

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Білоус
Валерій Юрійович

УДК 621.791.053: 621.791.722

**НАУКОВІ ОСНОВИ АРГОНОДУГОВОГО
ТА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ
ПЕРСПЕКТИВНИХ ВИСОКОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ**

Спеціальність – 05.03.06

«Зварювання та споріднені процеси і технології»

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2023

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Науковий консультант: академік НАН України,
доктор технічних наук, професор,
Ахонін Сергій Володимирович
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона
НАН України, заступник директора з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, **Квасницький Віктор Вячеславович**, завідувач кафедри Зварювального виробництва Національного Технічного Університету України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»;

доктор технічних наук, професор, **Овчинников Олександр Володимирович**, заступник генерального директора по НДІ Титану при АТ «Інститут Титану»;

доктор технічних наук, **Марковський Павло Євгенович**, Інститут металофізики ім.Г.В. Курдюмова. НАН України, старший науковий співробітник, завідувач відділу фізики міцності та пластичності неізоморфних металевих матеріалів.

Захист відбудеться «18» жовтня 2023 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Електронні версії матеріалів дисертації розміщено на офіційному вебсайті Інституту: <https://paton.org.ua/zaxist-disertacij/>

Автореферат розісланий « 15 » вересня 2023 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.182.01
доктор технічних наук



Олег МАХНЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Титанові сплави мають високу питому міцність і корозійну стійкість в широкому діапазоні температур, що забезпечує високу конструкційну ефективність деталей і вузлів. Найбільший економічний ефект як в авіабудуванні, так і в суднобудуванні дає застосування титанових сплавів високої (900-1300 МПа) і надвисокої (1300-1900 МПа) міцності. У найближчі роки з високоміцних сплавів будуть виготовляти силові елементи планера, шпангоути, шасі та ін. Так в багатоцільовому винищувачі п'ятого покоління маса деталей з високоміцних сплавів титану становить 85% від маси всіх титанових деталей. Особливо ефективним є застосування таких сплавів для виготовлення кульових балонів високого тиску, паливних баків, люків, циліндричних корпусів, що знаходяться під тиском, а також бронеелементів. За кордоном багато уваги приділяється розробці економічно легованих високоміцних титанових сплавів. Ефективне застосування титанових сплавів в зварних конструкціях можливо лише за умови досягнення рівномірності зварних з'єднань. Однак саме для таких сплавів вплив термічного циклу зварювання плавленням істотно знижує міцність і пластичність з'єднання. В ряді випадків, таких наприклад, як циліндричні конструкції зі сплавів VT16, VT22 для досягнення рівномірності з'єднань основному металу необхідно робити потовщення на кромках, яке призводить до погіршення масогабаритних показників конструкцій. Значний внесок у вирішення проблем зварювання титанових сплавів внесли роботи С.М. Гуревича, В.Н. Замкова, В.Ф. Грабіна та інших. В даний час, розроблені методи і технологія зварювання високоміцних титанових сплавів, створених в 70...80-х роках 20-го століття, таких як VT16, VT20, VT22, VT23.

До перспективних високоміцних титанових сплавів відносяться сплави з високим ступенем легування – це ($\alpha+\beta$)-сплави, псевдо- β -сплави, а також високолеговані псевдо- α -сплави. Для таких сплавів міцність і пластичність зварних з'єднань низькі і залежать від співвідношення α - та β -фаз, метастабільних ω -, α' -, α'' - , β - фаз, від розмірів і розташування фазових виділень, від присутності інтерметалідних сполук, також при зварюванні таких титанових сплавів можливе утворення холодних тріщин.

Вирішення проблеми забезпечення рівномірності і високої пластичності зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів може бути реалізовано за рахунок створення наукових основ та удосконалення технологічних процесів зварювання високоміцних титанових сплавів, що дозволить в широких межах змінювати властивості металу шва і зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань. Поява нових високолегованих титанових сплавів вимагає розробки нового наукового підходу до вивчення комплексного впливу термічного циклу зварювання, ступеня легування металу шва, а також термообробки на властивості з'єднань нових сплавів.

Разом з тим, питання формування комплексу структур, особливості фазових перетворень, механізмів розміцнення та їх вплив на міцність зварних з'єднань нових високоміцних титанових сплавів вивчено ще не досить повно, що і забезпечує актуальність даної дисертаційної роботи.

Зв'язок дисертації з науковими програмами.

Робота виконана в ІЕЗ ім. Є. О. Патона за темами відомчого плану НАН України, у яких автор брав участь у якості відповідального виконавця: «Дослідження зварюваності титанових сплавів з інтерметалідним зміцненням, вивчення особливостей формування структури, фазового складу та механічних властивостей з'єднань, розробка присадкових зварювальних матеріалів» (№ ДР 0109U000982, 2009-2011 р.р.); «Дослідити вплив термічного циклу зварювання на структурно-фазові перетворення в ЗТВ та властивості зварних з'єднань сучасних складнолегованих титанових сплавів та на цій основі удосконалити процеси зварювання та відновлювального наплавлення цих сплавів» (№ ДР 0112U000625, 2012-2014 р.р.); «Дослідити закономірності процесів випаровування і теплопереносу під час електронно-променевої плавки складнолегованих псевдо- β титанових сплавів та визначити особливості формування структури, фазового складу та механічних властивостей зварних з'єднань з цих сплавів» (№ ДР 0115U003142, 2015-2017 р.р.); «Розробка технологічних основ виплавки методом електронно-променевої плавки конструкційних економнолегованих титанових сплавів та дослідження їх структури, механічних властивостей і здатності до зварювання» (№ ДР 0118U000182, 2018-2020 р.р.); «Створити новий високоміцний титановий сплав конструкційного призначення, що добре зварюється, з межею міцності не менше 1200 МПа і розробити оптимальні методи його зварювання» (№ ДР 0112U000620, 2012-2016 р.р.).

Мета роботи та задачі досліджень.

Мета роботи – розвиток наукових основ зварювання високоміцних титанових сплавів, встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів та термічного циклу зварювання на структурно-фазовий склад та механічні властивості зварних з'єднань та на цій основі розроблення технологічних процесів аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом (АДЗ) та електронно-променевого зварювання (ЕПЗ), які забезпечать рівномірність зварних з'єднань з основним металом.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні наукові та практичні завдання дослідження:

- встановити закономірності формування шва і ЗТВ, розподілу швидкостей охолодження і формування фазового складу з'єднань перспективних високоміцних титанових сплавів під впливом термічного циклу аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом;

- вивчити закономірності впливу режимів і термічного циклу аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом на властивості з'єднань високоміцних титанових сплавів;

- вивчити закономірності впливу режимів і термічного циклу зварювання на властивості з'єднань високоміцних титанових сплавів при електронно-променевому зварюванні;

- встановити закономірності впливу ступеня легування металу шва високоміцних титанових сплавів на властивості їх зварних з'єднань при аргонодуговому зварюванні вольфрамовим електродом;

- вивчити вплив термічної обробки на показники механічних властивостей зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів, виконаних електронно-променевим зварюванням та аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом;

- розробити рекомендації щодо оптимізації параметрів та режимів зварювання, що забезпечують високі механічні властивості і пластичність зварних з'єднань.

Об'єкт дослідження – зварні з'єднання високоміцних титанових ($\alpha+\beta$)-, псевдо- β -, псевдо- α -сплавів, виконані ЕПЗ і АДЗ.

Предмет дослідження – закономірності впливу термічного циклу зварювання, технологічних режимів і способів зварювання плавленням на структуру і властивості (міцність, пластичність, ударна в'язкість), закономірності зміни властивостей зварних з'єднань під впливом після зварювальної пічної термообробки.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження роботи базуються на фундаментальних положеннях зварювального матеріалознавства. У роботі використані сучасні методи і методики досліджень: оптична, просвітлююча і растрова мікроскопія, вимір мікротвердості, механічні випробування при статичному навантаженні. Механічні властивості сплавів та з'єднань визначалися у лабораторних умовах з використанням стандартних методів випробувань. Статистична обробка експериментальних даних проводилася стандартними методами обчислення. Реєстрація термічних циклів в ЗТВ при ЕПЗ та АДЗ виконувалась з використанням термопар. Розрахункове дослідження впливу термічного циклу аргонодугового зварювання на структурно-фазовий стан зварних з'єднань титанових сплавів здійснювалося за допомогою нестационарного теплового скінченно-елементного аналізу, який виконувався із застосуванням програмного комплексу ANSYS.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше для перспективних високоміцних конструкційних титанових псевдо- β -сплавів Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr (BT19), Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5.1) визначено залежність залишкової кількості β -фази від швидкості охолодження та побудовані відповідні діаграми анізотермічних перетворень $\beta \rightarrow \alpha$ і $\beta \rightarrow \alpha''$ при охолодженні.

2. Встановлено пропорційну залежність міцності з'єднань титанових конструкційних та економно-легованих псевдо- β -сплавів Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr (BT19), Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5.1) від кількості залишкової β -фази в металі шва, згідно якої збільшення кількості β -фази в металі шва з 45 до 80% призводить до зменшення межі міцності з'єднань сплаву BT19 з 960 МПа до 910 МПа, а економнолегованого сплаву Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe – з 1140 МПа до 940 МПа.

3. Вперше для титанових псевдо β -сплавів встановлено залежність межі міцності зварних з'єднань в діапазоні 860...960 МПа для сплаву Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr (BT19) та 960...1070 МПа для економнолегованого сплаву Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5.1) від сумарного вмісту легуючих елементів в металі шва. Так, зменшення вмісту легуючих елементів в шві до 11,5% для сплаву LCB-5.1 та 14,6% для сплаву BT19 призводить до збільшення міцності з'єднань за рахунок зменшення кількості залишкової β -фаз, подальше зменшення вмісту легуючих елементів призводить до зниження показників міцності з'єднань за рахунок зменшення твердорозчинної міцності металу шва сплаву LCB-5.1.

4. Вперше для кількісної оцінки впливу режиму та способу зварювання на експлуатаційні характеристики зварних з'єднань титанових сплавів запропоновано використовувати коефіцієнт якості зварного з'єднання, який розраховується як половина суми відношень межі міцності та ударної в'язкості зварного з'єднання до відповідних показників основного металу, та встановлено, що найбільші значення коефіцієнту якості забезпечує АДЗ сплаву Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr (BT19) з присадним матеріалом та ЕПЗ економнолегованого Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5,1) з попереднім підігрівом та ЛТО.

5. Отримало подальший розвиток уявлення про суттєвий вплив попереднього підігріву при електронно-променевому зварюванні та АДЗ на властивості зварних з'єднань титанового псевдо- α -сплаву Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si з силіцидним зміцненням та встановлено, що застосування попереднього підігріву з'єднань до 200 °С при ЕПЗ та 400 °С при АДЗ забезпечує формування в зварному з'єднанні структур кошикового плетіння з пластин α -фази товщиною 1-5 мкм та дисперсних зерен β -фази товщиною до 1 мкм та міцність зварних з'єднань на рівні 1160...1190 МПа при показниках ударної в'язкості 5,5...8,5 Дж/см² відповідно.

6. Отримало подальший розвиток уявлення про вплив термічної обробки на формування структури та властивостей зварних з'єднань високоміцних ($\alpha+\beta$)-та псевдо- β -титанових сплавів. Так, гартування та старіння формує в металі шва найбільш дрібнодисперсну структуру з розмірами пластин α -фази не більше 1 мкм, що забезпечує значення межі міцності з'єднань ЕПЗ сплаву Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr (BT19) на рівні 1270...1280 МПа.

Практичне значення одержаних результатів. На підставі проведених досліджень розроблено технологічний процес ЕПЗ перспективних високоміцних титанових сплавів, що включає попередній підігрів до 200°С та післязварювальний відпал 900°С протягом 10 хвилин та забезпечує рівномірність зварних з'єднань основному металу.

Розроблено технологічний процес АДЗ перспективних високоміцних титанових сплавів, що включає зварювання з погонною енергією 700...800 кДж/м, додавання 10% зварювального дроту марки BT1-00св, післязварювальний відпал, та забезпечує рівномірність зварних з'єднань основному металу.

