

О. В. ФЕДОСОВ, О. В. КАРПОВИЧ, І. І. КАРПОВИЧ

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна***ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ
СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ**

Предметом вивчення у статті є особливості формування зварного шва складнолегованих титанових сплавів при електронно-променевому зварюванні у вакуумі та аргонодуговому зварюванні. **Метою** даного дослідження є забезпечення необхідного рівня механічних властивостей зварних конструкцій з складнолегованих титанових сплавів, поліпшення структури та властивостей зварних з'єднань. **Завдання:** дослідити процеси, що протікають в зоні термічного впливу та визначити їх вплив на утворення дефектів; визначити режими зварювання деталей з складнолегованого титанового сплаву; вивчити вплив електронно-променевого зварювання на властивості матеріалів, такі як міцність, тріщиностійкість, корозійна стійкість. **Результати дослідження.** Вивчено вплив термічного циклу зварювання та подальшої термічної обробки на структурно-фазові перетворення в металі шва та зоні термічного впливу зварних з'єднань складнолегованого титанового сплаву. Встановлено, що в металі шва та зоні термічного впливу зварних з'єднань формується структура з переважанням метастабільної β -фази, що сприяє зниженню показників пластичності та ударної в'язкості. Найкраще поєднання міцності та пластичності досліджуваних зварних з'єднань було отримано після проведення термообробки, відпал при температурі 950 °C протягом однієї години та охолодження в печі. Використання присадної проволочки сприяє отриманню практично однорідної структури та розпаду метастабільних фаз у шві та зоні термічного впливу, межа міцності при цьому 1250 МПа. **Висновки.** Вивчено вплив присадних проволочок на структуру і властивості отриманих зразків, а результати обговорені в залежності від можливих практичних застосувань. В роботі описано створення і випробування елементів технологічного процесу електронно-променевого зварювання складнолегованих титанових сплавів. Це дає змогу широко застосовувати зварні з'єднання з титанових сплавів у виробах відповідального призначення. Наукова і практична цінність отриманих результатів полягає в підвищенні механічних властивостей зварних з'єднань складнолегованих титанових сплавів до рівня основного металу.

Ключові слова: титанові сплави; електронно-променеве зварювання; механічні властивості; структура; електронний промінь.

Вступ

Необхідність застосування в різних галузях техніки високоміцних матеріалів, які забезпечують повний комплекс механічних та експлуатаційних властивостей та при цьому добре зварюються, зумовлена високими вимогами до виробів. Для економії палива та збільшення корисного навантаження в авіаційній та ракетно-космічній галузі, необхідно використовувати полегшені конструкції. Низька щільність і висока міцність роблять титанові сплави відмінним конструкційним матеріалом для легких компонентів. Очевидно, що до відповідальних виробів, пред'являються високі вимоги, особливо в аерокосмічній промисловості. Однак з'єднання титанових виробів часто є складним процесом.

Найбільш критичним і частим дефектом нероз'ємних з'єднань при виготовленні конструкцій із титанових сплавів зварюванням, являється пористість в металі шва. Результати статистичного

аналізу показують, що частка пористості становить до 40% всіх дефектів металу шва нероз'ємних з'єднань. Однак результати досліджень авторів розходяться, та не мають однієї думки щодо причини утворення пор. Досить часто причиною їх утворення вважають забруднення на поверхні зварюваних кромок і присадної проволочки, не якісний захист зони зварювання. Хоча утворення дефектів відбувається як в швах виконаних з наскрізним проплавленням так і в швах виконаних електронно-променевим зварюванням в вакуумі.

Зварні шви характеризуються сукупністю технологічних та енергетичних параметрів процесу зварювання плавленням. Сталість експлуатаційних параметрів зварного з'єднання забезпечує підтримка на необхідному рівні енергетичних параметрів процесу зварювання за незмінних технологічних умов, геометричних розмірів, структурних властивостей, міцності та інших показників.

Однак можливість формування проплавлення з мінімальними розмірами зварної ванни вступає в

суперечність з досягненням стабільних експлуатаційних параметрів зварного з'єднання. Порушення заданих режимів зварювання найчастіше веде до появи в швах дефектів, навіть на добре зварюваних матеріалах. Вони зустрічаються за будь-яких способів зварювання плавленням: пори, підрізи, провисання зварного шва, а також підвищене розбризкування металу.

Для зниження неоднорідності металу шва рекомендується знижувати ступінь, а також систему його легування шляхом застосування присадних проволок з різним вмістом елементів (β -стабілізаторів). Це дозволяє підвищити пластичність шва, але при цьому значно зменшує його міцність.

Широкого використання набула високолегована присадна проволока марки СП15, ВТ2св та ВТ20-3. Через високий вміст молібдену його рекомендують використовувати при зварюванні двофазних титанових сплавів. Однак, межа міцності зварного шва складнолегованих титанових сплавів, виконаних із застосуванням присадної проволоки, не перевищує 1000 МПа. При цьому зменшується відношення міцності шва до міцності основного металу, через характерний недолік двофазних сплавів, що термічно зміцнюються. Тому рекомендують розташовувати шви в потовщених зонах. Цей прийом вважають єдиною можливістю реалізувати в зварній конструкції характеристики міцності на рівні основного металу.

