотонним зменшенням температури від зварного шва до основного металу і кожний переріз ЗТВ можна розглядати, як матеріал після впливу різних температур гартування і відпалу. Зразки розміром  $100 \times 10 \times 3$  нагрівались до температур 1573, 1273, 1173, 1073, 973 К,

імітуючи термічну дію в ЗТВ від ЕПЗ, а потім частина цих зразків нагрівалась повторно до температур 1173, 1073, 973, 873, 773 К, як для відпалу електронним променем (ЕП). Далі частину зразків піддавали термозміцненню на режимі, оптимальному для основного металу сплаву ВТ23.

За результатами отриманих значень ударної в'язкості різних станів ЗТВ (рис. 3) було встановлено, що після ЕПЗ біля лінії сплавлення шва з основним металом ударна в'язкість найнижча. В більш віддалених зонах від ЛС, які нагрівались до менших температур, середня величина ударної в'язкості відповідає значенням для основного термозміцненого матеріалу.

В зоні, яка нагрівалась до нижньої границі температури поліморфного перетворення (973 К), ударна в'язкість значно вище, що пояснюється зміненням мартенситних складових структури в ЗТВ у напрямку від шва до основного металу. Термічне зміцнення зразків, які піддавалися високо температурному нагріву, практично не змінює значення в'язкості, яке було отримано після ЕПЗ.

Відпал збільшує ударну в'язкість у перерізі ЗТВ з високотемпературним нагрівом (від 1173 К до 1573 К, перерізи від 0,7 мм до 1,45 мм) і не змінює у зонах з нагрівом до менших температур. Подальше термозміцнення на режимах, оптимальних для основного матеріалу (гартування з 1048 К, охолодження на повітрі; старіння 798 К, 10 год.) знижує ударну в'язкість у зонах з температурою 1273, 1173, 973 К (1,2; 1,45; 2,1 мм) і практично не змінює її у зонах з температурами 1573, 1073 К (0,7; 1,7 мм).

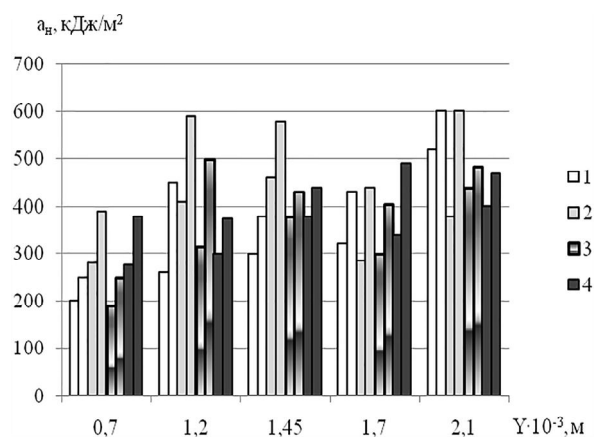


Рис. 3. Мінімальна і максимальна ударна в'язкість у перерізах ЗТВ з'єднання зі сплаву ВТ23: 1 – після ЕПЗ; 2 – після ЕПЗ і відпалу променем; 3 – після ЕПЗ і термозміцнення; 4 – після ЕПЗ, відпалу променем і термозміцнення

Проведений аналіз експериментальних даних показав, що відпал ЕП з'єднань із сплаву ВТ23,

отриманих ЕПЗ, значно підвищує ударну в'язкість в найбільш небезпечній зоні сплавлення до рівня основного металу. Після термічного зміцнення всі перерізи ЗТВ мають значення ударної в'язкості, що дорівнюють або навіть перевищують в'язкість основного металу.

Ці результати підтверджуються перевіркою впливу відпалу ЕП на ударну в'язкість ЗТВ під час ЕПЗ натурних з'єднань, отриманих без присадкових матеріалів, (рис. 4, 5): ударна в'язкість підвищується після відпалу до задовільних значень, причому в зоні переходу від ЗТВ до основного металу вона вище, ніж на ЛС. Термічне зміцнення вирівнює ударну в'язкість, зберігаючи її на рівні основного металу.