Запропонована зміцнююча після зварювальна термічна обробка для з'єднань псевдо- β титанових сплавів, виконаних АДЗ та ЕПЗ, яка передбачає

гартування в воду з подальшим старінням і забезпечує значення межі міцності з'єднань ЕПЗ сплаву ВТ19 на рівні 1270...1280 МПа.

Розроблені рекомендації для промислового використання аргонодугового зварювання при виготовленні конструкцій з псевдо- β -титанових ВТ19 та економнолегованого Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5.1).

Результати роботи впроваджені у навчальний процес аспірантури Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України на кафедрі матеріалознавства (курс "Конструкційні сплави на основі нікелю, титану та алюмінію і їх здатність до зварювання").

Особистий внесок автора. В дисертаційній роботі постановка і обґрунтування завдання досліджень, обрання наукових підходів і методів, аналіз і узагальнення отриманих експериментальних даних, формулювання наукової новизни, висновків і рекомендацій здійснено безпосередньо автором. Наукові і практичні положення, що винесені на захист дисертаційної роботи, отримані автором самостійно або в співавторстві у відповідності до наведеного списку опублікованих наукових праць. Основні результати роботи одержано здобувачем самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковано у співавторстві, автору належить постановка завдання досліджень, аналіз і узагальнення літературних джерел та отриманих результатів, формулювання висновків. У роботах, які було опубліковано у співавторстві, здобувачем виконано наступне: у [1, 2, 3, 6-8, 11-14, 17, 18, 20, 21, 23, 25-34, 36-38, 41-45, 47-51] - ідея та обґрунтування концепції експериментів, аналіз експериментальних даних, аналіз і узагальнення літературних даних, підготовка рукописів публікацій; у [10, 20, 28, 35, 36 39, 42, 44, 47, 48] - ідея і розробка концепції математичного моделювання, перевірка адекватності моделювання, формулювання висновків, підготовка рукописів статей; у [1, 3, 5, 9, 6-8, 11-14, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 25-34, 36-38, 41-45, 51, 52, 53, 54, 55] - розробка режимів зварювання, встановлення механічних властивостей зварних з'єднань, узагальнення експериментальних даних, підготовка рукописів публікацій; у [4, 13, 20, 26, 29, 31, 33, 45] - аналіз і узагальнення впливу присадного матеріалу на властивості зварних з'єднань, підготовка рукописів статей; у [21, 22, 25, 30, 34, 50, 51] - підготовка та проведення термічних обробок зварних з'єднань, аналіз одержаних результатів, підготовка рукописів публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи представлені та обговорені на наукових конференціях і семінарах, в тому числі на: 6-й міжнародній конференції «Математичне моделювання та інформаційні технології у зварюванні та споріднених процесах», 29 травня-1 червня 2012 р. Кацивелі, Крим, Україна; на міжнародній конференції «Титан-2013 в СНГ», 26-29 травня 2013 р. Донецьк, Україна; на міжнародній конференції «Зварювання та споріднені технології – сьогоднішня та майбутня», 25-26 листопада 2013 р. Київ, Україна; 7-й міжнародній конференції «Математичне моделювання та інформаційні технології у зварюванні та споріднених процесах», 15-19 вересня 2014 р., Одеса, Україна; на VIII науково-технічній конференції молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та

споріднені технології», 20-22 травня, 2015, с.м.т. Ворзель, Київська обл., Україна; на IV міжнародній науково-практичній конференції «Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні», 2016 р. Запоріжжя, Україна; на 8-й міжнародній конференції «Математичне моделювання та інформаційні технології у зварюванні та споріднених процесах», 15-19 вересня 2016 р. Одеса, Україна; на 8-й міжнародній конференції «Променеві технології у зварюванні та обробці матеріалів», 11-15 вересня 2017 р., Одеса, Україна; на міжнародній конференції «Титан 2018: Виробництво та застосування в Україні», 2018, Київ; на 8-й міжнародній конференції «Математичне моделювання та інформаційні технології у зварюванні та споріднених процесах». 10-14 вересня 2018 р. Одеса, Україна; на IX міжнародній конференції «Променеві технології у зварюванні та обробці матеріалів», 9-13 вересня 2019 р., Одеса, Україна; на міжнародній конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів». 31 травня-2 червня 2021. м. Київ; на X міжнародній конференції «Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів». 6-10 вересня 2021. м. Одеса; на науковій конференції «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України», 17 листопада 2022. Київ, Україна.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 55 наукових праці: 1 монографія, 33 статті у наукових журналах (26 – у журналах, що входять до переліку наукових фахових видань МОН України; 7 – у виданнях, що входять до науко метричної бази даних Scopus); 17 публікацій у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій, 1 патент України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 357 найменувань на 39 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 461 сторінок, дисертаційна робота викладена на 383 сторінках друкованого тексту, у тому числі 243 рисунків, 93 таблиці, та 331 сторінка основного тексту, 4 додатка.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульована мета роботи і визначені основні завдання досліджень, описані об'єкт, предмет і методи досліджень, сформульована наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, наведені відомості про апробацію, публікації по темі дисертації із зазначенням власного внеску автора, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі обґрунтовано проблему забезпечення рівномірності і високої пластичності зварних з'єднань перспективних високоміцних титанових сплавів, які будуть використовуватися в промисловості України. Проведено детальний аналіз сучасного стану та актуальних завдань досліджень, спрямованих на створення нових підходів до оцінки впливу технологічних чинників, таких як термічний цикл зварювання, зміна хімічного складу металу шва, а також вплив післязварювальної термічної обробки спрямованих на забезпечення як рівномірності, так і якості зварних з'єднань [24, 27]. Для оцінки технологій

зварювання, що розробляються, встановлено необхідність впровадження комплексного критерію якості зварного з'єднання.

Розвиток авіаційної та ракетної техніки вимагає подальшого підвищення експлуатаційних характеристик титанових сплавів і для цього у провідних матеріалознавчих центрах світу проводяться інтенсивні роботи зі створення нових сплавів – як $\alpha+\beta$ -сплавів (сплави VT23Л, VT23К, VT43), так і сплавів перехідного класу на зразок VST5553 (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr), чи псевдо- β -сплавів VT19 [24, 34]. Новітні псевдо- β -сплави, в тому числі економнолеговані титанові сплави, мають сприятливий комплекс міцності і пластичних властивостей, що перевершує як за абсолютними значеннями, так і за питомими показниками якості α - псевдо- α , а також традиційні $\alpha+\beta$ -сплави при кімнатній температурі. Новітні псевдо- β -сплави можуть бути використані для виробництва листових штамповок та виготовлення зварних з'єднань титанових сплавів з високою міцністю. В групі ($\alpha+\beta$)-сплавів найбільшу міцність мають сплави T110, T120, VT23м, VT22. Саме ці сплави вирізняються високою чутливістю до термічного циклу зварювання [19], що призводить до ускладнення завдання отримання високоякісних зварних з'єднань титанових сплавів з міцністю на рівні 0,90-0,95 від міцності основного металу.

Несуча здатність металу шва титанових ($\alpha+\beta$)-сплавів, псевдо- β -сплавів при статичних та циклічних навантаженнях визначається їх хімічним, фазовим складом та внутрішньозеренною структурою, при цьому вплив розміру зерна литого металу шва на його механічні властивості незначний. Кількість β -фази, що збереглася в сплаві, визначається швидкістю охолодження і концентрацією легуючого елементу. При високих швидкостях охолодження перетворення $\beta \rightarrow \alpha''$ починається та завершується по мартенситному механізму, при менших швидкостях охолодження перетворення по мартенситному механізму до завершення відчуває вплив дифузійного розпаду та продуктами розпаду є структурні стани, що включають відповідно ($\alpha''+\beta$)-, ($\alpha''+\alpha'+\beta$)- и ($\alpha'+\beta$)-фази, а при низьких швидкостях охолодження виділення α -фази відбудеться суто за дифузійним механізмом [28, 36]. Таким чином швидкість охолодження при температурах $\beta \rightarrow \alpha$ перетворення є найважливішим параметром, що безпосередньо впливає на структурний стан зварних з'єднань високоміцних ($\alpha+\beta$)-сплавів, псевдо- β -титанових сплавів.

Проведений аналіз робіт [12, 20] дозволив зробити висновок, що для виконання з'єднань перспективних високоміцних титанових сплавів доцільно застосовувати такі сучасні поширені способи зварювання як АДЗ вольфрамовим електродом, що дозволяє змінювати погонну енергію зварювання, хімічний склад зварного шва, виконувати зварювання в різних положеннях, та ЕПЗ [17]. В зв'язку з відсутністю зварювальних дротів для нових $\alpha+\beta$ -сплавів та псевдо- β -сплавів доцільно дослідити вплив зміни хімічного складу на механічні властивості зварних з'єднань при АДЗ шляхом зменшення вмісту легуючих елементів в металі шва при дуговому зварюванні з використанням присадних дротів з менш легованого титанового сплаву [13]. Доцільно встановити можливість підвищення властивостей зварних з'єднань $\alpha+\beta$ -сплавів та псевдо- β -сплавів за рахунок термічної обробки, та порівняти властивості з'єднань з властивостями з'єднань, отриманих методом

електронно-променевого зварювання з застосуванням локальної електронно-променевої термообробки в вакуумній камері.

Визначено перспективи застосування та шляхи підвищення якості зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів. На підставі критичного аналізу літературних джерел сформульовані мета та задачі дослідження.

У другому розділі наведено хімічний склад та механічні властивості

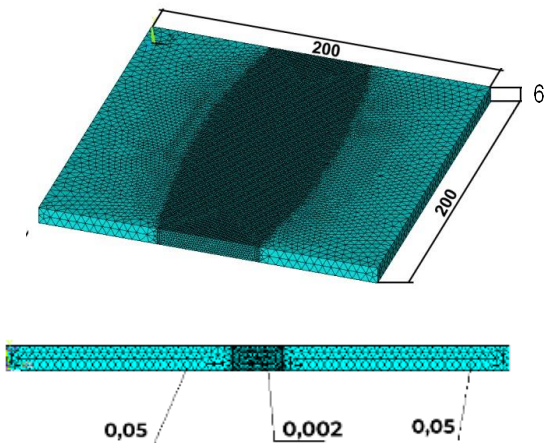


Рис.1. Кінцево-елементна модель розміром $200 \times 100 \times 6$ мм, застосована в розрахунках в програмі «ANSYS» - зверху; величина елементів сітки тривимірної моделі, мм - знизу

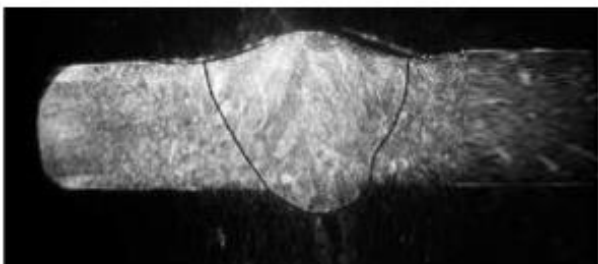
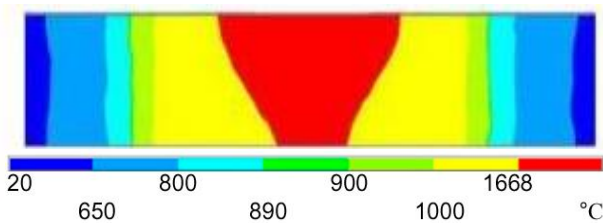


Рис.2 Результат комп'ютерного моделювання та приклад поперечного макрошліфа шва експериментального з'єднання, $I_{зв} = 310A$, $U_d = 11B$, $V_{зв} = 10$ м/год, зверху – розрахунок, знизу-експеримент

дослідних високоміцних сплавів, устаткування для АДЗ та ЕПЗ, методики визначення теплофізичних властивостей багатокомпонентних титанових сплавів. Наведено методику дослідження впливу термічного циклу аргонодугового зварювання на формування зварних швів високоміцних титанових сплавів [11, 19, 24, 27] та тривимірну модель зварного з'єднання (Рис.1). Порівняння розрахованих розмірів шва та експериментальних даних показало задовільну схожимість результатів (рис. 2). Титанові $(\alpha+\beta)$ -сплави представлені конструкційними сплавами мартенситного типу T120 (Ti-5.5Al-2.8Mo-2.3V-4Nb-1.3Cr-1Fe-2.7Zr) $\sigma_B=1146$ МПа та економно-легованим сплавом Ti-3.6Fe-0.250 $\sigma_B=1133$ МПа. Псевдо- β -сплави представлені конструкційним сплавом BT19 (Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr) $\sigma_B=958$ МПа та економно легованими Timet LCB (Ti-6.3Mo-4.4Fe-1.5Al) $\sigma_B=1187$ МПа, LCB-5.1 (Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe) $\sigma_B=1015$ МПа. Псевдо α -сплави представлені жароміцним сплавом Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si $\sigma_B=1208$ МПа. АДЗ високоміцних титанових сплавів виконували на установці ОБ1826 з застосуванням попереднього підігріву, ЕПЗ виконували на установці УЛ-144.