Очевидно, що з практичної точки зору є продовження робіт з удосконалення методів зварювання високоміцних титанових сплавів, які відповідають вимогам до зварних конструкцій літальних апаратів та забезпечать задовільну межу міцності зварного шва.

Порівняльний аналіз методів з'єднання титанових сплавів аргонодуговим і електронно-променевим зварюванням, дозволить визначити способи підвищення характеристик міцності зварних швів титанових сплавів Ti-Al-Mo-V-Fe-Cr, отриманих зварюванням плавленням.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У ряді досліджень описані сучасні методи зварювання сплавів на основі титану: електрошлакове, аргонодугове, електронно-променеве та лазерне зварювання. Актуальним питанням є дослідження процесів зварювання та розробки нових технологічних процесів, які забезпечать довговічність та надійність зварних конструкцій.

Лазерне зварювання можна розглядати як один з найбільш перспективних способів виготовлення

деталей зі сплавів на основі титану через високу ефективність процесу, можливості як автоматизації, так і виготовлення складних конструкцій без додаткової механічної обробки [1].

В роботах [2, 3] розглянуто технологію зварювання з попереднім нагрівом та наступною термообробкою зварних швів. Виявлено вплив попереднього підігріву та термообробки на мікроструктуру та механічні властивості зварних швів зі сплаву Ti-23Al-23Nb-1,4V-0,8Zr-0,4Mo-0,4Si, отриманих лазерним зварюванням. Всі зварні з'єднання показали граничну міцність від 1070 до 1110 МПа, що відповідає приблизно 80% рівня основного металу. Підвищення міцності до 90-95% від основного металу, можливе за використання термічної обробки та багаторазового переплаву.

В роботах [4, 5] проведено дослідження мікроструктури зони сплавлення. Збільшення температури попереднього нагріву викликало зростання стовпчастих β -кристалів, а також збільшення ширини зони плавлення та зони термічного впливу. Недоліком даної технології є зниження вмісту Al і Ti, а також збільшення пористості і вмісту газоподібних елементів після зварювання при 600-800 °С. Мікротвердість кожного з'єднання, отриманого після зварювання з температурою попереднього нагріву до 600 °С, була нижчою, ніж у основного матеріалу.

Використання лазерного зварювання дозволяє поєднати різні товщини заготовок, має значну універсальність та гнучкість. Однак титанові сплави характеризуються складною оброблюваністю, високою температурою плавлення, високою міцністю, низькою теплопровідністю та високою реакційною здатністю до кисню, що ускладнює традиційні виробничі процеси [6]. Лазерне зварювання частково вирішує зазначені проблеми, але має і ряд недоліків техніко-економічного характеру.

У роботі [7] розглянули електрошлакове зварювання, яке забезпечує отримання якісних з'єднань. Межа міцності металу шва становить у середньому до 90 % міцності основного металу, а ударна в'язкість металу шва в 1,6 рази вище, ніж у основного металу. Механічні властивості зварного з'єднання в першу чергу пов'язані з розміром зерна та мікроструктурою металу шва та зони термічного впливу, які формуються в умовах низької швидкості охолодження та високих тепловкладень, що застосовуються в процесі електрошлакового зварювання. Однак економічність цього процесу досить невисока. Це пов'язано з низькою продуктивністю, значними витратами енергії, захисного газу і великих об'ємів механічної обробки зварних з'єднань.

З дугових способів застосовують зварювання плавким та неплавким електродом з подачею присадної проволочки. Недоліками цих способів зварювання є необхідність ретельного контролю якості захисту інертними газами. Особливо це критично при зварюванні в декілька шарів, а також обмеженим застосуванням продуктивних процесів для виконання кільцевих швів малого діаметру (до 280...300 мм), через складнощі утримання зварної ванни великого об'єму. Крім цього, більшість методів зварювання так і не виключають утворення пор в зварному шві [8]. При наявності пор, дуже помітно знижується довговічність зварних вузлів в умовах впливу циклічних навантажень. Для усунення цих дефектів потрібно застосовувати трудомісткі відновлюючі операції.

Сплави системи Ti-Al-Mo-V-Fe-Cr застосовують у відпаленому і термічно зміцненому станах. Щодо структури сплаву у відпаленому стані, то вона відтворена майже в рівній мірі у α - та β - фазах. Саме тому у відпаленому стані даний сплав можна віднести до найміцніших титанових сплавів. Така ситуація надає перевагу у проектуванні виробів з використанням титанових сплавів.

При дуговому зварюванні сплаву Ti-Al-Mo-V-Fe-Cr за один прохід, хімічний склад зберігається таким же, як і у основного металу, метал швів також має низьку пластичність та ударну в'язкість. Це пов'язано з гетерогенністю структури різних ділянок зварного шва, що виникає під впливом термічного циклу зварювання та, як наслідок, неоднаковим розподілом, формою та розмірами продуктів розпаду β -твердого розчину [9]. Тому при виборі режимів термічної обробки зварних з'єднань цього сплаву слід враховувати фазові та структурні особливості, що мають місце після зварювання.

