

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

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна***ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ
МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ**

Титанові сплави володіють високою міцністю та задовільною зварюваністю. Їх широко використовують у виробництві літаків та інших конструктивних елементів у сучасній аерокосмічній галузі. Однак через високі вимоги до авіаційної та ракетно-космічної техніки, актуальним питанням залишається підвищення надійності та довговічності виробів відповідального призначення. В даному дослідженні приведено результати зварювання трубчастих заготовок електронним променем. **Предметом** вивчення у статті є особливості електронно-променевого зварювання трубчастих заготовок з складнолегованого титанового сплаву. **Метою** даної роботи є забезпечення високого рівня механічних властивостей зварних швів трубчастих заготовок, на основі результатів експериментального відпрацювання режимів зварювання. Для досягнення вказаної мети в даній роботі поставлено та вирішено такі **задачі**: дослідити механізм утворення пор в зварних з'єднаннях; вивчити вплив електронно-променевого зварювання на властивості зварного шва; забезпечити високі показники фізико-механічних властивостей зварних з'єднань. Отримані такі **результати дослідження**. Вдалося отримати задовільні характеристики зварного з'єднання, зварюванням в нижньому положенні на підкладці та в горизонтальному положенні. Застосування термічної обробки дозволяє підвищити міцність зварних з'єднань до рівня основного металу. Зварні шви, незалежно від способу зварювання, після зварювання мають крупнозернисту структуру з ліквіційною неоднорідністю, що виявляється в нерівномірному травленні шва. **Висновки**: Досліджено різні металургійні аспекти електронно-променевого зварювання титану. При електронно-променевому зварюванні трубчастих заготовок пори утворюються переважно поблизу зони сплавлення і в осі шва. Механічне оброблення крайок, зниження швидкості, обертання заготовок і повторний переплав металу шва дозволяють різко зменшити кількість пор у швах, зварених в нижньому положенні. Виведення кратера при нерухомій заготовці дозволяє уникнути утворення корневих дефектів на ділянці замикання кільцевого шва. Наукова і практична цінність отриманих результатів полягає в підвищенні механічних властивостей зварних з'єднань трубчастих заготовок.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання; титанові сплави; трубчасті заготовки; термічна обробка.

Вступ

Титанові сплави широко використовуються в аерокосмічному та прецизійному виробництві завдяки своїй жароміцності та зносостійкості. Серед цих сплавів особливе значення має сплав структури Ti-Al-Mo-V-Fe-Cr через його двофазну ($\alpha + \beta$) структуру. Як основні способи зварювання конструкцій з титанових сплавів зазвичай використовують методи високоенергетичного променевого зварювання з газовим захистом. Для виготовлення зварних конструкцій з титанових сплавів використовуються практично всі способи зварювання.

Двофазний титановий сплав має високу міцність у відпаленому та термічно зміцненому станах, а також необхідний рівень пластичності та в'язкості, що забезпечує надійну роботу відповідальних вузлів, виготовлених з цього сплаву. У той же час при

зварюванні заготовок з титанового сплаву VT22 не завжди вдається отримати з'єднання, механічні властивості яких можна порівняти з властивостями основного металу. Пояснюється це негативним впливом на властивості металу шва і зони термічного впливу фазових і структурних перетворень, що протікають при термічному циклі зварювання.

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 навколошовної зони після відпалу. Сплав стає стабільним і не спостерігається аномальної зміни електроопору при нагріванні.

Термообробка зварних з'єднань на режимах основного металу, не дозволяє відновити пластичність і ударну в'язкість металу шва та зони термічного впливу. Високі показники пластичності і

в'язкості досягаються шляхом зменшення ступеня легування металу шва завдяки використанню присадних проволочок. Однак у цьому випадку практично не покращуються властивості металу зони термічного впливу.

У зв'язку з цим технологія зварювання титанового сплаву VT22, незалежно від виду: лазерна, електронно-променева, передбачає виконання багатоступінчастого відпалу. За такої технології досягається необхідний рівень пластичності та ударної в'язкості зварних з'єднань. Проте міцність одержаних з'єднань не перевищує 950...1000 МПа. Основний метал після багатоступеневого відпалу також має знижену міцність до 90% від основного металу. Це викликає необхідність компенсації втрат міцності сплаву шляхом потовщення елементів зварних конструкцій, що, звичайно, призводить до збільшення їх маси та габаритів. Збільшення маси виробів призводить до збільшення використання палива та зменшення корисного навантаження, що є не прийнятним в сучасних умовах.