Розрахункове дослідження впливу термічного циклу зварювання на структурно-фазовий стан зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів здійснювалося за допомогою нестационарного теплового скінченно-елементного аналізу з урахуванням теплоти фазового переходу [10, 28, 36].

Виконувалося математичне моделювання за методом кінцевих елементів із застосуванням програмного комплексу ANSYS процесу АДЗ вольфрамовим електродом. Була побудована тривимірна математична модель теплових процесів в титані при зварюванні з рухомим джерелом нагрівання [38]. Джерело тепла рухається по лінії, для джерела тепла дійсний розподіл Гауса. Охолодження зразка відбувається за рахунок конвективного теплообміну та випромінювання. Також наведено стандартні методики дослідження структури, фазового складу і механічних характеристик зварних з'єднань титанових ($\alpha+\beta$)-сплавів, псевдо- β -сплавів, які використані в роботі. Наведено методики світлової, растрової та просвітлюючої електронної мікроскопії; рентгеноструктурного аналізу.

Третій розділ присвячено дослідженню закономірностей впливу термічного циклу аргонодугового варювання на фазовий склад зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів. Для перевірки адекватності математичної моделі аргонодугового зварювання з повним проваром псевдо- β -титанового

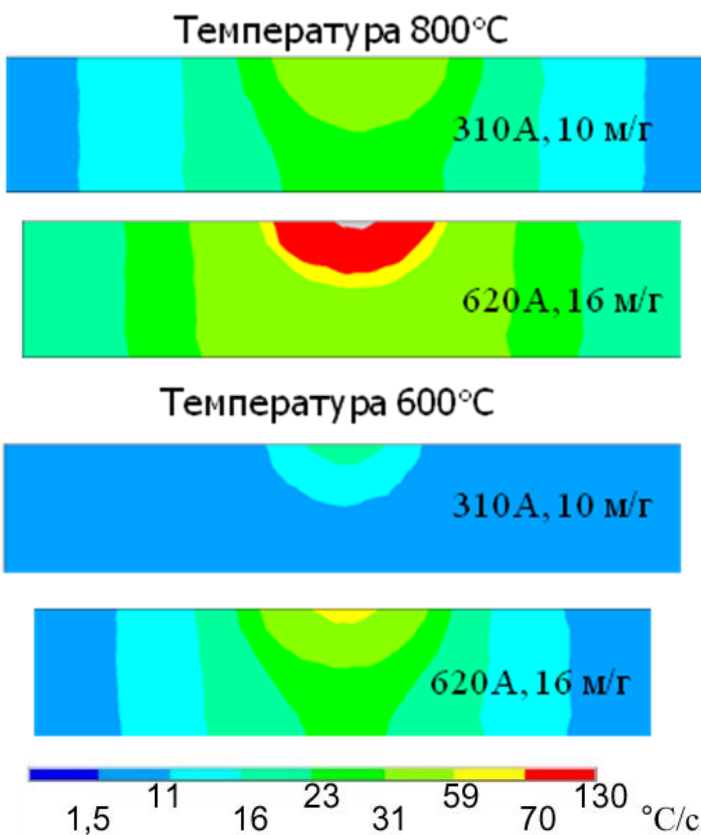


Рис.3. Розподіл швидкостей охолодження при охолодженні зварного з'єднання сплаву VT19 при температурах 800°C та 600°C, на режимах зварювання $I_{зв1}=310\text{А}$, $U_{д1}=12\text{В}$, $V_{зв1}=10\text{м/год}$; $I_{зв2}=620\text{А}$, $U_{д2}=12\text{В}$, $V_{зв2}=16\text{м/год}$

сплаву VT19 було проведено комп'ютерне моделювання [19, 44] та експериментальне аргонодугове зварювання зразка псевдо- β -титанового сплаву VT19 на режимі, який забезпечує повний провар металу товщиною 6 мм (режим зварювання: $I_{зв} = 310\text{А}$, $U = 12\text{В}$, $V_{зв} = 10\text{м/год}$). Порівняння розрахованих розмірів шва та експериментальних даних показав задовільну схожимість результатів, величина розбіжностей складала не більше 5% (див. рис.2).

Розрахунок розмірів зони проплавлення та конфігурації ЗТВ для сплаву T120 здійснювався для трьох режимів аргонодугового наплавлення на пластину товщиною 8 мм. Для псевдо- β -сплавів VT19, LCB-5.1 здійснювався розрахунок для 4-х режимів аргонодугового зварювання пластин товщиною 6

мм [28]. Розрахунки показують закономірне збільшення глибини проплавлення металу зі збільшенням струму зварювання з 240 до 350 А. Для наведених режимів було виконано розрахунки максимальних швидкостей охолодження в кожній точці зварного з'єднання (Рис.3). На схемах наведені дані для температур початку та кінця $\beta \rightarrow \alpha_n$ перетворення для досліджених сплавів. З'єднання, зварені з більшою погонною, енергією мають більшу швидкість охолодження при температурах 800С, 600°C, а застосування попереднього підігріву для сплаву LCB-5.1 дозволило знизити швидкості охолодження. На одному з режимів, для яких було проведено математичне моделювання теплових процесів АДЗ (режим зварювання $I_{зв} = 310A$, $U = 12V$, $V_{зв} = 10m/g$), було виконано зварювання експериментальних зразків псевдо- β сплавів VT19, LCB-5.1. В отриманих зварних з'єднаннях на поперечних мікрошліфах визначали структуру і кількість β -фази на різних ділянках, для яких були отримані за допомогою математичного моделювання швидкості охолодження в температурних діапазонах 800-600°C. Отримані розрахункові максимальні швидкості охолодження при температурах початку поліморфного перетворення $\beta \rightarrow \alpha$ (810°C) для псевдо- β сплавів VT19, LCB-5.1 співставили з експериментально отриманими даними про вміст β -фази, що дозволило отримати залежність кількості β -фази від швидкості охолодження при температурі початку поліморфного перетворення $\beta \rightarrow \alpha$ (рис.4).

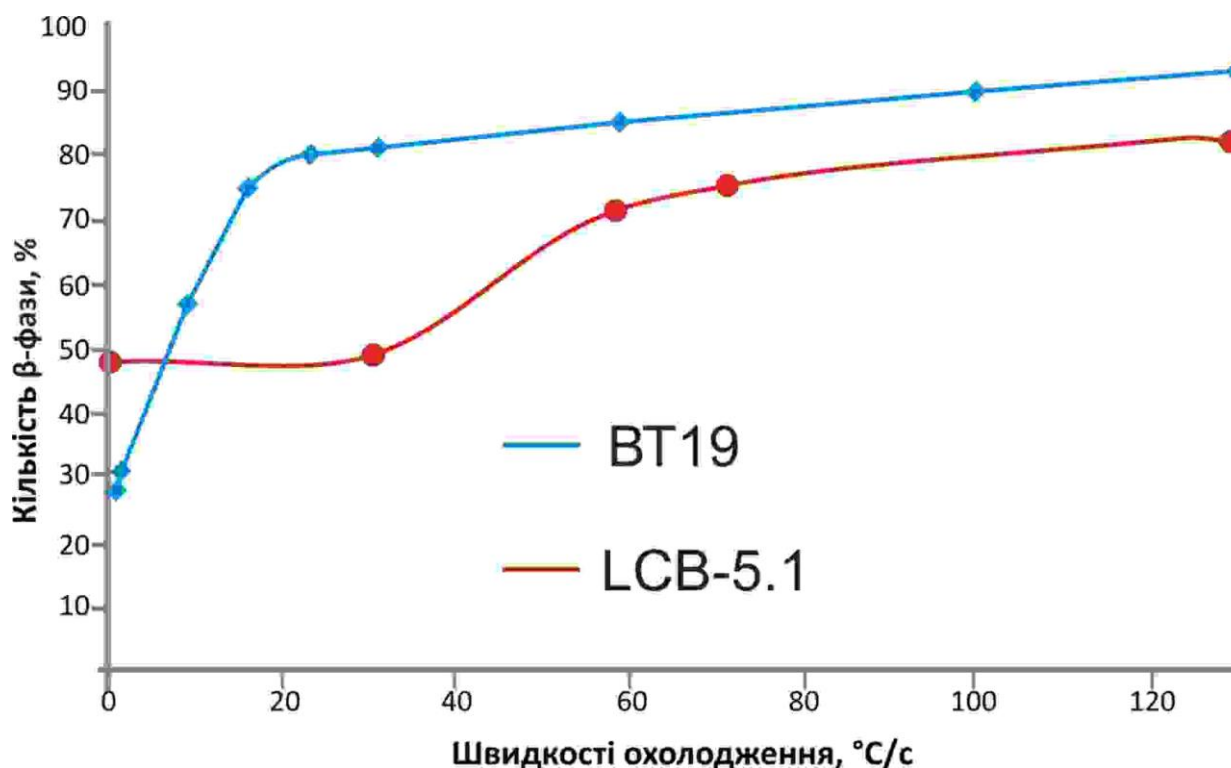


Рис. 4 – Залежність кількості β -фази від швидкостей охолодження в зварному з'єднанні псевдо- β сплавів VT19, LCB-5.1.

Для оцінки ймовірного фазового складу остигаючого металу шва і ЗТВ

використовували розрахункові діаграми анізотермічних перетворень для псевдо- β сплавів ВТ19, LCB-5.1 та $(\alpha+\beta)$ -сплаву Т120. На діаграмах позначена температура початку перетворення $\beta \rightarrow \alpha$ і температура кінця $\beta \rightarrow \alpha$ перетворення, для швидкостей 5...0,01°C/сек (рис. 5 та рис. 6) [28, 42, 44].