Цей фактор також впливає на зварюваність, і оскільки за ступенем легування сплави Ti-Al-Mo-V-Fe-Cr відносяться до сплавів критичного складу, то під впливом термічного циклу зварювання в металі шва і зоні термічного впливу формується фазовий склад і структура з вкрай низькою пластичністю і ударною в'язкістю [10]. При виготовленні зварних конструкцій зі сплавів Ti-Al-Mo-V-Fe-Cr електронно-променевим зварюванням (ЕПЗ) хімічний склад зварних швів зберігається таким же, як і у основного металу, та має низьку пластичність та ударну в'язкість. При застосуванні термічної обробки зварного з'єднання після зварювання за режимами, що рекомендуються для основного металу, спостерігається ще більше зниження механічних властивостей металу шва.

Електронно-променевому зварюванню притаманні такі специфічні дефекти, як нерівномірне проплавлення кореня шва, глибокі кратери і великі

раковини [11]. Найпоширенішим дефектом при ЕПЗ є пористість, яка може призвести до втомного руйнування зварних зразків. При цьому виникають пори переважно малих розмірів (0,1...1,2 мм). У більшості випадків пористість фіксується поблизу зони сплавлення. Мікропористість, що не виявляється рентгенівським контролем, надає помітний вплив на межу втомної міцності з'єднань.

Якість зварного з'єднання значною мірою залежить від температурного циклу зварювання, процесу структурних змін у металі шва та зонах термічного впливу. Використання високоміцних сплавів неминуче призведе до коригування технологій зварювання, що використовуються в даний час. У зв'язку з цим, для ширшого застосування титану необхідне поглиблене дослідження процесів зварювання титанових сплавів.

Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є забезпечення необхідного рівня механічних властивостей зварних конструкцій з високоміцних складнолегованих титанових сплавів, на основі результатів експериментального обґрунтування процесів утворення зварного шва.

Для досягнення вказаної мети в даній роботі з досліджуваних аспектів поставлено та вирішено такі задачі:

- дослідити процеси, що протікають в зоні термічного впливу та визначити їх вплив на утворення дефектів;
- визначити режими зварювання деталей з складнолегованого титанового сплаву;
- вивчити вплив електронно-променевого зварювання на властивості матеріалів, такі як міцність, тріщиностійкість, корозійна стійкість тощо.

Вирішення задач дозволить підвищити якість зварних з'єднань відповідальних виробів та стабільність.

Матеріали та методи дослідження

Титанові сплави, що деформуються, мають клас за структурою ($\alpha+\beta$)-мартенситного типу. Ti-Al-Mo-V-Fe-Cr відносяться до групи ($\alpha+\beta$)-сплавів – це сплави, що містять у своєму складі α - та β -модифікації титану. Механічні властивості та хімічний склад цих високоміцних сплавів після термічної обробки (ТО) наведено в табл. 1.

Об'єктом досліджень є зварні з'єднання з складнолегованого Ti-Al-Mo-V-Fe-Cr високоміцного титанового сплаву. Зразки були отримані механічною обробкою у вигляді кілець на верстаті LYNX 2100 (Південна Корея). Для зниження

концентрації β -стабілізаторів у зварному шві до 3%, у стику зварювальних кромок було виконано щільне оброблення (рис. 1). Для аргонодугового методу застосовували стандартну обробку крайок згідно з рекомендаціями до зварювання.

Таблиця 1

Механічні властивості складнолегованого титанового сплаву

Зразок	Межа міцності σ_b , МПа	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Твердість, НВ 10 ⁻¹
I	1000-1180	38	265
II	1040-1100	37	270

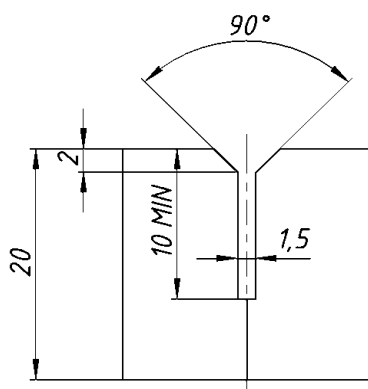


Рис. 1. Схема виготовлення стику під зварювання електронним променем

Зварювали зразки двох типів кільцевої форми за визначеними режимами зварювання, проводили металографічний аналіз та визначали рівень механічних властивостей при нормальних і підвищених температурах, режими зварювання наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Режими електронно-променевого зварювання

Режим	Прискорююча напруга U_y , кВ	Струм променя $I_{зв}$, мА	Струм фокусування I_f , мА	Швидкість зварювання $V_{зв}$, м/г
1	27	400	70	20
2	27	370	70	18

Відпрацювання режимів зварювання проводили на технологічних кільцях діаметром 160 мм, товщиною 20 мм. Використовували установку У530М з джерелом енергії У250А (ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України).

Проводився аналіз поверхні руйнування зразків після механічних випробувань та оцінювалась достовірність експериментальних результатів. Апробацію результатів дослідження проводили в лабораторних умовах.