Таким чином, одержання з напівфабрикатів титанового сплаву VT22 термічно зміцнених зварних з'єднань, близьких за механічними властивостями до основного металу, є актуальним завданням.

Необхідність його вирішення обумовлена прагненням більш ефективного використання переваг даного сплаву при виготовленні конструкцій різного призначення. Зміцнююча термічна обробка, що забезпечує рівномірність зварного з'єднання з основним металом, передбачає збереження хімічного складу металу шва. Однак така термообробка вимагає пошуку шляхів підвищення ударної в'язкості як металу шва так і зони термічного впливу. Найбільш перспективним є подальше вдосконалення схем і режимів термічної обробки.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В якості основних способів зварювання конструкцій із титанових сплавів зазвичай застосовуються методи високоенергетичного променевого зварювання з захистом зони термічного впливу. Це дозволяє уникнути шкідливого загазовування у зварних швах та зменшити кількість дефектів. В даний час для технології виготовлення титанових сплавів використовуються практично всі способи зварювання.

Останнім часом використовують зварювання титанових сплавів тертям [1]. Основною проблемою при зварюванні тертям титанового сплаву є контроль мартенситу, який залежить від внутрішніх напружень. Мартенсит в свою чергу шкідливий при

дотриманні балансу між оптимальною міцністю та ударною в'язкістю. Для підвищення механічних характеристик зварних швів, необхідно виконувати термообробку.

Термообробка зварних з'єднань мартенситного типу, як правило, виконується не тільки для зняття залишкових напружень, але і для відновлення пластичності зварних з'єднань, стабілізації структури, в результаті якої α' -фаза перетворюється на стабільні $(\alpha+\beta)$ – складові [2]. Крім того, зварне з'єднання сплавів мартенситного типу термічно нестабільне і може бути ще більше зміцнене внаслідок дисперсійного твердіння при тривалому нагріванні в інтервалі температур 290...540°C, які можуть збігатись з температурами експлуатації виробу [3]. В зв'язку з цим термообробка зварних з'єднань також є необхідною.

В роботах [4, 5] розглядали аргондогдове зварювання з місцевим захистом та з загальним в камерах з контрольованою атмосферою. Однак, незважаючи на забезпечення якісного захисту від окислення, спостерігається зниження властивостей міцності зварних з'єднань у тому числі з підвищенням товщини металу, що зварюється.

З дугових способів застосовують зварювання електродом, що плавиться і не плавиться з подачею присадної проволочки. Недоліки цих способів полягають у необхідності ретельного контролю якості захисту інертним газом зони, що піддається нагріванню до високих температур (особливо при багатощаровому зварюванні), а також обмеженості застосування продуктивних процесів для виконання кільцевих швів малого діаметра (до 250-300 мм) через труднощі утримання зварювальної ванни величезного обсягу [6, 7]. На сьогоднішній день, не існує процесу дугового зварювання, який би гарантував відсутність пор у багатощарових швах. За наявності пор помітно знижується довговічність зварних вузлів за умов впливу циклічних навантажень. Для усунення дефектів потрібне виконання трудомістких ремонтних операцій.

Електронно-променево зварювання забезпечує найкращі умови захисту металу шва титанових сплавів від окислення. Висока концентрація теплової енергії дозволяє вести зварювання на високих швидкостях при малій енергоємності процесу та отримувати зварні з'єднання з малою шириною шва та зони термічного впливу. Це дозволяє отримати мінімальні усадки, деформації та внутрішні напруження у зварному шві [8, 9].