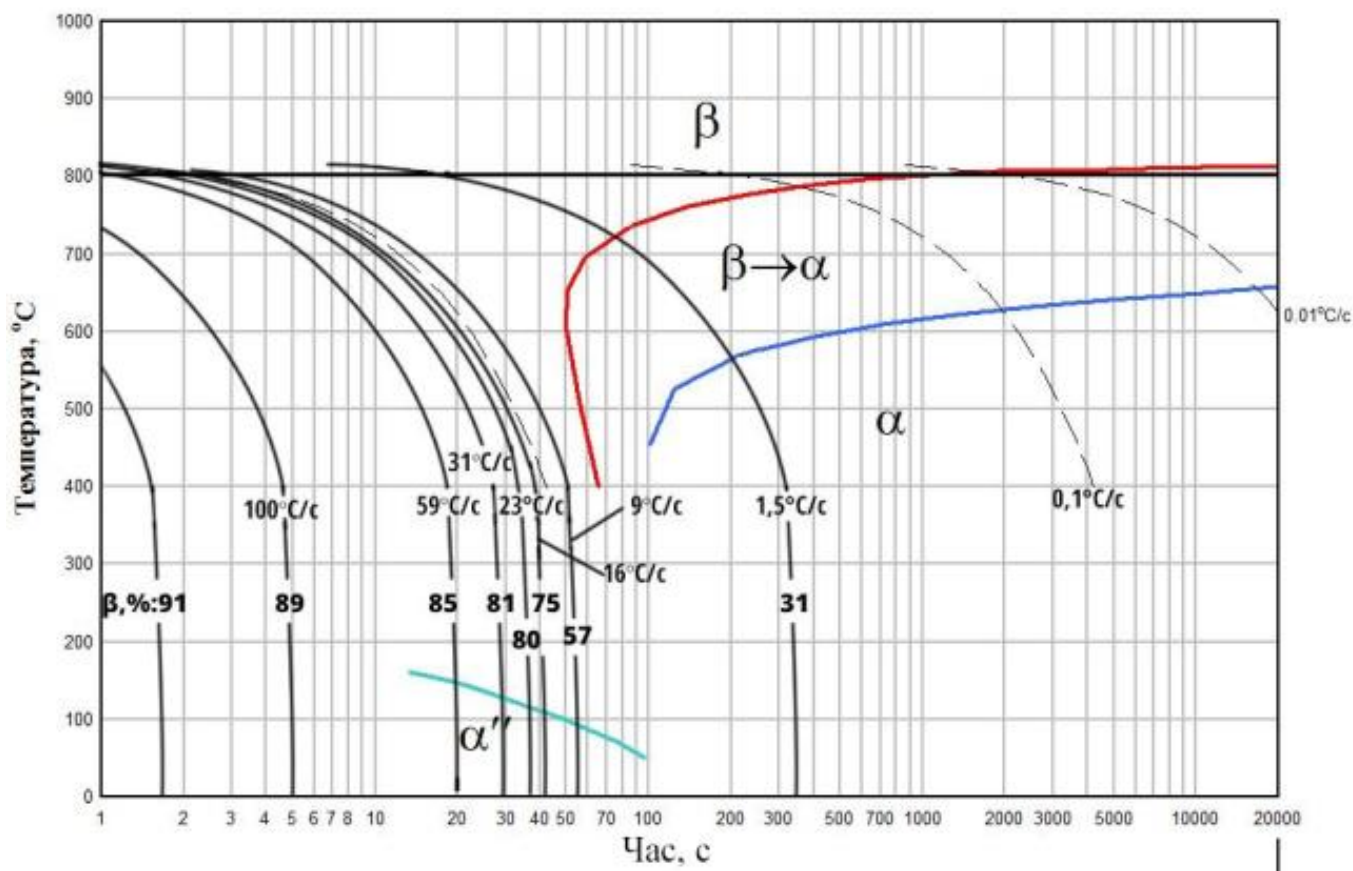


Рис 5 - Діаграма анізотермічних перетворень при охолодженні зварних з'єднань псевдо- β -титанового сплаву ВТ19

Також на діаграмах позначено можливий інтервал утворення α' - α'' -фази. Побудова діаграм анізотермічних перетворень титанових сплавів при охолодженні виконувалась методами математичного моделювання за методикою CALPHAD (Calculation of PHase Diagrams).

Таким чином, побудовані діаграми анізотермічних перетворень при охолодженні зварних з'єднань для титанових псевдо- β -сплавів ВТ19, LCB-5.1, $(\alpha+\beta)$ -сплаву Т120. Отримані діаграми разом з розробленою методикою розрахунків теплових процесів при АДЗ титанового двофазного $(\alpha+\beta)$ -сплаву Т120, титанових псевдо- β -сплавів ВТ19, LCB-5.1 дозволяють визначити розміри та форму шва та ЗТВ, в яких протікають поліморфні перетворення з утворенням метастабільних α' - та β -фаз (рис.7), миттєві швидкості охолодження при температурах початку і кінця $\beta \rightarrow \alpha_n$ та прогнозувати фазовий склад отриманих зварних з'єднань.

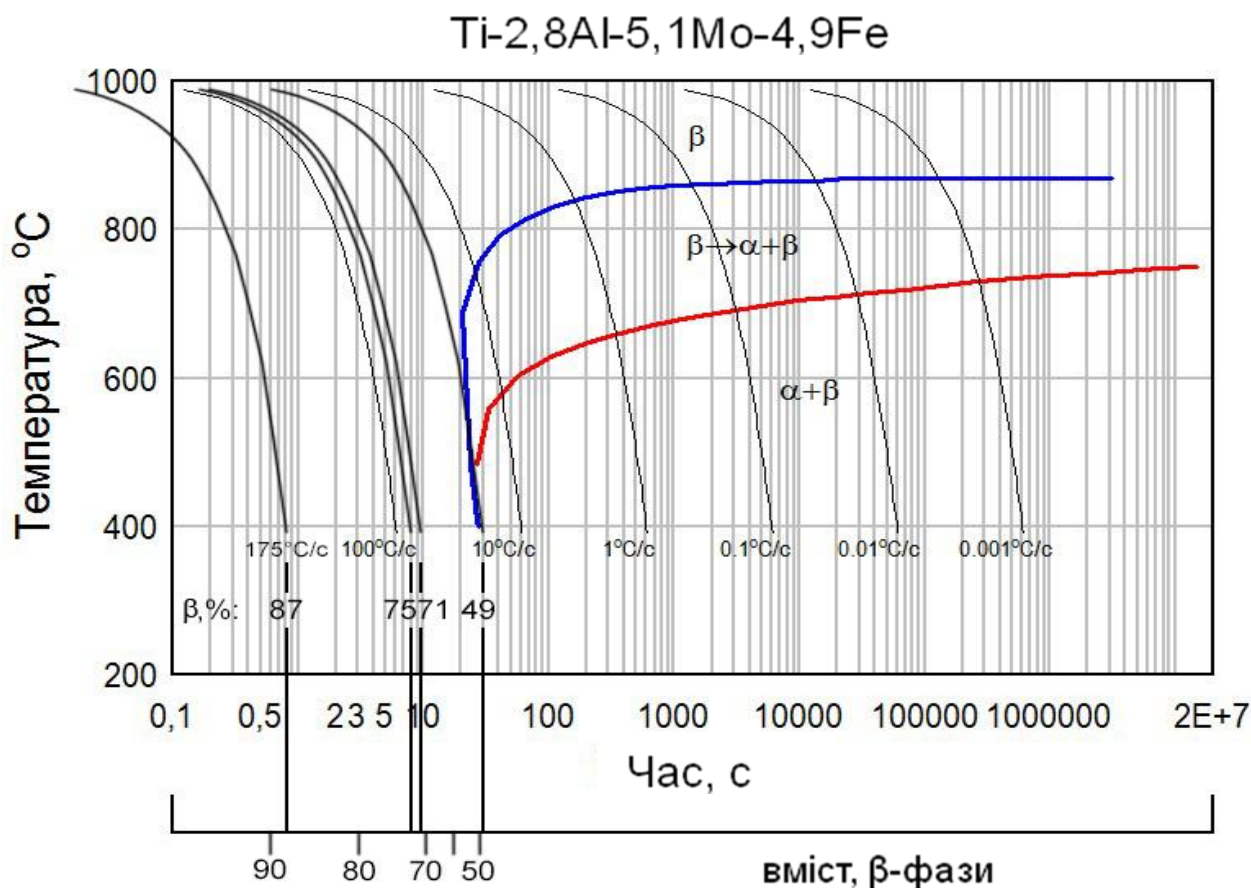


Рис 6 - Діаграма анізотермічних перетворень при охолодженні зварних з'єднань економнолегованого псевдо- β сплаву Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5.1)

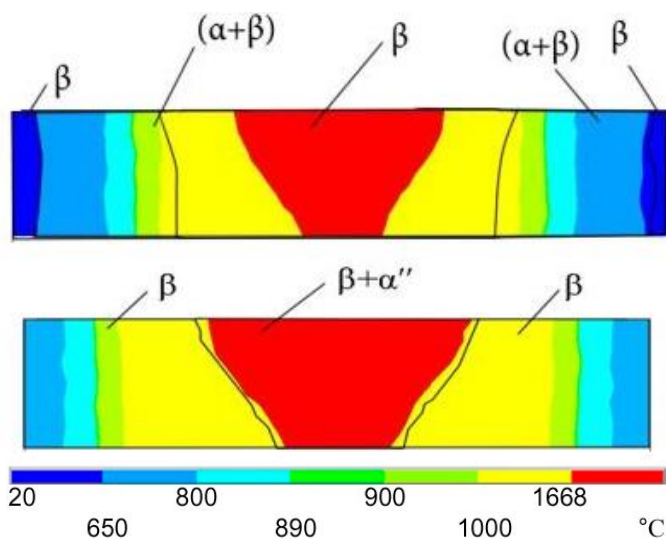


Рис.7. Результат розрахунку фазового складу зварних з'єднань псевдо- β сплаву ВТ19 на режимах $I_{зв1}=310A$, $U_{д1}=12В$, $V_{зв1}=10м/год$ - зверху; $I_{зв2}=620A$, $U_{д2}=12В$, $V_{зв2}=16м/год$ - знизу

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням впливу АДЗ з попереднім підігрівом, а також ЕПЗ з ЛТО на властивості зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів легованих кремнієм. Титанові псевдо α -сплави, що призначені для застосування при підвищених температурах, мають додаткове легування кремнієм [24, 32]. Істотним недоліком титанових псевдо- α -сплавів, легованих кремнієм, є складність їх зварювання, що обумовлено виникненням холодних тріщин в зварних з'єднаннях. Для запобігання

утворенню холодних тріщин при АДЗ експериментального жароміцного титанового псевдо- α -сплаву легованого кремнієм Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1V-0.6Si було застосовано попередній підігрів до температур 200°C та 400°C [18, 32]. Виконували АДЗ зразків загальним розміром 150×80×8 мм псевдо- α сплаву Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si на 3-х режимах з різним значенням погонної енергії: №1- Iзв1=330А, Ud1=12В Vзв1=8м/г, Tпп 200°C; №2 - Iзв2=320А, Ud2=12В, Vзв2=8 м/г, Tпп 400°C; №3 - Iзв3=400А, Ud3=12В

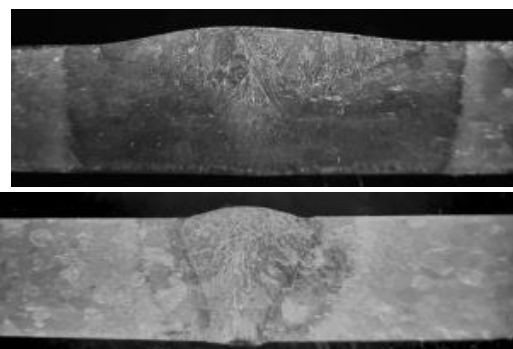


Рис.8. Поперечні макрошліфи зварних з'єднань АДЗ сплаву Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si: зверху – з підігрівом 400°C (режим №2); внизу – по флюсу з підігрівом 200°C (режим №3)

Vзв3=16м/г, Tпп 200°C. Режим зварювання №3 передбачає зварювання по шару флюсу, з використанням флюсу марки АНТ25. Застосування зварювання по флюсу для жароміцного псевдо- α титанового сплаву при зварюванні з попереднім підігрівом дозволило значно зменшити ширину шва (рис.8). Також виконувалися зварні з'єднання ЕПЗ з попереднім нагрівом до 200°C, 300°C та 400°C та ЛТО 900°C 10 хв. Проведені дослідження дозволили встановити, що для запобігання утворенню холодних тріщин при АДЗ та ЕПЗ необхідно застосування попереднього підігріву з'єднань до 200°C.

Застосування ЛТО при ЕПЗ з попереднім підігрівом 200°C дозволило забезпечити рівномірний розподілу легуючих елементів в металі з'єднання [50]. Метал швів зварних з'єднань виконаного АДЗ з попереднім підігрівом 400°C складається з витягнутих у напрямку тепловідведення первинних зерен.

Внутрішньозеренна мікроструктура металу шва відноситься до того ж типу, що і мікроструктура ОМ. Відмінність внутрішньозеренної мікроструктури металу шва полягає в розмірах α -пластин, що утворюються. Дисперсні частинки, що є силіцидом титану, в металі шва локалізуються на межах зерен і пластин. Застосування ЛТО призводить до формування в зварному з'єднанні структур кошикового плетіння з пластин α -фази товщиною 1-5 мкм та дисперсних зерен β -фази товщиною до 1 мкм.