При дослідженні зварних з'єднань з високоміцних сплавів були використані такі методи:

– металографічний метод. Отримані зразки розрізали вздовж осі на сегменти. З боку перетину розрізу готувалися шліфи для металографічних досліджень. Аналіз мікроструктури основного металу і зварних з'єднань проводили, як візуальним оглядом шліфів, так і з використанням мікроскопу МІМ-8 (СРСР) при збільшенні від $\times 500$ до $\times 1500$;

– методи вимірювання мікротвердості. У процесі досліджень визначали мікротвердість основного матеріалу і в різних ділянках зварних швів. Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 (СРСР) по ДСТУ ISO 6507-1:2007. Для порівняння значень твердості основного металу, зварних швів і зони термічного впливу безпосередньо на зазначеному приладі отримані значення мікротвердості НV переводилися в HRC. Для виміру мікротвердості основного металу і зони термічного впливу, виготовляли поперечні мікрошліфи, що піддавалися механічному поліруванню. Збільшення мікроскопа становило від 500 до 1500 раз. На кожному зразку ставили не менше 10 відбитків чотиригранної алмазної піраміди (кут між гранями 136°);

– механічні випробування на розтяг та ударну в'язкість виконували на зразках виготовлених по ДСТУ EN ISO 4136:2014 на машині INSTRON-8862 (Велика Британія) (рис. 2).



Рис. 2. Схема виготовлення зразків для досліджень характеру руйнування діаметром 12 мм та довжиною 60 мм

Результати досліджень

З'єднання виробів з високоміцного титанового сплаву виконували стандартною аргонодуговою технологією з присадкою ВТ20-3, АДЗ з присадкою ВТ2св і проникаючою дугою, електронно-променевим методом зварювання без присадки і з присадкою ВТ2св. У всіх випадках для підвищення

міцності зварного шву необхідно проводити термічну обробку. Технологія отримання необхідних характеристик для основного металу включала такі режими термообробки: 1 година, гартування при температурі 910 °С, охолодження у воду, наступні 3 години старіння за температури 650 °С, далі охолодження на повітрі.

Механічні властивості зварних швів з титанового сплаву, при різних методах зварювання із застосуванням термообробки наведені в табл. 3.

Зварні шви отримували аргонодуговою технологією зварювання з присадкою СП15, електронно-променевим методом без присадки, ЕПЗ зі вставками СП15. Після зварювання проводилась термообробка, що складалася з відпалу: 1 година при 750 °С, старіння: 12 годин при 380 °С, охолодження на повітрі, старіння 2 години при 550 °С та охолодження на повітрі.

Після ТО структура металу шва і перехідної зони в порівнянні з основним металом має свою специфіку. Після ЕПЗ фазовий склад шва та перехідної зони, різко загартованого з температури β -області, є мартенситною α' -фазою, а морфологія структури – дуже тонкі голки.

Таблиця 3

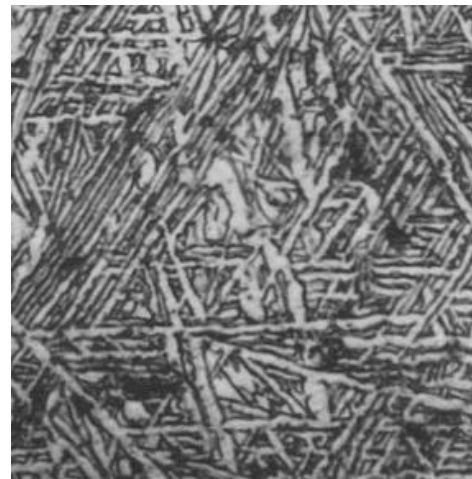
Механічні властивості зварних з'єднань після ТО зразок I

Вид зварювання	Межа міцності σ_b , МПа	Ударна в'язкість, Дж/см ²
АДЗ з присадкою ВТ20-3св	1150-1170	47-52
АДЗ з присадкою ВТ2св	1150-1200	21
ЕПЗ з присадкою ВТ2св	1150	33-37
ЕПЗ без присадки	1150-1200	15-27

Такі голки є внутрішніми концентраторами напружень. Паралельне розташування їх по відношенню один до одного посилює концентрацію напружень.

Сплав з такою морфологією структури має низьку ударну в'язкість ($a_n = 15$ Дж/см² при $\sigma_b = 1200$ МПа), оскільки вплив зовнішнього концентратора напружень збільшується внутрішніми концентраторами.

Зниження пластичності і ударної в'язкості відбувається також в результаті напружень, що виникають як термічних, викликаних об'ємними змінами, що відбуваються при кристалізації металу шва і подальшому різкому його охолодженні, так і структурних, що виникають в результаті перетворення вихідної β -фази в мартенситну α' -фазу (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Мікроструктура пластин деформованих сплавів (50 мкм): а – шов, б – основний метал

Згідно з існуючою технологією, деталі після зварювання переносяться у вакуумні печі або печі з інертною атмосферою. Охолодження у вакуумній камері електронно-променевої установки та ТО займає значний час, що призводить до великих енергетичних та економічних витрат.

ТО призводить до деякого підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань, ймовірно, за рахунок перерозподілу легуючих елементів у складі структури (табл. 4).