Незважаючи на відомі переваги ЕПЗ описані авторами робіт [10, 11]: надійний захист розплавленого та розігрітого металу від повітря, можливість зварювання за один прохід металу практично будь-якої товщини, невеликі розміри шва

і зони термічного впливу, цей вид зварювання ще обмежено застосовується при виконанні кільцевих швів на титанових сплавах. Це зумовлено, зокрема, певними труднощами, які виникають при здійсненні бездефектного замикання кільцевих швів (особливо на металі середніх та великих товщин), а також підвищеною схильністю титанових сплавів до утворення пор. У зв'язку з цим з'єднання титанових сплавів, виконані ЕПЗ, мають у деяких випадках меншу довговічність порівняно зі зварними з'єднаннями, що отримані іншими способами зварювання плавленням.

У цій роботі розглядаються умови отримання за допомогою ЕПЗ бездефектних з'єднань трубчастих заготовок зі сплаву ВТ22 та досягнення сприятливого поєднання механічних властивостей без зміни хімічного складу металу шва за рахунок оптимізації режиму термічної обробки.

Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є забезпечення високого рівня механічних властивостей зварних швів магістральних трубопроводів.

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

- дослідити механізм утворення пор в зварних з'єднаннях під час зварювання трубчастих заготовок;
- вивчити вплив електронно-променевого зварювання на властивості зварного шва трубчастих заготовок;
- забезпечити високі фізико-механічні властивості зварних з'єднань.

Вирішення вказаних задач дозволить зварювати трубчасті заготовки відповідального призначення для авіаційної та ракетно-космічної галузі, з найкращим поєднанням захисту від атмосферного впливу та високими механічними властивостями.

Матеріали та методи дослідження

В лабораторних умовах проводили зварювання заготовок з титанового сплаву ВТ22 у вигляді труб діаметрами 140x34 мм. Зварювання відбувалось з застосуванням стикових швів без обробки кромки за один прохід. Використовували установку з енергоблоками 60/60 та У-250А (ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України).

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

- металографічний метод. 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 $\times 1500$;

- рентгенографічний метод. Якість зварних з'єднань оцінювали візуально, за допомогою просвічування рентгеном та металографічного дослідження поперечних шліфів.

- 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 виміру мікротвердості основного металу і зони термічного впливу, виготовляли поперечні шліфи, що піддавалися механічному поліруванню.

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

Результати досліджень

Як відомо, електронно-променево зварювання може виконуватися в різних просторових положеннях. При зварюванні у кожному конкретному положенні можливі різні комбінації параметрів режиму зварювання, що забезпечують задану глибину проплавлення. Для відпрацювання технології було проведено зварювання двома способами: у горизонтальному положенні та нижньому положенні з використанням підкладки.

При зварюванні горизонтальним променем на режимі приведеному в таблиці 1, спостерігалось задовільне формування кільцевого шва. Було виявлено дефект у вершині шва у вигляді підрізу, який не перевищував 0,2 мм (рис. 1). Для отримання вузького шва електронно-променевим зварюванням, потрібна дуже висока точність суміщення осі електронного променя зі стиком. Це дозволяє запобігти утворенню дефектів в корені шва. При цьому, ширина шва у верхній частині становила до 4 мм, а нижньої близько 0,8-1 мм.

Таблиця 1
Режими зварювання заготовок зі сплаву ВТ22

№	Прискорююча напруга U_y , кВ	Струм променя $I_{зв}$, мА	Кутова швидкість обертання ω_z , c^{-1}
1	60	300	0,12
2	60	220	0,06
3	60	140	0,03
4	60	100	0,02
5	30	220	0,012

Зі зменшенням кутової швидкості обертання заготовок до $0,06 \text{ с}^{-1}$ стійкість процесу зварювання не порушується. Спостерігається збільшення ширини шва у верхній частині до 5 мм, а в нижній до 1,5 мм. Глибина підрізу при цьому не перевищує 0,45 мм.

При зварюванні по режиму №3 $0,03 \text{ с}^{-1}$ формується випуклість у нижній частині шва внаслідок винесення рідкого металу. У верхній частині шва утворюється увігнутість глибиною від 0,5 до 1,5 мм. Якщо розглянути перетин зварного шва, то він має форму трапеції з довжиною основ 3 і 1 мм.

При кутовій швидкості обертання заготовок $0,02 \text{ с}^{-1}$ ширина шва збільшується до 3 мм у верхній частині і до 2 мм у нижній. Також зростає до 1,5... 2,5 мм і глибина увігнутості шва. Відпрацьовувались і інші режими зварювання, однак результати були не задовільні.