Збільшення температури попереднього підігріву до 300°C та 400°C при ЕПЗ призводить до деякого зниження ударної в'язкості з'єднань псевдо- α сплаву (рис.9).

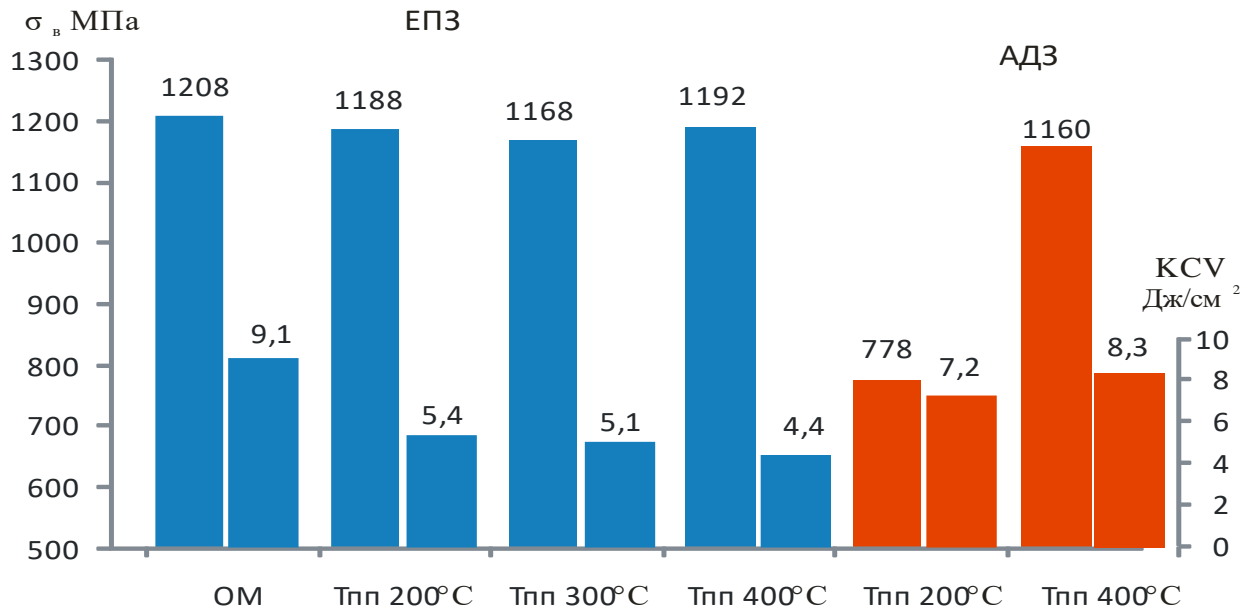


Рис. 9. Механічні властивості (σ_b та KCV) зварних з'єднань α -титанового сплаву Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si, виконаних АДЗ та ЕПЗ після 3-х видів термообробки

П'ятий розділ присвячено експериментальним дослідженням впливу ЕПЗ, АДЗ, а також післязварювальної термічної обробки на властивості високоміцних ($\alpha+\beta$)-сплавів [9, 19, 37]. Експериментально досліджувався вплив ЕПЗ та ЛТО в вакуумній камері після зварювання. Параметри режиму зварювання зразків товщиною 8 мм наступні: прискорююча напруга - 60 кВ; струм променя - 120 мА; діаметр кругової розгортки - 2 мм; швидкість зварювання - 7 мм/с. Для електронно-променевого зварювання ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120 також було застосовано ЛТО зварних з'єднань після зварювання – відпал при температурі 850°С протягом 15хв. Термічний цикл ЕПЗ призводить до росту кількості β -фази в металі швів (рис. 10). Застосування ЛТО дозволило знизити кількість β -фази майже до рівня основного металу (таблиця 1).

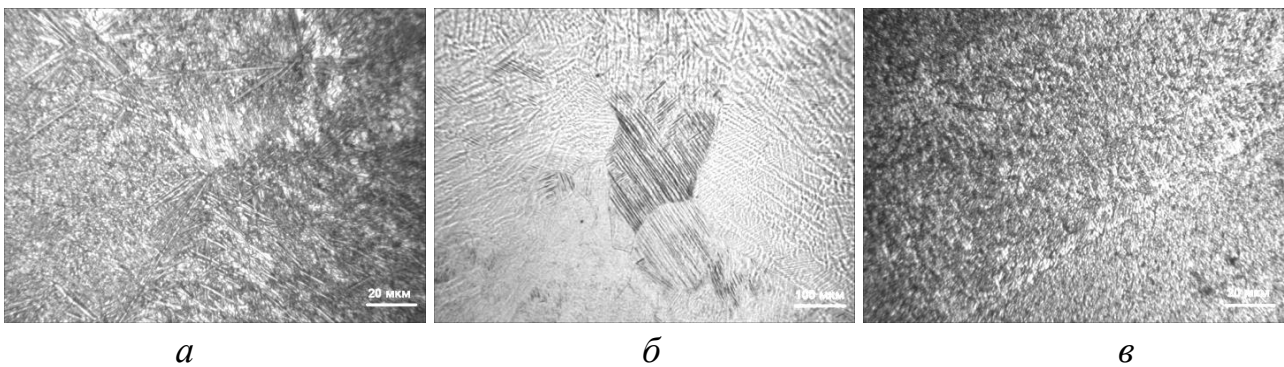


Рис. 10 – Мікроструктура зварного з'єднання титанового сплаву Т120, виконаного ЕПЗ, в стані після зварювання: *а* – основний метал; *б* – метал шва; *в* – метал шва після ЛТО 850°С. а) x500, б) x50, в) x500.

Порівняння властивостей $(\alpha+\beta)$ -сплавів Т120, Ti-3.6Fe-0.25O та Т110 дозволило зробити висновок про більш високі характеристики зварних з'єднань більш легованого сплаву Т120, який містить 6 легуючих елементів, та його більшу перспективність для отримання з'єднань з високими механічними властивостями [11, 12]. Застосування ЛТО дозволило знизити кількість β -фази в металі шва до значень основного металу (табл.1) [14]. Фрактографічні дослідження зламів ударних зразків з гострим надрізом (Шарпі) МИ50,

Таблиця 1 - Кількість β -фази в ОМ і металі шва зварних з'єднань ЕПЗ титанового сплаву Т120

Тип зразка	Кількість β -фази, %
Основний метал	46
Зварне з'єднання ЕПЗ	65
Зварне з'єднання ЕПЗ, ЛТО 850°C, 5 хв	44

виготовлених зі зварних з'єднань сплаву Т120, виконаних ЕПЗ, показали, що руйнування зламів всіх досліджуваних зразків відбувалося по крихкому механізму.

АДЗ сплаву Т120 дозволило встановити вплив як погонної енергії зварювання, так і ступеню легування металу шва на властивості складнолегованих $(\alpha+\beta)$ -сплавів [4, 12]. Досліджено властивості однопрохідних зварних з'єднань без розкриття кромки

товщиною 6 мм сплаву Т120, виконаних на 3-х режимах з різним значенням погонної енергії: №1- $I_{зв1}=380A$, $U_{д1}=12B$ $V_{зв1}=10m/год$; №2 - $I_{зв2}=360A$, $U_{д2}=11B$, $V_{зв2}=16 m/год$; №3 - $I_{зв3}=320A$, $U_{д3}=12B$ $V_{зв3}=10m/год$; (режими зварювання №2 та №3 передбачають зварювання по шару флюсу АНТ25).

Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що властивості з'єднань з малим значенням погонної енергії мають низькі показники ударної в'язкості зразків з гострим надрізом (рис.11). Властивості зварних з'єднань, виконаних за режимами №2 та №3 у стані після зварювання, знаходяться на незадовільному рівні. Застосування режимів зварювання з більшою погонною енергією (режим №1) призводить до формування структури металу шва та ЗТВ, які мають більш високі значення міцності при більших значеннях показників ударної в'язкості. Це пояснюється більш повним розпадом метастабільних фаз в металі шва та ЗТВ (табл.2), та формуванням в металі шва меншої кількості β -фази. Таким чином для обмеження ширини шва та об'єму зварювальної ванни доцільно застосовувати режими АДЗ зі значеннями погонної енергії в діапазоні 800...950 кДж/м.

Таблиця 2 - Кількість β -фази в ОМ і металі шва зварних з'єднань АДЗ сплаву Т120М

Тип зразка	Кількість β -фази, %
Основний метал	45
З'єднання АДЗ Ізв1=380А, Vзв1=10м/год	52
З'єднання АДЗ Ізв2=360А, Vзв2=16м/год	59
З'єднання АДЗ Ізв3=320А, Vзв3=10м/год	58

Досліджено властивості однопрохідних зварних з'єднань без розкриття кромки товщиною 6 мм сплаву Т120, виконаних на 2-х режимах з різною кількістю присадного металу в шві: №4- Ізв4=350А, Уд4=12В Vзв4=8м/год, Vпр4=30м/год; №5 Ізв5=350А, Уд5=12В, Vзв5=8 м/год; Vпр=60м/год. В якості присадки був обраний титановий дріт марки ВТ1-00св, що дозволяє не змінюючи систему легування зварного шва зменшити в ньому вміст легуючих елементів в залежності від режиму зварювання.

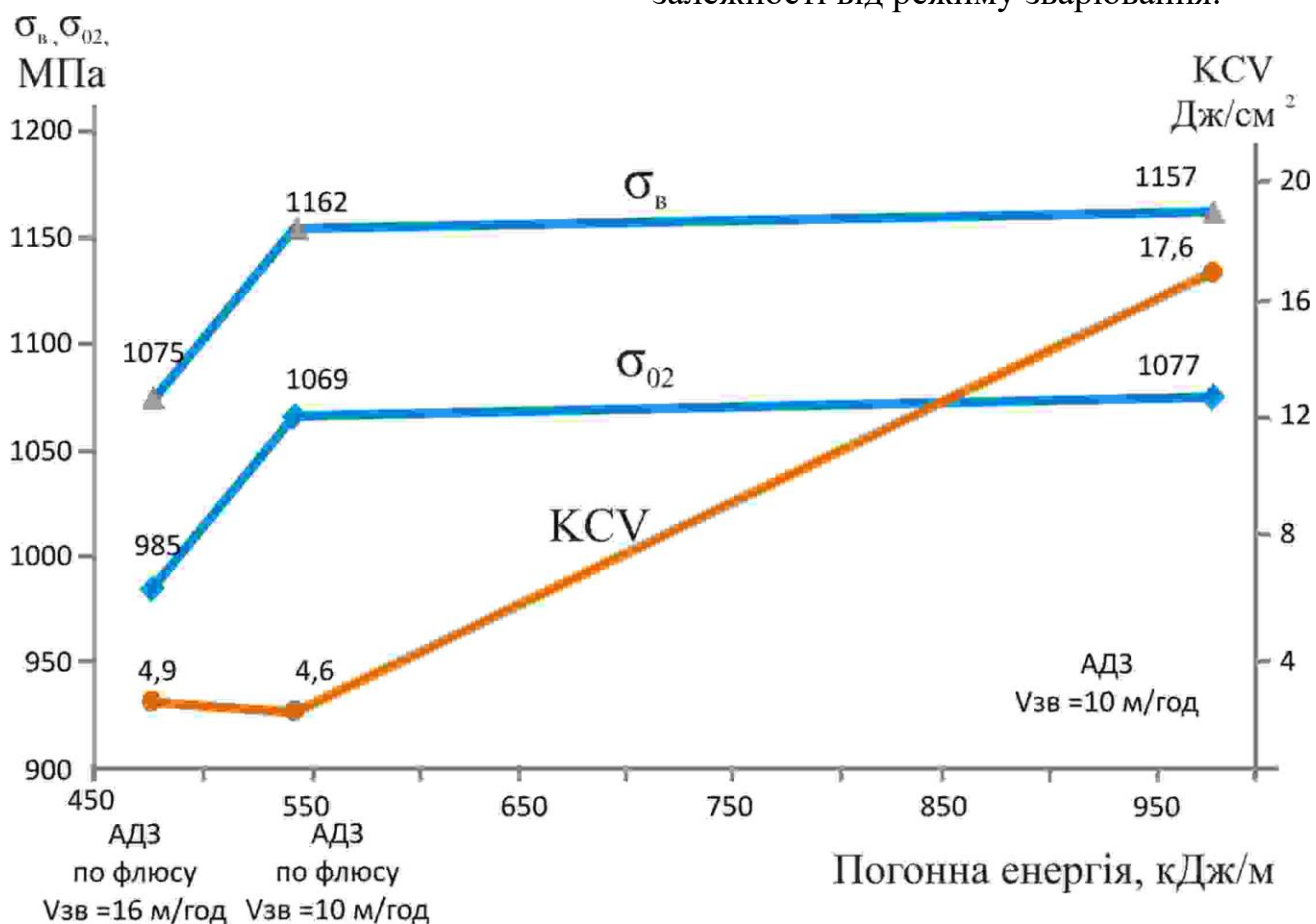


Рис. 11. Механічні властивості зварних з'єднань АДЗ ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120

Дослідження отриманих зварних з'єднань дозволило зробити висновок, що вміст присадного металу в металі зварного шва при зварювання на режимі №4 та №5 становило 10 і 20...25% відповідно [11]. Додавання менш легovanого присадного металу ВТ1-00св до металу шва призводить до зниження вмісту легуючих елементів у металі шва сплаву Т120 (табл.3). Навіть при додаванні

25% ВТ1-00св метал шва відноситься до групи двофазних ($\alpha+\beta$)-сплавів і може піддаватися зміцнювальній термообробці - загартуванню з подальшим старінням.