Таблиця 4

Механічні властивості зварних з'єднань після ТО зразок II

Вид зварювання	Межа тимчасової міцності σ_b , МПа	Ударна в'язкість, Дж/см ²
АДЗ з присадкою СП15	1100-1120	50-54
ЕПЗ з вставками із СП15	1220	48-54
ЕПЗ без присадки	1220	25-30

Обговорення результатів дослідження

Аналіз даних із табл. 3 показує, що межа міцності зварних швів знаходиться на рівні 0,9 від характеристик міцності основного металу. Показники ударної в'язкості знаходяться в різних межах і залежать не тільки від виду зварювання, але й наявності присадного матеріалу в зварювальному з'єднанні. Високі показники механічних властивостей отримані при ЕПЗ з присадкою ВТ2св, де межа міцності та ударна в'язкість зварного шва досягає значень $\sigma_b = 1150$ МПа, $a_n = 35$ Дж/см². Зазначена технологія дозволяє підвищити ударну в'язкість зварних швів у зоні термічного впливу (ЗТВ), наближаючи їх характеристики до основного металу.

Використання методів зварювання без застосування присадних матеріалів не дозволяє отримувати зварні з'єднання з потрібними властивостями. Внаслідок цього для зварювання титанових сплавів застосовують в основному методи з використанням присадних матеріалів. Що покращує механічні властивості зварних з'єднань за рахунок зміни хімічного складу.

З проведеного аналізу значень табл. 3 і 4 випливає, що з'єднання з високоміцних сплавів виконані застосуванням методів АДЗ та ЕПЗ з присадними матеріалами, після термообробки мають оптимальний комплекс фізико-механічних характеристик зварного шва.

Характерним для зварних з'єднань критичного складу є підвищення внаслідок відпалу пластичних властивостей та міцності. Значне покращення властивостей пояснюється сприятливим співвідношенням α - та β -фаз у структурі наволошовної зони після відпалу. Сплав стає стабільним і не спостерігається аномальної зміни електроопору при нагріванні.

Підвищення температури та збільшення тривалості відпалу в $(\alpha+\beta)$ -області супроводжується зміною внутрішньозеренної будови та зростанням розмірів α -пластин. Слід зазначити, що необхідно суворо регламентувати швидкості охолодження. При збільшенні швидкості охолодження температури відпалу, не досягається стабільність структури і спостерігається ефект гартування. При охолодженні на повітрі відбувається частковий розпад β -розчину з утворенням β -фази. Зменшення швидкості охолодження також небажане через зниження пластичності. Вплив середньої швидкості пічного охолодження в межах 1 - 1,4 °С/хв в діапазоні 780 - 350 °С. Зниження середньої швидкості пічного охолодження з 1,4 до 0,3 °С / хв супроводжується підвищенням міцності на 50 - 70 МПа і зниженням пластичності на 10-15%. Це викликано збільшенням

кількості α -фази та її характерною внутрішньозеренною будовою. Таким чином, високолеговані сплави критичного складу вимагають жорсткої регламентації швидкості пічного охолодження та коригування температури відпалу з урахуванням інерційності обладнання.

У зв'язку з чутливістю $(\alpha+\beta)$ -сплавів до термічного циклу зварювання та сприятливим впливом уповільненого охолодження на властивості зварних з'єднань, можна було очікувати, що електронно-променеве зварювання не знайде застосування для виготовлення зварних конструкцій із сплавів цієї групи. Однак, в результаті експериментальних досліджень було встановлено, що дрібнозерниста структура, що утворюється в процесі термічного циклу електронно-променевого зварювання, а також дисперсність продуктів внутрішньозеренного розпаду впливають на характер руйнування зварних з'єднань і зменшують негативний вплив пересиченої α -фази на властивості швів (див. рис. 3).

Було встановлено, що зміна швидкості охолодження при гартуванні практично не впливає на значення ударної в'язкості, але підвищення температури гартування до температур поліморфного перетворення збільшує ударну в'язкість зони термічного впливу і підтверджує необхідність високотемпературного відпалу. Збільшення значень ударної в'язкості при гартуванні пояснюється тим, що в умовах високих температур параметр решітки β -фази значно збільшується, що свідчить про поєднання β -фази від легуючих елементів і, відповідно, призводить до зменшення міцності та підвищення в'язкості.

Найбільш зручним способом відпалу зварних з'єднань може бути термообробка електронним променем за рахунок тепла, яке утворюється при повторному переплаві зварного шва. Однак експериментальні дані з літературних джерел свідчать про те, що триразовий переплави зварного шва на режимі основного зварювального проходу дозволяє отримати тільки незначне підвищення середніх значень ударної в'язкості. Можливо, це відбувається за рахунок рафінування металу в шві і ЗТВ після термообробки. Використання основного зварювального режиму для відпалу не рекомендується через велике тепловкладення, що призводить до багаторазового високотемпературного впливу на зварне з'єднання і практично не змінює значення механічних характеристик ЗТВ.