Подальше зменшення значень швидкості обертання призводить до різкого порушення стійкості процесу зварювання та нестабільності формування швів внаслідок витікання розплавленого металу.

Для визначення пористості швів, зварених на режимах таблиці 1, проводили металографічні дослідження не менше ніж п'яти поперечних шліфів для кожного шва. Встановлено, що з використанням високого струму променя, пористість швів відрізняється не суттєво. При зварюванні на режимі з струмом променя 100 мА, кількість пор у шві знижується майже в 2 рази. Однак і в цьому випадку пористість металу залишається досить високою (до 40... 45 пор на одному шліфі площею близько 50 мм^2). Діаметр пор становить 10...40 мкм, причому понад 70 % з них мають мінімальний розмір. Розташовані пори в основному по осі шва та в зоні сплавлення (рис. 1). При утворенні вздовж осі шва витягнутих або рівновісних кристалітів, пори спостерігаються переважно поблизу їх кордонів.



Рис. 1. Утворення пор в металі зварного шва

З метою зниження пористості металу та дослідження раціональних прийомів бездефектного замикання кільцевого шва як основний процес була

прийнята ЕПЗ у нижньому положенні на підкладці (режим № 5, табл. 1).

Додаткові заходи щодо зменшення кількості пор полягали в шабренні кромок, що зварюються до отримання чистої поверхні; зниження кутової швидкості обертання заготовок до $0,012 \text{ с}^{-1}$ і повторному перепаляві металу шва для повнішої його дегазації. Все це дозволило на порядок, порівняно зі зварюванням у горизонтальному положенні, зменшити кількість пор (на одному шліфі виявлено від 3 до 8 пір діаметром не більше 20 мкм). З'єднання з мінімальною кількістю пор піддавали механічним випробуванням.

З'єднання, зварені на прийнятих режимах, у вихідному стані мають невисоку міцність і низьку ударну в'язкість металу шва і зони термічного впливу (табл. 2). Усі зразки при випробуванні на розтягування руйнувалися швом. Характерним є зменшення границі міцності з'єднань у міру зниження кутової швидкості обертання заготовок.

Таблиця 2

Механічні властивості титанового сплаву після зварювання

№ режиму зварювання	Межа міцності σ_b , МПа	Ударна в'язкість, Дж/см ²	КСУ, Дж/см ²
1	1000	23	18
2	960	15	5
3	950	18	11
4	930	19	12
5	930	20	14
Основний метал (ОМ)	1260	-	23

Після зварювання в металі швів утворюється переважно β -фаза, властива загартованій структурі. Швидкість обертання заготовок істотно впливає на характер кристалізації металу поблизу осі шва.

При високих значеннях швидкості обертання заготовки $0,12 \text{ с}^{-1}$ зрощення кристалітів поблизу осі шва (рис. 2, а) відбувається під кутом, близьким до 180° . Зменшення кутової швидкості до $0,007 \text{ с}^{-1}$ призводить до появи по осі шва одиничних рівновісних або витягнутих кристалів (рис. 2, б). При кутовій швидкості режиму 3, рівновісні кристали спостерігаються в середній частині шва і в корені. Мінімальна швидкість обертання заготовок негативно впливає на зварне з'єднання, виникають вздовж осі шва рівновісні кристали.

Значення КСУ визначали на зразках за стандартною методикою, при випробуванні зразків з напівкруглим надрізом по шву і по зоні термічного впливу.

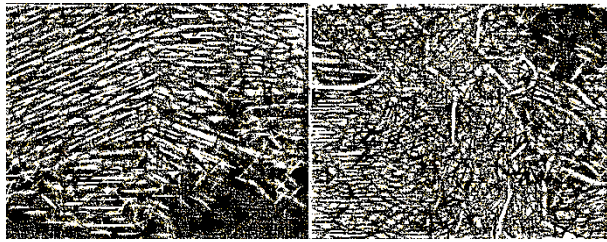


Рис. 2 Утворення кристалів шва

Структура зони термічного впливу зварних з'єднань представлена рівновісними β -зернами. Усередині зерна утворюються дисперсні голчасті виділення α -фази, кількість якої збільшується в міру віддалення від зони сплавлення. Виділення цієї фази розподілено нерівномірно. В одних зернах голчасті виділення спостерігаються по межах зерна, в інших вони розосереджені по всьому тілу зерна.