Таблиця 3 – Хімічний склад металу швів титанового сплаву Т120, виконаних з додаванням присадного дроту ВТ1-00св

№ режиму	Хімічний склад, % мас.								К $_{\beta}$	[Mo]екв, %
	Al	Mo	V	Nb	Cr	Fe	Zr	Ti		
ОМ	5,4	2,8	2,3	4,2	1,1	1,05	2,51		0,91	10,1
4	4,86	2,52	2,07	3,7	0,99	0,95	2,25	Основа	0,83	9,2
5	4,32	2,1	1,84	3,3	0,8	0,84	2,03		0,72	8,0

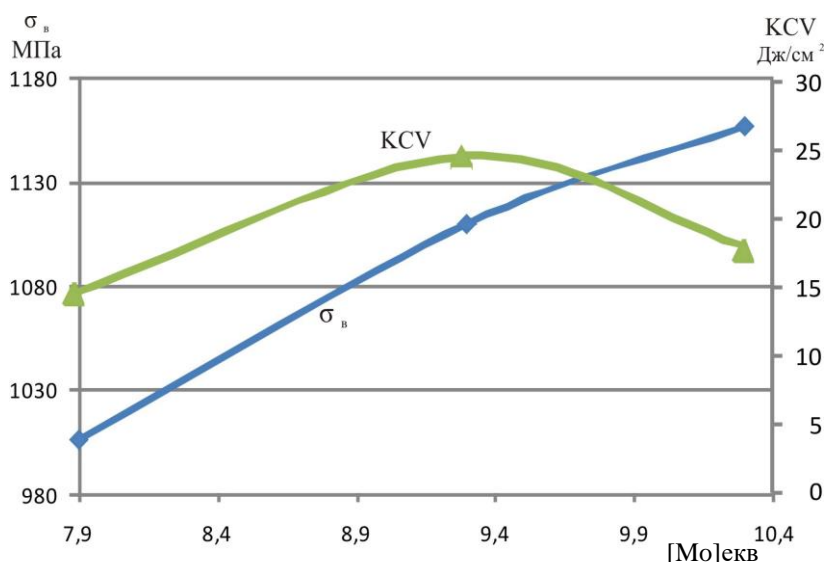


Рис. 12. Механічні властивості зварних з'єднань АДЗ ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120, виконаних з додаванням присадного дроту ВТ1-00св

Таблиця 4 - Кількість β -фази в ОМ і металі шва зварних з'єднань АДЗ сплаву Т120

Тип зразка	Кількість β -фази, %
Основний метал	45
З'єднання АДЗ Ізв4=350А, Уд4=12В, Vзв4=8м/г, Vпр4=30м/г	44
№5 Ізв5=350А, Уд5=12В, Vзв5=8 м/г; Vпр=60м/г	41

Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що застосування нелегованого присадного матеріалу дозволило зменшити кількість β -фази в металі шва зварних з'єднань в стані після зварювання практично до рівня основного металу (табл. 4).

Однак кількість присадного металу в шві сплаву Т120 доцільно обмежувати на рівні не більше 10%. Подальше збільшення вмісту присадного металу призводить до зниження міцності з'єднань нижче рівня 90% від міцності ОМ – значення міцності з'єднання при [Mo]екв металу швів 7,9 становлять менше 90% від міцності ОМ (рис 12).

Для встановлення можливостей керування властивостями зварних з'єднань сплаву Т120 післязварювальною термообробкою було досліджено вплив наступних видів термообробки [16, 19]:

ТО № 5.1 – відпал - нагрівання до температури 900°C, витримка 1 година, охолодження з піччю; ТО № 5.2 - регламентований відпал - нагрівання до 870°C, витримка 1 година, охолодження з піччю до 800°C, витримка 1 година, охолодження на повітрі; старіння при двох температурах перше старіння при 380°C - 8 годин, охолодження на повітрі, друге старіння 550°C - 2 години, охолодження на повітрі; ТО № 5.3 - загартування та старіння - нагрівання до температури 850°C, витримка 1 година, загартування у воду, старіння при 550°C, витримка 4 години, охолодження на повітрі.

Після впливу післязварювальної термообробки ТО №5.1 - відпалу мікроструктура металу швів сплаву Т120 складається з пластинчастої α -фази, яка при цьому утворює візерунок кошикового плетіння, α -фази товщиною 2...4 мкм, а також дисперсних частинок вторинної α -фази, які розташовуються в проміжках між пластинами первинної α -фази (рис.13). При цьому кількість β -фази в ОМ, металі шва, ЗТВ знаходиться на рівні 36-37%. Руйнування зразків носить змішаний характер. Злам містить 40% крихкої складової та 60% - в'язкої.

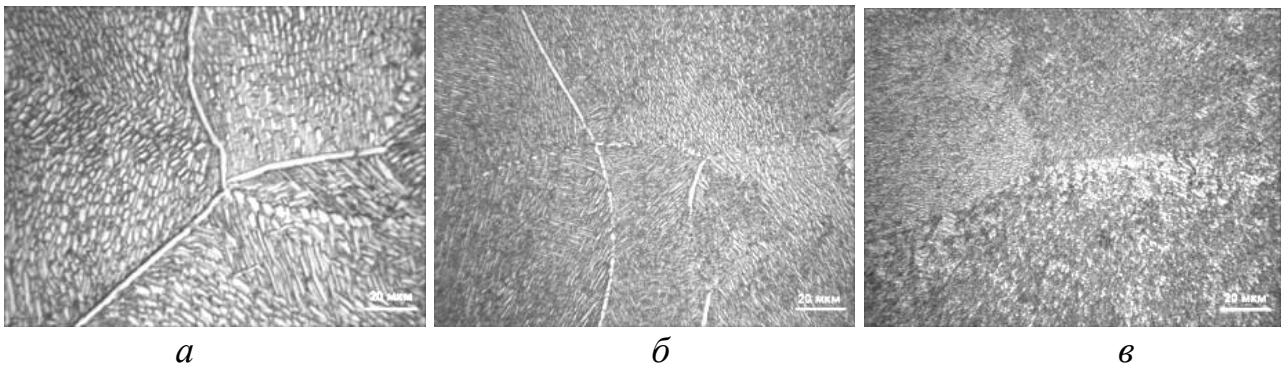


Рис. 13. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання титанового сплаву Т120, виконаного ЕПЗ, у стані після 3-х видів термообробки; *а* - №5.1; *б* – №5.2; *в* - №5.3, х500.

Після ТО №5.3 – гартування - внутрішньозерена структура складається з пластинчастої α -фази, яка при цьому утворює візерунок кошикового плетіння, а товщина пластинчастої α -фази становить 0,7...1мкм, довжина - 2...7мкм. Після ТО №5.2 - регламентованого відпалу в металі шва утворюються пластини α -фази різних розмірів: поряд з великими пластинами первинної α -фази (товщиною від 0,5 до 2 мкм і довжиною до 30мкм), в структурі присутня частково рекристалізована α -фаза, а також дисперсна суміш вторинних α - та β -фаз у проміжках між великими пластинами первинної α -фази. Цим структура металу обробленого за режимом №5.2 відрізняється від металу, термообробленого за режимом №5.3 – гартування і старіння, у якого фіксуються пластини α -фази близького розміру. Застосування ТО №5.2 - регламентованого відпалу для з'єднань, виконаних ЕПЗ і АДЗ без присадки, дозволяє отримати структуру зварного з'єднання титанового сплаву Т120, яка відрізняється великою різноманітністю параметрів структурних елементів з високими показниками ударної в'язкості.

Міцність з'єднань, виконаних без зміни хімічного складу металу шва, в результаті проведеного відпалу дещо знижується, але знаходиться на високому рівні 95% ($\sigma = 1151$ МПа) від міцності сплаву Т120 (рис.14). Зварні з'єднання титанового сплаву Т120, виконані ЕПЗ, в стані після відпалу 900°C 1 годину з наступним охолодженням з піччю, мають найбільші значення ударної в'язкості зразків з гострим надрізом ($KCV=52$ Дж/см²), а також найбільші значення показників відносного подовження і відносного звуження.

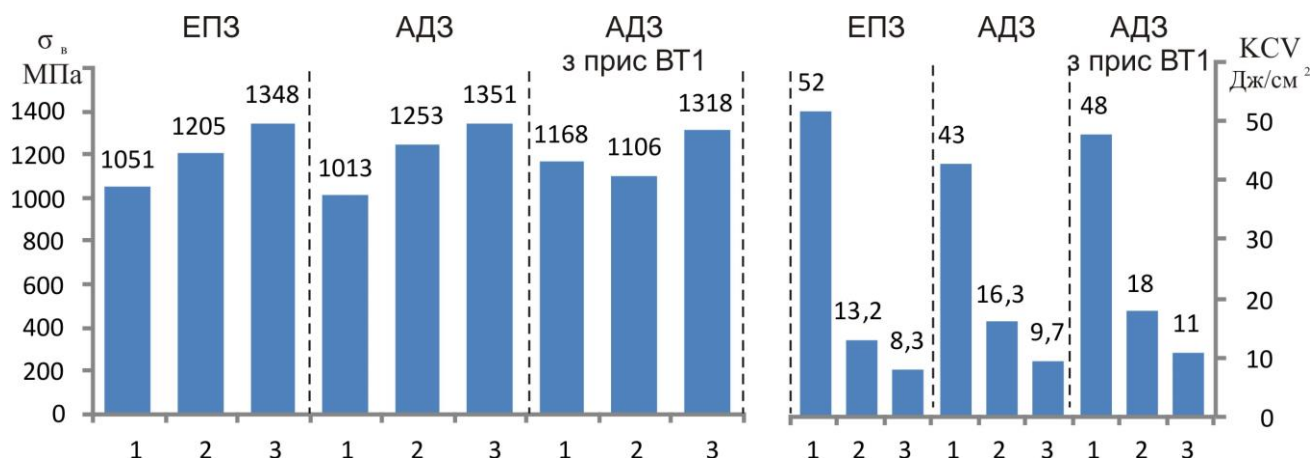


Рис. 14. Механічні властивості (σ_b та KCV) зварних з'єднань ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120, виконаних АДЗ та ЕПЗ після 3-х видів термообробки

Найбільше збільшення міцності відзначається у зварних з'єднань сплаву Т120, виконаних ЕПЗ після гарту у воду і подальшого старіння, в цьому випадку $\sigma_b=1348$ МПа. Закономірно, що застосування ступінчастого відпалу при температурах 870°C , 800°C , 380°C , 550°C забезпечило формування структури з великою різноманітністю параметрів структурних елементів та менші значення $\sigma_b=1204$ МПа.