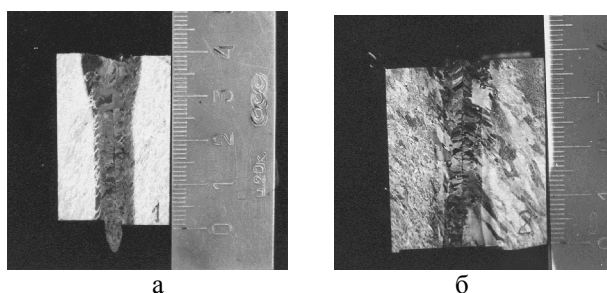


Рис. 4. Макрошліфи зварних з'єднань зі сплаву ВТ23: а – після ЕПЗ; б – після ЕПЗ і відпалу ЕП

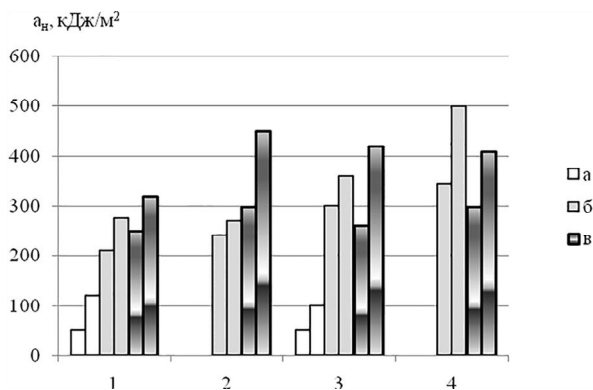


Рис. 5. Мінімальна і максимальна ударна в'язкість натурних зразків зі сплаву ВТ23 на різних ділянках зварного з'єднання: а – після ЕПЗ; б – після ЕПЗ і відпалу ЕП; в – після ЕПЗ, відпалу променем і термозміцнення; 1 – відпалювальний шов; 2 – лінія сплавлення відпалювального і основного шва; 3 – лінія сплавлення основного шва із ЗТВ; 4 – перехід від ЗТВ до основного металу

Аналіз отриманих результатів показав, що після ЕПЗ, біля лінії сплавлення шва з основним металом, ударна в'язкість найнижча, а в більш віддалених зонах, які нагрівалися до нижчих температур середні значення наближені до значень основного матеріалу. Відпал ЕП з'єднань з титанового сплаву

ВТ23 значно підвищує ударну в'язкість в найбільш небезпечній зоні сплавлення основного шва із ЗТВ з 50-100 кДж/м<sup>2</sup> до 300-360 кДж/м<sup>2</sup> (рис. 5). Подальше термозміцнення дозволяє отримати більш рівномірний розподіл ударної в'язкості за мінімальними значеннями по всіх зонах зварного з'єднання на рівні 250-300 кДж/м<sup>2</sup>.

## Висновок

Результати проведених досліджень показали перспективність ЕПЗ для виготовлення великогабаритних товстостінних елементів конструкцій з високоміцного титанового сплаву ВТ23. Зварні з'єднання вимагають обов'язкового відпалу для підвищення механічних характеристик і працездатності зварних конструкцій. Відпал для великогабаритних виробів з високоміцних титанових сплавів найдоцільніше проводити ЕП з певною конфігурацією температурних полів, що забезпечить необхідну структуру, фазовий і хімічний склад зварного з'єднання і оптимальне поєднання фізико-механічних властивостей. Показано, що відпал ЕП з регульованим термовкладенням і термозміцненням зварних з'єднань з високоміцного титанового сплаву ВТ23 дозволяють підвищити ударну в'язкість за мінімальними величинами у 2,5 рази до діапазону значень 250-300 кДж/м<sup>2</sup>. Підвищення ударної в'язкості з'єднань, що розглядаються, до рівня основного металу (табл. 1) можливо завдяки спільного використання присадкових матеріалів, які дозволяють регулювати хімічний склад зварного шва, і термічної обробки, що складається з відпалу ЕП та термозміцнення на оптимальних режимах для основного матеріалу.