Ефективним методом зниження структурної та фазової неоднорідності та підвищення ударної в'язкості металу шва та зони термічного впливу є відпал зварних з'єднань. Використання рекомендованого для сплаву VT22 багатоступінчастого відпалу за режимом I (нагрівання до 825 °С, витримка 3 год, охолодження з піччю до 750 °С, витримка 1 год, охолодження з піччю до 500 °С, нагрівання до 580 °С, витримка 4 год, охолодження з піччю до 200 °С, потім на повітрі) дозволило підвищити ударну в'язкість з'єднань, виконаних на різних режимах, не менше ніж у 2 рази (табл. 3). Ударна в'язкість металу зони термічного впливу стала у всіх випадках практично однаковою.

Таблиця 3

Механічні властивості титанового сплаву після ТО

№ режиму зварювання	Межа міцності σ_b , МПа	Ударна в'язкість, Дж/см ²	КСУ, Дж/см ²
I	930	67	58
	980	42	58
	950	36	54
	940	58	55
	950	55	54
ОМ	1010	-	60
II	1285	20	22
ОМ	1288	-	25
III	1050	42	42
ОМ	1150	-	40

Використання рекомендованої для сплаву зміцнюючої термообробки (гартування та наступне старіння) за режимом II (нагрів до 850 °С, 2 год, охолодження з піччю до 710 °С, 1 год, охолодження

на повітрі; нагрівання до 550 °С, 3 год, охолодження на повітрі) забезпечує високі значення границі міцності з'єднань, але не дозволяє досягти ударної в'язкості більше 25 Дж/см².

Термічна обробка з'єднань, що складається з повітряного гартування і двостадійного старіння, забезпечує ударну в'язкість металу шва і зони термічного впливу не нижче 40 Дж/см² при границі міцності до 1050 МПа.

Виконані дослідження з використанням чисельного комп'ютерного моделювання експерименту дозволили вибрати оптимальний режим повітряного гартування та наступного старіння в дві стадії. Термообробка, що виконується за режимом III (нагрівання до 830 °С, 2 год, охолодження з піччю до 700 °С, 1 год, на повітрі; нагрівання до 390 °С, 4 год, охолодження на повітрі; повторне нагрівання до 600 °С, 2 год, охолодження на повітрі), забезпечує ударну в'язкість з'єднань трубчастих заготовок не нижче 40 Дж/см² при міцності до 1050 МПа.

Обговорення результатів дослідження процесів зварювання високоміцних титанових сплавів

Горизонтальне розташування електронного променя за режимами таблиці 1, впливає на використання присадних матеріалів. Таке розташування викликає труднощі, через стікання рідкого металу по поверхні заготовки. Також це заважає проведенню ремонтних операцій.

Спроби знайти оптимальний варіант зварювання, при якому потужність електронного променя зменшується одночасно зі зміною положення фокальної площини на ділянці замикання шва, також не дали позитивних результатів.

Відомо, що пористість металу шва залежить від просторового розташування променя (способу зварювання) та режимів (див. рис. 1). При зварюванні плоских зразків зниження швидкості зварювання дозволяє зменшити пористість, особливо при ЕПЗ в нижньому положенні.

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.

При відпрацюванні техніки бездефектного замикання кільцевого шва використовували відомий спосіб, при якому як незалежна змінна прийнята швидкість зварювання. На ділянці замикання швидкість обертання заготовок поступово

зменшували від робочих значень до нуля, при цьому потужність променя знижували так, щоб забезпечувалося повне проплавлення стику до зупинки виробу. Після зупинки потужність електронного променя продовжували зменшувати до нуля. Для усунення кратера в місці виведення променя при нерухомому виробі у зварювальну ванну подавали присадну проволоку марки ВТ2св. Такий спосіб замикання швів досить простий і дозволяє уникнути утворення корневих дефектів.