Проведений аналіз експериментальних даних показав, що відпал електронним променем з регульованим термовкладенням з'єднань, отриманих ЕПЗ, дозволить підвищити ударну в'язкість в найбільш небезпечній зоні сплавлення до рівня

основного металу. На міцність зварних з'єднань великий вплив також мають залишкові напруження. Показано, що повторна переплавка шва знижує рівень залишкових напружень, отже, відпал електронним променем, ймовірно, дозволить отримати аналогічний ефект.

Порівняльний аналіз АДЗ та ЕПЗ, стосовно отримання зварних з'єднань з високоміцних титанових сплавів, показав, що найкращі характеристики міцності зварних швів можна отримати АДЗ з присадкою.

Однак дугові методи зварювання мають ряд недоліків: обмеженість застосування продуктивних процесів для виконання кільцевих швів малого діаметра (до 250...300 мм) через труднощі утримання ванни зварювального великого обсягу; необхідність ретельного контролю якості захисту інертним газом зони, що піддається нагріванню до високих температур (особливо при багаточаровому зварюванні); наявність пор у багаточарових швах, які помітно знижують довговічність зварних вузлів за умов впливу циклічних навантажень. Для усунення дефектів, розміри та кількість яких перевищують технічні вимоги на виріб, потрібне виконання трудомістких ремонтних операцій.

Зварний шов при ЕПЗ дуже вузький і має паралельні межі, невелику площу зони термічного впливу, що викликає незначні кутові та лінійні деформації зварюваних виробів. Короблення практично відсутнє, цей критерій є визначним для ЕПЗ. Погонна енергія не перевищує 20% від аналогічного показника при дуговому зварюванні.

У зв'язку з тим, що електрони гальмуються безпосередньо в оброблюваному матеріалі, такі фактори як утворення плазми, коефіцієнти відображення і здатність матеріалу, що поглинає, практично не відіграють ніякої ролі при регулюванні зварювальних параметрів. Найбільший вплив на параметри зварювання електронним променем мають теплофізичні характеристики матеріалу.

Електронно-променевим способом можна зварити вироби тих самих типів, що і дуговим зварюванням. ЕПЗ також дозволяє виконувати з'єднання нових видів, наприклад, з'єднання елементів конструкцій, розташованих на різній висоті, з прорізними швами. За допомогою електронного променя можна проводити зварювання у важкодоступних місцях та у вузьких щілинах.

Зниження концентрації β -стабілізаторів у зварному з'єднанні виконується за рахунок видалення з області зварного шва певної частини основного матеріалу та заміною його присадним матеріалом, який не містить β -стабілізуючих елементів. Це завдання вирішили шляхом виконання на стику щільної обробки крайок.

Характеристики електронного променя можуть змінюватися в широких межах, що дозволяє регулювати процес нагрівання та охолодження виробу і, отже, здійснити всі етапи технологічного процесу виготовлення зварних з'єднань з титанових сплавів в електронно-променевої установці. Це дозволило скоротити час виробництва виробів з титанових сплавів, одержаних методом ЕПЗ, виключивши перерви між зварюванням та термічною обробкою, час транспортування та вакуумування.

Термообробку для виробів із високоміцних титанових сплавів найбільш доцільно проводити електронним променем з певною конфігурацією температурних полів, що забезпечують необхідну структуру, фазовий та хімічний склад зварної сполуки та оптимальне поєднання фізико-механічних властивостей.

Менш енергоємний спосіб отримання з'єднань із високоміцних титанових сплавів вимагає проведення процесу зварювання та циклу термообробки в електронно-променевої установці. Це дозволить отримати механічні характеристики з'єднань на рівні, досягнутих в даний час.

Висновок

1. Проведено дослідження процесів, що протікають в зоні термічного впливу та визначено, що зварні з'єднання потрібно піддавати термообробці у вигляді ступінчастого ізотермічного відпалу при температурах спочатку в β -області, а потім в $(\alpha+\beta)$ -області. Це дозволить підвищити пластичність зварних з'єднань до 10-15%.

2. Визначено режими зварювання деталей з складнолегованого Ti-Al-Mo-V-Fe-Cr титанового сплаву. Встановлено, що незначна зміна режимів зварювання суттєво не впливає на зварне з'єднання.

3. Досліджено вплив електронно-променевого зварювання на властивості матеріалів. Для багатоконпонентних титанових сплавів не доцільно застосовувати методи зварювання з глибоким проплавленням. Їхні зварні з'єднання вимагають обов'язкового відпалу після зварювання і саме в цьому стані можуть бути успішно застосовані. У стані після зварювання шви малопластичні при всіх методах зварювання без оброблення крайок за один прохід.

4. Межа міцності після термічної обробки може досягати значень 1250 МПа і більше. Такі показники міцності отримані із збереженням задовільної в'язкості, це одне з основних завдань технології виготовлення виробів із складнолегованих титанових сплавів.

Проведені дослідження показали актуальність подальшого вдосконалення технології зварювання

титанових складнолегованих сплавів, для забезпечення високих показників міцності та пластичності. Необхідно дослідити механізм утворення зварної ванни. Визначити основні параметри, що впливають на утворення дефектів у вигляді пор в зоні термічного впливу, для їх запобігання в подальшому.