Таким чином, застосування гартування та старіння забезпечує формування в металі зварного з'єднання ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120 однорідної структури з найменшим розміром структурних елементів.

Шостий розділ присвячено експериментальним дослідженням впливу ЕПЗ, АДЗ, а також післязварювальної термічної обробки на властивості титанових псевдо β -сплавів [20, 21]. Параметри режиму зварювання зразків сплавів ВТ19 та економно легованих Timet LCB, LCB-5.1 товщиною 10 мм наступні: прискорююча напруга - 60 кВ; струм променя - 120 мА; діаметр кругової розгортки - 2 мм; зварювання сплаву ВТ19 було проведено на швидкостях 7 та 11 мм/с. для сплавів Timet LCB та LCB-5.1 швидкість зварювання становила 7 мм/с. Для електронно-променевого зварювання псевдо- β -сплавів також було застосовано локальну термічну обробку зварних з'єднань після зварювання – відпал при температурі 750°C протягом 15хв, а для сплавів ВТ19 та LCB-5.1 також було застосовано попередній підігрів до температури 400°C [31,43, 49].

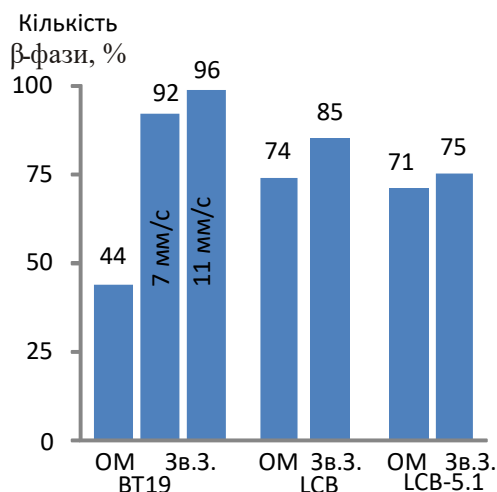


Рис. 15. Кількість β -фази в ОМ і металі шва зварних з'єднань псевдо- β -сплавів

з'єднаннях сплавів Timet LCB та LCB-5.1 кількість β -фази в стані після зварювання менша. Значення ударної в'язкості зразків з гострим надрізом найбільші в зварних з'єднаннях сплаву VT19 (рис.16,в), причому значення KCV для сплаву VT19 переважають показники для ОМ.

Найбільша кількість β -фази в стані після зварювання фіксується в металі шва зварного з'єднання, сплаву VT19 (рис.15), причому зменшення погонної енергії майже на 50% призводить до незначного збільшення кількості β -фази в шві.

Структура метала шва сплаву VT19 складається практично з чистої β -фази (Рис. 16, а) з волосоподібними межами, метал швів сплавів Timet LCB та LCB-5.1 має рівномірну однорідну структуру, що складається з β -зерен з дрібнодисперсними виділеннями в обсязі зерен і вздовж границь в сплаві.

Відповідно найменшу міцність мають зварні з'єднання сплаву VT19 (рис.16,б), а в зварних

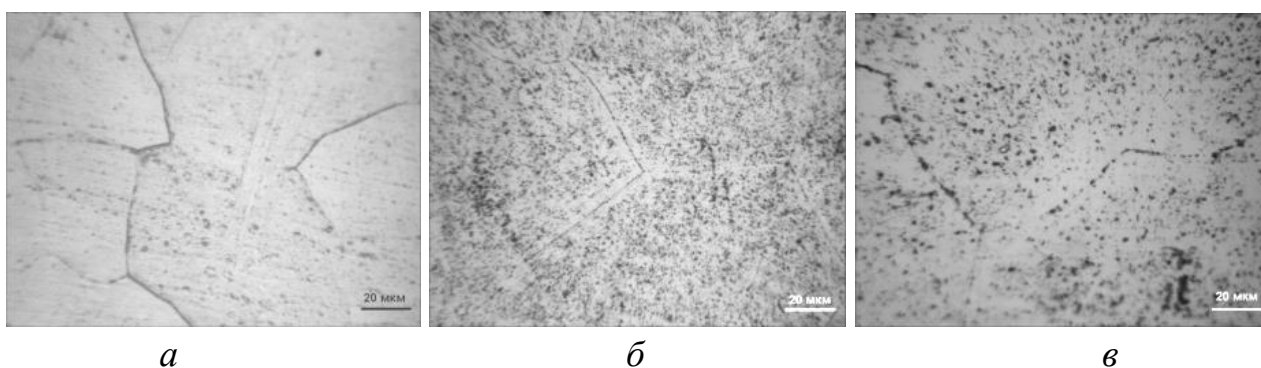


Рис. 16 – Мікроструктура метала шва зварних з'єднань псевдо- β -сплавів, виконаних ЕПЗ: а – VT19; б – Timet LCB; в – LCB-5.1. x500.

Застосування локальної термообробки і попереднього підігріву до 400°C дозволило збільшити міцність з'єднань і зменшити кількість β -фази в металі шва зварних з'єднань сплаву VT19 та LCB-5.1. Так при застосуванні попереднього підігріву до 400°C кількість β -фази в металі шва зварних з'єднань сплаву VT19 зменшується з 91% до 53%. Міцність зварних з'єднань в стані після відпалу максимальна і становить 958МПа, що складає 105...107% від міцності сплаву в стані після прокату.

Зварні з'єднання економно легованих псевдо- β сплавів Timet LCB, LCB-5.1 внаслідок високого вмісту в металі сплаву легуючих елементів, таких як залізо, та утворення інтерметалідів на основі заліза та титану схильні до утворення холодних тріщин. Слід відзначити падіння показників ударної в'язкості KCV для економно-легованого сплаву Timet LCB внаслідок впливу термічного циклу

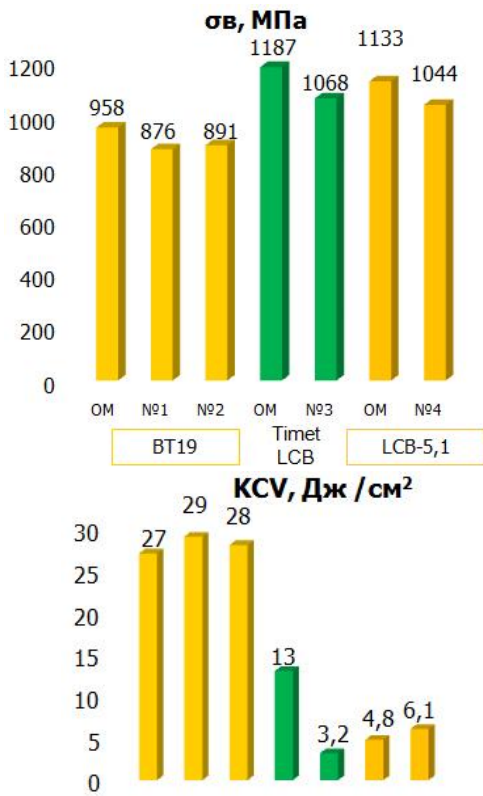


Рис. 17. Механічні властивості (σ_b та KCV) зварних з'єднань псевдо- β -сплавів BT19, Timet LCB, LCB-5.1, виконаних ЕПЗ

зварювання (рис.17). Застосування локальної термообробки і попереднього підігріву до 400°C дозволило для зварювання економічно-легованого сплаву LCB-5.1 запобігти утворенню холодних тріщин. А також знизити кількість β -фази в металі шва до 72%, забезпечити більш однорідну структуру та підвищити міцність зварних з'єднань до 997 МПа, або 98 % від міцності основного металу після прокату [49,51].

Слід зазначити, що псевдо- β -сплави BT19 та LCB-5.1 дозволяють застосовувати ЛТО при більш низьких температурах у порівнянні з високоміцними двофазними сплавами, такими як BT23, T110 або T120 [11, 12, 21, 31].

Таким чином, в результаті проведення ЛТО структура металу зварного з'єднання псевдо- β -сплавів BT19 та LCB-5.1 стала більш однорідною, вирівнявся і фазовий склад, у всіх зонах переважає $(\alpha+\beta)$ -структура з пластинчастою α -фазою довжиною 1...5 мкм і товщиною 0,5...1 мкм.

АДЗ сплавів BT19 та LCB-5.1 [20, 21, 42, 44, 47] дозволило встановити вплив як погонної енергії зварювання, так і ступеню легування металу шва на властивості зварних з'єднань псевдо- β -сплавів. Досліджено властивості однопрохідних зварних з'єднань без розкриття кромки, товщиною 6 мм. Для сплаву BT19 зварні з'єднання виконано на 5-и режимах з різним значенням погонної енергії:

№1- $I_{зв1}=310\text{A}$, $U_{д1}=12\text{В}$ $V_{зв1}=10\text{м/год}$; №2 - $I_{зв2}=240\text{A}$, $U_{д2}=11\text{В}$, $V_{зв2}=10\text{м/год}$; №3 - $I_{зв3}=220\text{A}$, $U_{д3}=11\text{В}$ $V_{зв3}=10\text{м/год}$; №4 – $I_{зв4}=340\text{A}$, $U_{д4}=11\text{В}$ $V_{зв4}=16\text{м/год}$; №5 – $I_{зв5}=320\text{A}$, $U_{д5}=11\text{В}$ $V_{зв5}=16\text{м/год}$; (режими зварювання №2, №3, №4 та №5 передбачають зварювання по флюсу АНТ25). Для сплаву LCB-5.1. зварні з'єднання виконано на 3-х режимах з різним значенням погонної енергії: №6 - $I_{зв6}=330\text{A}$, $U_{д6}=12\text{В}$ $V_{зв6}=10\text{м/год}$; №7 - $I_{зв7}=310\text{A}$, $U_{д7}=12\text{В}$ $V_{зв7}=10\text{м/год}$; №8- $I_{зв8}=240\text{A}$, $U_{д8}=11\text{В}$ $V_{зв8}=16\text{м/год}$; (режим зварювання №8, передбачає зварювання по флюсу АНТ25, режим зварювання №7 передбачає застосування попереднього підігріву до температури 400°C). В цілому підвищення погонної енергії при АДЗ до 750...800 кДж/м позитивно впливає на механічні властивості зварних з'єднань псевдо- β -сплаву BT19 (рис.18). Для обмеження ширини шва та об'єму зварювальної ванни доцільно застосовувати режими АДЗ з значеннями погонної енергії в діапазоні 700...800кДж/м.

Метал шва сплаву ВТ19 складається з рівновісних і нерівновісних зерен β -фази з тонкими межами, як і в разі ЕПЗ. Аналогічно для сплаву LCB-5.1. Кількість β -фази в стані після зварювання фіксується на меншому рівні, порівняно з ЕПЗ, в металі шва зварного з'єднання сплаву ВТ19 кількість β -фази становить 77%, для сплаву LCB-5.1 – 63...75%. Це пояснюється меншою швидкістю охолодження при АДЗ. Застосування методики зниження ступеня легування металу шва за рахунок використання нелегованого присадного дроту марки ВТ1-00св дозволило не змінюючи систему легування зварного шва зменшити вміст легуючих елементів та в більшій мірі зменшити кількість β -фази в шві.