Зварні шви, виконані ЕПЗ, незалежно від варіанту, після зварювання мають крупнозернисту структуру з ліквідаційною неоднорідністю, що виявляється в нерівномірному травленні шва. Усередині зерна спостерігається рельєф α' – фази мартенситного типу з окремими виділеннями α – фази на межі зерна (див. рис. 2).

Встановлено, що відпал сприяє вирівнюванню структури окремих ділянок зварних з'єднань. В зоні термічного впливу, і у шві, відбувається інтенсивний розпад (β -фази) і підвищення ударної в'язкості. У той же час міцність з'єднань після такого відпалу залишається досить низькою (див. табл. 3).

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

Висновок

1. При електронно-променевому зварюванні трубчастих заготовок з титанового сплаву ВТ22 пори утворюються переважно поблизу зони сплавлення і в осі шва. Механічне оброблення крайок, зниження швидкості, обертання заготовок і повторний переплав металу шва дозволяють різко зменшити кількість пор у швах, зварених в нижньому положенні. Актуальним є подальше вивчення механізмів утворення пор, їх прогнозування, та розробка нових методів їх запобігання та усунення.

2. Виведення кратера при нерухомій заготовці дозволяє уникнути утворення корневих дефектів на ділянці замикання кільцевого шва.

3. Термообробка зварних швів підвищила фізико-механічні характеристик зварного з'єднання. Міцність зварного шва склала до 91% від міцності основного металу, що задовольняє вимоги до трубчастих заготовок в нашому дослідженні. Ударна в'язкість при цьому на рівні основного металу.

Актуальним є подальше вивчення процесів електронно-променевого зварювання, для

забезпечення якості зварних швів на рівні основного металу та мінімізації дефектів у зоні термічного впливу та корені шва.

Внесок авторів: огляд та аналіз останніх досліджень в області електронно-променевого зварювання титанових сплавів, постановка проблеми – **О. В. Федосов**; визначення основних способів зварювання, шляхів вирішення поставленої проблеми та аналіз результатів – **О. В. Карпович**; практичне відпрацювання та аналіз одержаних даних – **І. І. Карпович**.

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. *Strain hardening behavior of friction welded beta titanium alloy Titan 1023 used for aeronautical applications [Text] / D. B. Anant Sagar, Y. Pardhu, M. S. K. Rao, & N. Narasaiah // Materialstoday: proceedings. – 2022. – Vol. 57, Part 2. – P. 687-692. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.113.*

2. *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.*

3. *Comparison of electron-beam-welded joints manufactured by rolled and selective laser melted*