Внесок авторів: огляд сучасного стану питання та визначення основних напрямків дослідження – **І. І. Карпович**; формування проблеми та шляхів її вирішення, аналіз результатів – **О. В. Карпович**; практичне відпрацювання та аналіз результатів – **О. В. Федосов**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Подяка

Автори висловлюють подяку кафедрі Ракетно-космічних та інноваційних технологій ДНУ імені Олеся Гончара за консультативну допомогу.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *A review on laser beam welding of titanium alloys [Text]* / S. T. Auwal, S. Ramesh, F. Yusof, & S. M. Manladan // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 97. – P. 1071–1098. DOI: 10.1007/s00170-018-2030-x.

2. *Effect of pre-heating and post-weld heat treatment on structure and mechanical properties of laser beam-welded Ti2AlNb-based joints [Text]* / D. Panov, S. Naumov, N. Stepanov, V. Sokolovsky, E. Volokitina, N. Kashaev, V. Ventzke, R. Dinse, S. Riekehr, E. Povolyaeva, N. Nochovnaya, E. Alekseev, S. Zhrebtsov, & G. Salishchev // *Intermetallics*. – 2022.

– Vol. 143. – Article no. 107466. DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107466.

3. *Laser welding and microstructural characterization of dissimilar γ -TiAl-Ti6242 joints [Text]* / I. Burkhardt, V. Ventzke, S. Riekehr, N. Kashaev, & J. Enz // *Intermetallics*. – 2019. – Vol. 104. – P. 74–83. DOI: 10.1016/j.intermet.2018.09.012.

4. *Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy fabricated by selective laser melting [Text]* / M. Waqas, D. He, Y. Liu, S. Riaz, & F. Afzal // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2023. – Vol. 32. – P. 680–694. DOI: 10.1007/s11665-022-07106-7.

5. *The effect of post-weld heat treatment on the microstructure and notched tensile fracture of Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn to Ti-6Al-4V dissimilar laser welds [Text]* / C. T. Hsieh, R. K. Shiue, R. T. Huang, & L. W. Tsay // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 653. – P. 139–146. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.013.

6. *Yang, J. Microstructure and mechanical properties of pulsed laser welded Al/steel dissimilar joint [Text]* / J. Yang, Y. L. Li, & H. Zhang // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2016. – Vol. 26, iss. 4. – P. 994–1002. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64196-1.

7. *Shapovalov, V. Structure and mechanical properties of thick-walled joints of Ti-6-4 titanium alloy made by electroslag welding [Text]* / V. Shapovalov, I. Protokovilov, V. Porokhonko // *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – Vol. 36. – P. 262–268. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.033.

8. *A new method for refinement of Ti-6Al-4V prior- β grain structure in the alternating magnetic field assisted narrow gap gas tungsten arc welding (AMF-GTAW) via filler wire oscillation [Text]* / Q. Sun, Y. Liu, Q. Zhang, K. Kang, C. Liu, Y. Liu, X. Tang, & Q. Sun // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2024. – Vol. 327. – Article no. 118376. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2024.118376.

9. *Wetting behavior of melt and its effect on lack of fusion in arc oscillating NG-GTAW [Text]* / F. Li, Q. Sun, P. Jin, Y. Liu, M. Chen, J. Li, S. Hou, M. Wang, & Y. Ji // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – Vol. 296. – Article no. 117176. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117176.

10. *Achieving superior mechanical properties in electron beam welded joints of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloy thick plate using novel annealing treatments [Text]* / F. S. Li, L. H. Wu, H. B. Zhao, H. J. Li, M. Tong, P. T. Hua, P. Xue, D. R. Ni, B. L. Xiao, & Z. Y. Ma // *Materials Characterization*. – 2023. – Vol. 195. – Article no. 112548. DOI: 10.1016/j.matchar.2022.112548.

11. *Microstructure and mechanical properties of electron beam welded TC4 titanium alloy structure with*

backing plate [Text] / X. Zhao, X. Lu, K. Wang, & F. He // *Materials Today Communications*. – 2023. – Vol. 35. – Article no. 106160. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106160.