## Література

1. Liitjering, G. *Titanium (Engineering Materials and Processes) [Text] / G. Liitjering, J. C. Williams. – Berlin : Springer, 2007. – 442 p.*
2. Карпович, Е. В. *Способы получения крупногабаритных осесимметричных изделий из высокопрочных титановых сплавов [Текст] / Е. В. Карпович, В. Г. Бессалый // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки : Зб. наук. пр. – Д. : Пороги, 2010. – Т. X. – С. 30-40.*
3. Федосов, А. В. *Перспективные аспекты использования электронно-лучевой технологии сварки для высокопрочных титановых сплавов [Текст] / А. В. Федосов, Е. В. Карпович // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. - № 1(118). – С. 16-22.*
4. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов [Текст] / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. – 2-е изд., доп. и перераб. – К. : Наук. думка, 1986. – 240 с.*

5. Влияние содержания легирующих элементов на свойства сварных соединений титанового сплава BT3-1 [Текст] / Е. А. Гусева и др. // Сварочное производство. – 1977. – № 12. – С. 15–23.

6. Распределение легирующих элементов в металле при наплавке кромок сплава BT22 перед ЭЛС [Текст] / И. Я. Дзыкович, А. Д. Шевелев, В. Ф. Топольский, И. К. Тяпко // Автоматическая сварка. – 1987. – № 4 (409). – С. 50–52.

7. Замков, В. Н. Особенности электроннолучевой сварки трубчатых заготовок из титанового сплава BT22 [Текст] / В. Н. Замков, А. Д. Шевелев, И. К. Тяпко // Автоматическая сварка. – 1989. – № 2. – С. 40–44.

8. Совершенствование технологии ЭЛС титанового сплава BT23 [Текст] / В. Н. Замков, А. Д. Шевелев, В. В. Арсенюк и др. // Автоматическая сварка. – 1984. – № 1. – С. 98.

9. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов [Текст] : Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.

10. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машиностроение, 1951. – 297 с.

11. Теория сварочных процессов [Текст] : Учебник для вузов по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров и др. – М. : Висш. шк., 1988. – 559 с.

12. Влияние скоростей охлаждения при сварке на механические свойства и структуру титанового сплава BT23 в околошовной зоне [Текст] / В. Н. Мищеряков, Ю. Г. Кириллов, И. В. Лясоцкий, В. С. Лясоцкая // Сварочное производство. – 1983. – № 4. – С. 26–28.

Надійшла до редколегії 30.10.15, розглянута на редколегії 18.11.2015

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА ДЛЯ ОТЖИГА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА BT23

*А. В. Федосов, Е. В. Карпович, В. А. Перерва*

В работе рассматривается способ термической обработки сварных соединений крупногабаритных изделий из высокопрочного титанового сплава BT23, которые наиболее широко используются в конструкциях ракетно-космической и авиационной техники. Показано, что отжиг такого типа сварных конструкций целесообразно проводить электронным лучом в камере установки электронно-лучевой сварки. Определено влияние отжига электронным лучом на величину ударной вязкости всех зон сварного соединения и комплекс термической обработки сварных крупногабаритных изделий из высокопрочного титанового сплава BT23.

**Ключевые слова:** зона термического влияния, высокопрочные титановые сплавы, электронно-лучевая сварка, механические свойства, термический цикл сварки, термическая обработка, электронный луч.

## APPLICATION OF AN ELECTRON BEAM FOR WELDED JOINTS ANNEALING OF THE TITANIUM ALLOY VT23

*A. V. Fedosov, E. V. Karpovich, V. A. Pererva*

In this work is considered the method of heat treatment of a large-sized weld joints from a high strength titanium alloy VT23, which are most widely used in the construction of space-rocket and aviation technology. Annealing of these welded structures is recommended to perform with the help of electron beam in an electron beam welding firing chamber. The electron beam annealing impact on the value of the impact strength of all welded joint zones and complex of a heat treatment of welded large-sized products from high-strength titanium alloy VT23 was determined.

**Key words:** heat-affected zone, high strength titanium alloys, electron beam welding, mechanical properties, thermal cycle of welding, heat treatment, electron beam.

**Федосов Олексій Вікторович** - аспірант каф. технології виробництва, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: fedosov.fav@gmail.com.

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

**Перерва Віктор Олександрович** – ст. викл. каф. технології виробництва, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: Pererva.viktor@gmail.com.