- reduced activation ferritic/martensitic steel [Text] / Z. Wang, J. Ma, Z. Liu, Z. Liu, H. Deng, Y. Su, N. Zhou, H. Zhai, & J. Wu // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol. 28. – P. 3514–3525. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.12.203.
4. Kumar, K. Effect of reducing heat input on autogenous TIG welding of Ti–6Al–4V alloy [Text] / K. Kumar, M. Masanta // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2023. – Vol. 33, iss. 12. – P. 3712–3724. DOI: 10.1016/S1003-6326(23)66365-4.
5. Vahidshad, Y. An investigation of different parameters on the penetration depth and welding width of Ti–6Al–4V alloy by plasma arc welding [Text] / Y. Vahidshad, & A. H. Khodabakhshi // *Weld World*. – 2021. – Vol. 65. – P. 485–497. DOI: 10.1007/s40194-020-01024-9.
6. Numerical simulation of rotary friction welding of Ti-6Al-4V tubes [Text] / Y. Xu, W. Chen, W. Li, & X. Yang // *Weld World*. – 2023. – Vol. 67. – P. 2671–2681. DOI: 10.1007/s40194-023-01597-1.
7. Patterson, T. Beta grain size evolution in laser-welded Ti-6Al-4V [Text] / T. Patterson, J. Lippold, & B. Panton // *Weld World*. – 2022. – Vol. 66. – P. 2231–2243. DOI: 10.1007/s40194-022-01378-2.
8. Fedosov, O. Determining the technological parameters of electron-beam welding of high-strength titanium alloys [Text] / O. Fedosov, O. Karpovych // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2023. – Vol. 5, No. 12 (125). – P. 47–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.287679.
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. Fracture toughness of electron-beam-welded parts of super-thick TC4-DT Ti alloy for aeronautical use [Text] / J. Long, L. Zhang, S. J. Na, M. Xie, & L. Zhang // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2024. – Vol. 298. – Article no. 109927. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.109927.
- 2022, vol. 57, part 2, pp. 687–692, DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.113.
2. 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.
3. Wang, Z., Ma, J., Liu, Z., Liu, Z., Deng, H., Su, Y., Zhou, N., Zhai, H., & Wu J. Comparison of electron-beam-welded joints manufactured by rolled and selective laser melted reduced activation ferritic/martensitic steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 28, pp. 3514–3525. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.12.203.
4. Kumar, K., & Masanta, M. Effect of reducing heat input on autogenous TIG welding of Ti–6Al–4V alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, vol. 33, iss. 12, pp. 3712–3724. DOI: 10.1016/S1003-6326(23)66365-4.
5. Vahidshad, Y., & Khodabakhshi, A. H. An investigation of different parameters on the penetration depth and welding width of Ti-6Al-4V alloy by plasma arc welding. *Weld World*, 2021, vol. 65, pp. 485–497. DOI: 10.1007/s40194-020-01024-9.
6. Xu, Y., Chen, W., Li, W., & Yang, X. Numerical simulation of rotary friction welding of Ti-6Al-4V tubes. *Weld World*, 2023, vol. 67, pp. 2671–2681. DOI: 10.1007/s40194-023-01597-1.
7. Patterson, T., Lippold, J., & Panton, B. Beta grain size evolution in laser-welded Ti-6Al-4V. *Weld World*, 2022, vol. 66, pp. 2231–2243. DOI: 10.1007/s40194-022-01378-2.
8. Fedosov, O., & Karpovych, O. Determining the technological parameters of electron-beam welding of high-strength titanium alloys. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023, vol. 5, no. 12 (125), pp. 47–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.287679.
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. Long, J., Zhang, L., Na, S. J., Xie, M., & Zhang, L. Fracture toughness of electron-beam-welded parts of super-thick TC4-DT Ti alloy for aeronautical use. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, vol. 298, article no. 109927. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.109927.

References

1. Anant Sagar, D. B., Pardhu, Y., Rao, M. S. K., & Narasaiah, N. Strain hardening behavior of friction welded beta titanium alloy Titan 1023 used for aeronautical applications. *Materialstoday: proceedings*,

FEATURES OF TITANIUM ALLOY MAN PIPELINES ELECTRON BEAM WELDING

Oleksii Fedosov, Olena Karpovych, Ivan Karpovych

Titanium alloys have high strength and satisfactory weldability. They are widely used in the production of aircrafts and other structural elements in the modern aerospace industry. However, due to a high requirement for aviation and rocket-space technology, increasing the reliability and durability of responsible purpose remains an urgent issue. In this study, the results of welding tubular billets with an electron beam are presented. The subject of this article is the features of tubular billets made of complex titanium alloy electron beam welding. The purpose of this work is to ensure that welds of tubular work pieces have a high level of mechanical properties, based on the welding modes experimental testing results. To achieve this goal, the following tasks were set up and solved in this work: to investigate the mechanism of pore formation in welded joints; to study the effect of electron beam welding on the properties of the weld; ensure high indicators of physical and welded joints mechanical properties. The following research results were obtained. It was possible to obtain satisfactory characteristics of the welded joint by welding in the lower position on the substrate and in the horizontal position. The use of heat treatment increases the strength of welded joints to the level of the base metal. Welded seams, regardless of the welding method, have a coarse-grained structure with liquefaction heterogeneity, which is manifested in uneven etching of the seam. Conclusions: Various metallurgical aspects of titanium electron beam welding were studied. During electron beam welding of tubular blanks, pores are formed mainly near the fusion zone and in the seam axis. Edge mechanical processing, speed reduction, work piece rotation, and welded metal remelting dramatically reduce the number of pores in seams welded in the lower position. Crater removal with a stationary work piece avoids root defect formation in the area of annular seam closure. The obtained results have scientific and practical value in the welded joints of tubular blanks mechanical properties improvement.

Keywords: electron beam welding; titanium alloys; tubular blanks; heat treatment.

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.