References

1. Auwal, S. T., Ramesh, S., Yusof, F., & Manladan, S. M. A review on laser beam welding of titanium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, pp. 1071–1098. DOI: 10.1007/s00170-018-2030-x.
2. Panov, D., Naumov, S., Stepanov, N., Sokolovsky, V., Volokitina, E., Kashaev, N., Ventzke, V., Dinse, R., Riekehr, S., Povolyaeva, E., Nochovnaya, N., Alekseev, E., Zhrebtsov, S., & Salishchev, G. Effect of pre-heating and post-weld heat treatment on structure and mechanical properties of laser beam-welded Ti2AlNb-based joints. *Intermetallics*, 2022, vol. 143, article no. 107466. DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107466.
3. Burkhardt, I., Ventzke, V., Riekehr, S., Kashaev, N., & Enz, J. Laser welding and microstructural characterization of dissimilar γ -TiAl-Ti6242 joints. *Intermetallics*, 2019, vol. 104, pp. 74–83. DOI: 10.1016/j.intermet.2018.09.012.
4. Waqas, M., He, D., Liu, Y., Riaz, S., & Afzal, F. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy fabricated by selective laser melting. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2023, vol. 32, pp. 680-694. DOI: 10.1007/s11665-022-07106-7.
5. Hsieh, C. T., Shiue, R. K., Huang, R. T., & Tsay, L. W. The effect of post-weld heat treatment on the microstructure and notched tensile fracture of Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn to Ti-6Al-4V dissimilar laser welds. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 653, pp. 139-146. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.013.
6. Yang, J., Li, Y. L., & Zhang, H. Microstructure and mechanical properties of pulsed laser welded Al/steel dissimilar joint. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, vol. 26, iss. 4, pp. 994–1002. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64196-1.
7. Shapovalov, V., Protokovilov, I., & Porokhonko, V. Structure and mechanical properties of thick-walled joints of Ti-6-4 titanium alloy made by electroslag welding. *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 36, pp. 262-268. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.033.
8. Sun, Q., Liu, Y., Zhang, Q., Kang, K., Liu, C., Liu, Y., Tang, X., & Sun, Q. A new method for refinement of Ti-6Al-4V prior- β grain structure in the alternating magnetic field assisted narrow gap gas tungsten arc welding (AMF-GTAW) via filler wire oscillation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, vol. 327, article no. 118376. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2024.118376.
9. Li, F., Sun, Q., Jin, P., Liu, Y., Chen, M., Li, J., Hou, S., Wang, M., & Ji Y., Wetting behavior of melt and its effect on lack of fusion in arc oscillating NG-GTAW. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, vol. 296, article no. 117176. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117176.
10. Li, F. S., Wu, L. H., Zhao, H. B., Li, H. J., Tong, M., Hua, P. T., Xue, P., Ni, D. R., Xiao, B. L., & Ma, Z. Y. Achieving superior mechanical properties in electron beam welded joints of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloy thick plate using novel annealing treatments. *Materials Characterization*, 2023, vol. 195, article no. 112548. DOI: 10.1016/j.matchar.2022.112548.
11. Zhao, X., Lu, X., Wang, K., He, F. Microstructure and mechanical properties of electron beam welded TC4 titanium alloy structure with backing plate. *Materials Today Communications*, 2023, vol. 35, article no. 106160. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106160.

Надійшла до редакції 10.01.2024, прийнята до опублікування 15.04.2024

COMPLEXLY ALLOYED TITANIUM ALLOYS RESEARCH PERFORMED BY FUSION WELDING

Oleksii Fedosov, Olena Karpovych, Ivan Karpovych

The subject of this article is peculiarities of weld seam formation of complex titanium alloys during electron beam welding in vacuum and argon arc welding. The purpose of this study is to ensure the required level of mechanical properties of welded structures from complex titanium alloys to improve the structure and properties of welded joints. The task: to investigate the processes that are taking place in the zone of thermal influence and to determine their influence on defects formation; to determine the modes of parts welding made of complex titanium alloy; to study the effect of electron beam welding on the materials properties, such as strength, crack resistance, and corrosion resistance. Research results. The thermal cycle influence of welding and subsequent heat treatment on the structural and phase transformations in the weld metal and the heat-affected zone of complex titanium alloy welded joints was studied. It was established that a structure with a metastable β -phase predominance is formed in the weld metal and the zone of

welded joints thermal influence, which contributes to the reduction of plasticity and impact toughness. The best combination of the studied welded joint strength and ductility was obtained after heat treatment, annealing at a temperature of 950 °C for 1 h, and cooling in the furnace. The use of filler wire contributes to obtaining an almost uniform structure and the disintegration of metastable phases in the seam as well as in the zone of thermal influence, and the strength limit is 1250 MPa. Conclusions. The influence of filler wires on the obtained samples structure and properties was studied, and the results were discussed depending on possible practical implementations. This article describes the creation and testing of elements of electron beam welding of complex titanium alloys technological process. This makes it possible to widely use welded combined titanium alloys in products of the appropriate purpose. The obtained scientific and practical results lead to increased mechanical properties of complex titanium alloys welded joints to the level of the base metal.

Keywords: titanium alloys; electron beam welding; mechanical properties; structure; electron beam.

Федосов Олексій Вікторович – канд. техн. наук, доц. каф. Ракетно-космічних та інноваційних технологій, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, Україна.

Карпович Олена Володимирівна – канд. техн. наук, доц. каф. Ракетно-космічних та інноваційних технологій, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, Україна.

Карпович Іван Іванович – канд. техн. наук, доц. каф. Ракетно-космічних та інноваційних технологій, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, Україна.

Oleksii Fedosov – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Rocket and Space and Innovative Technologies Manufacturing Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: fedosov.fav@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6269-5288, Scopus Author ID: 57162959000.

Olena Karpovych – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Rocket and Space and Innovative Technologies Manufacturing Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: kelvldmail@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0677-5822, Scopus Author ID: 58739455700.

Ivan Karpovych – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Rocket and Space and Innovative Technologies Manufacturing Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: ivkarp70@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3633-8532.