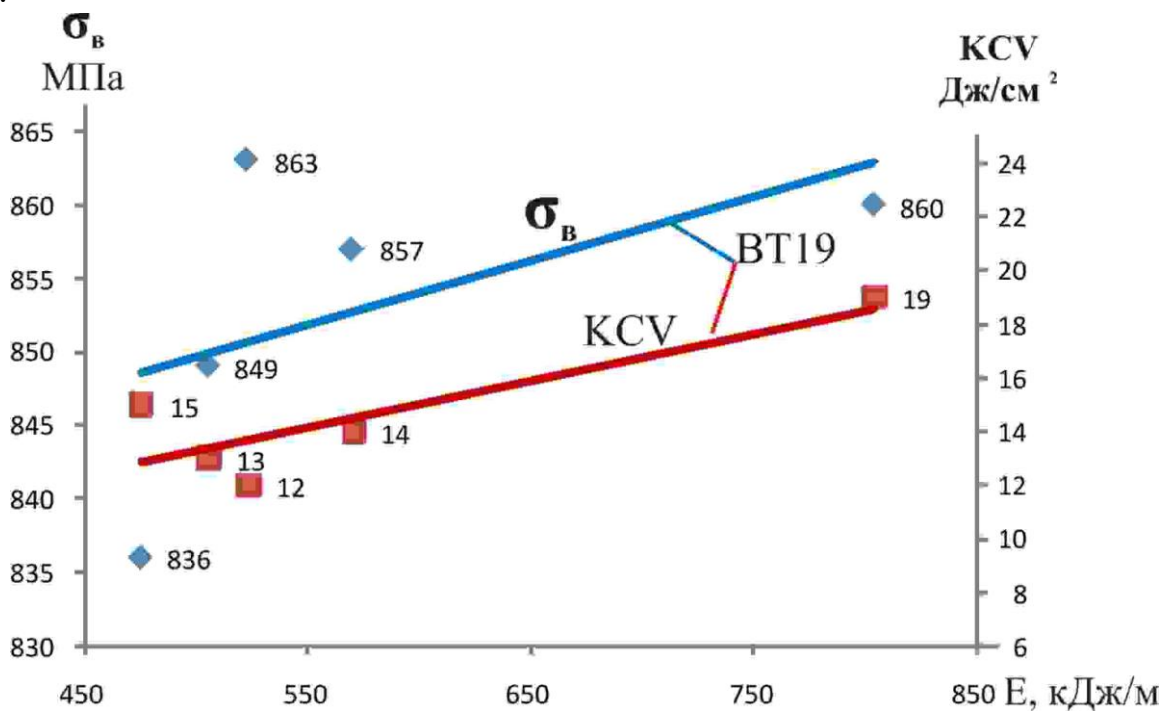


Рис. 18. Вплив погонної енергії при АДЗ на механічні властивості зварних з'єднань псевдо- β -сплаву ВТ19

З цією метою було досліджено властивості однопрохідних зварних з'єднань без розкриття кромки, товщиною 6 мм сплавів ВТ19 та LCB-5.1, виконаних на 2-х режимах з різною кількістю присадного металу в шві [26, 29, 33]. Режими АДЗ ВТ19: №9- $I_{зв9}=380A$, $U_{д9}=12B$, $V_{зв9}=8m/год$, $V_{пр9}=30m/год$; №10 $I_{зв10}=420A$, $U_{д10}=12B$, $V_{зв10}=8 m/г$; $V_{пр10}=60m/год$. Режими АДЗ LCB-5.1: №11 - $I_{зв11}=350A$, $U_{д11}=12B$, $V_{зв11}=10 m/г$; $V_{пр11}=30m/год$; ; №12 - $I_{зв12}=360A$, $U_{д12}=12B$, $V_{зв12}=8 m/год$; $V_{пр12}=60m/год$. Застосування в якості присадки титанового дроту марки ВТ1-00св дозволило не змінюючи систему легування зварного шва зменшити вміст легуючих елементів у металі шва, в залежності від режиму зварювання. Дослідження отриманих зварних з'єднань дозволило зробити висновок, що вміст присадного металу в металі зварного шва при зварюванні на режимі №4 та №5 становив 10 і 20% відповідно. Додавання менш легуваного присадного металу ВТ1-00св до металу шва призводить до

зниження вмісту легуючих елементів у металі швів (табл.5). Навіть при додаванні 20% ВТ1-00св метал шва відноситься до групи псевдо- β -сплавів і може піддаватися зміцнюючій термообробці - загартуванню та подальшому старінню, як і ОМ.

Метал шва псевдо- β -сплавів ВТ19 та LCB-5.1 складається з рівновісних і витягнутих в напрямку тепловідводу β -зерен, в обсязі яких спостерігаються дисперсні частинки розміром від менш 1 мкм до 2 мкм (рис. 19, а, б), за виключенням швів сплаву LCB-5.1 з 20 % ВТ1-00. У металі шва з'єднання LCB-5.1 з 20 % ВТ1-00 нестабільність β -твердого розчину призводить до його розпаду при охолодженні металу шва після зварювання з виділенням значної кількості α -фази (рис19, в).

Таблиця 5 – Хімічний склад металу швів псевдо- β -сплавів ВТ19 та LCB-5.1, виконаних з додаванням присадного дроту ВТ1-00св

№ режиму	Хімічний склад, % мас.						К β	[Mo]екв, %
	Al	Mo	Cr	Fe	Zr	Ti		
1, ВТ19	3,0	5,5	5,5	3,5	1	Основа	1,56	17,2
9, ВТ19	2,7	4,95	4,95	3,2	0,9		1,4	15,48
10, ВТ19	2,4	4,4	4,4	2,6	0,8		1,25	13,76
8, LCB-5.1	2,8	5,1	-	4,9	-	Основа	1,55	17,1
11, LCB-5.1	2,5	4,6	-	4,4	-		1,41	15,6
12, LCB-5.1	2,2	4,1	-	3,9	-		1,25	13,85

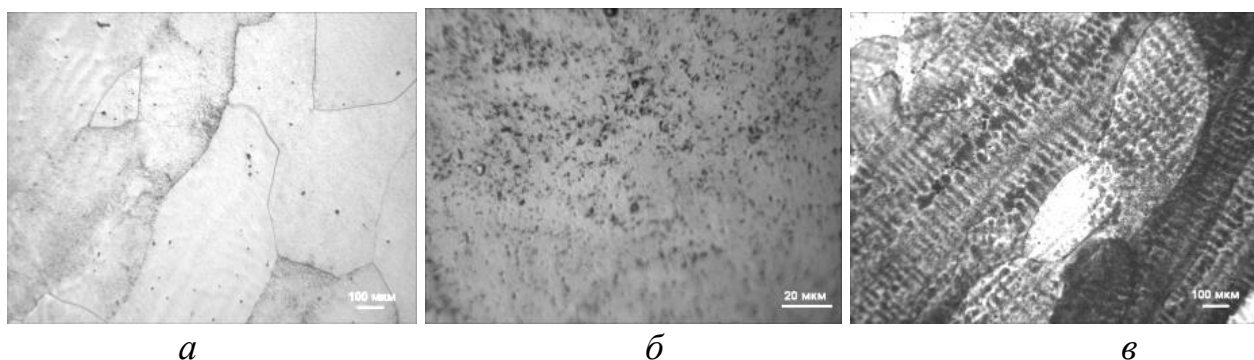


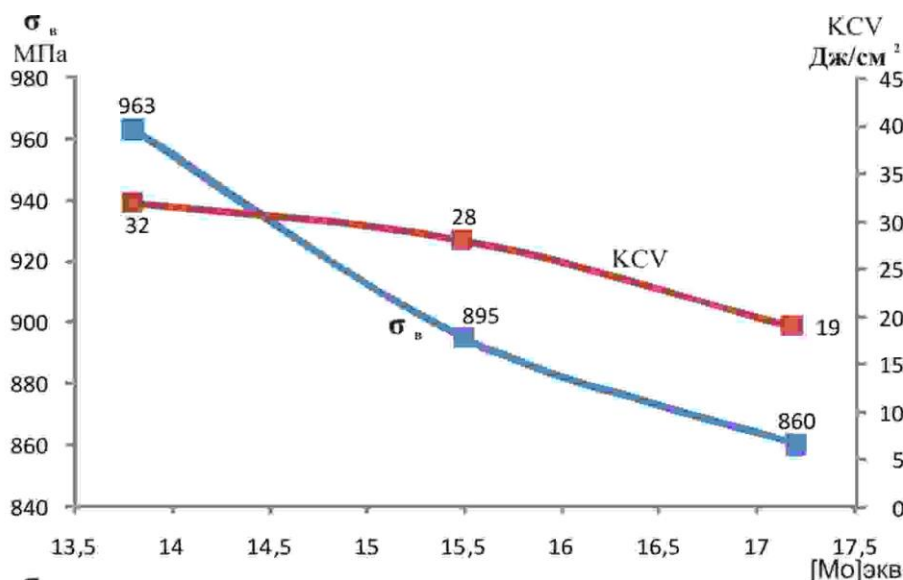
Рис. 19 – Мікроструктура металу шва зварних з'єднань псевдо- β -сплавів, виконаних АДЗ з присадним металолом ВТ1-00: а – ВТ19 режим №10; б – LCB-5.1 режим №11; в – LCB-5.1 режим №12. а) х50, б) х500, в) х50.

Кількість β -фази в металі швів сплаву ВТ19 знижується з 77% для швів без ВТ1-00 до 60% для швів з 20% ВТ1-00. Для сплаву LCB-5.1 аналогічно – з 75% для швів без ВТ1-00 до 56% для швів з 20% ВТ1-00. Для сплаву LCB-5.1 найбільшу міцність мають з'єднання з присадним дротом ВТ1-00св зварені на режимах що забезпечують вміст металу ВТ1-00 в шві на рівні 10%, для сплаву

ВТ19 на рівні 20% (рис.20). Таким чином, застосування присадного металу ВТ1-00св дозволяє знизити кількість β -фази в шві, підвищити міцність та забезпечити рівномірність зварних з'єднань основному металу.

Для встановлення можливостей керування властивостями зварних з'єднань псевдо- β -сплавів післязварювальною термообробкою було досліджено вплив наступних видів термообробки [25, 31, 34, 49].

ТО №6.1 – відпал - нагрівання до температури 750°C, витримка 1 год., охолодження з піччю;



ТО №6.2 – загартування та старіння: нагрівання до температури 750°C, витримка 1 год, загартування у воду, старіння при 450°C, витримка 4 год, охолодження на повітрі;

ТО №6.3 – уповільнене охолодження:

нагрівання до температури 750°C, витримка 1 год, охолодження 3 регламентованою швидкістю 1°C/хв.;

ТО №6.4 – регламентований відпал: нагрівання і витримка при температурі 750°C 1 годину; охолодження до 680°C, витримка 1 годину; охолодження до 380°C, витримка 8 годин, охолодження на повітрі; старіння при 450°C, витримка 4 години, охолодження

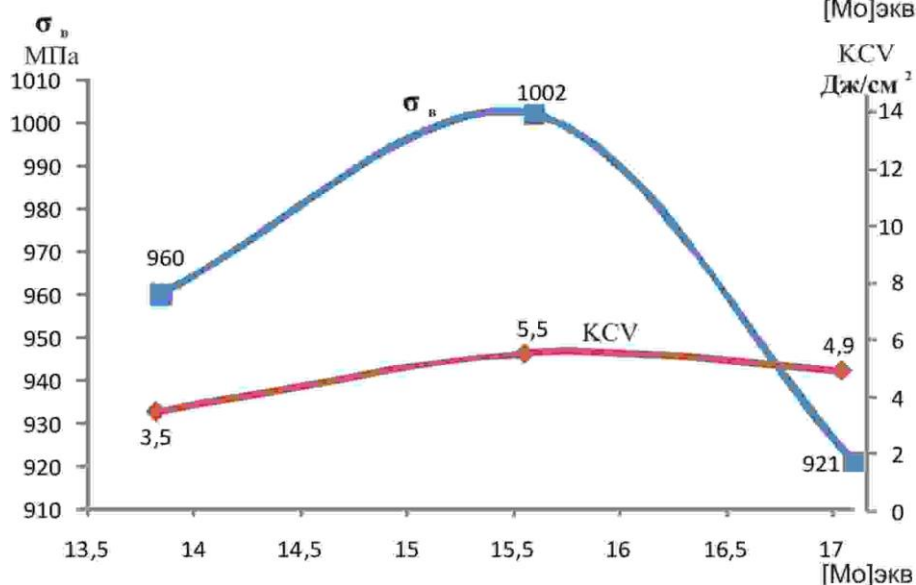


Рис. 20. Механічні властивості зварних з'єднань псевдо- β -сплавів, виконаних АДЗ з присадним металом ВТ1-00, ВТ19 – зверху, LCB-5.1- знизу

на повітрі.

Після впливу післязварювальної термообробки мікроструктура металу швів псевдо- β -сплавів складається з рівновісних витягнутих в напрямку тепловідводу первинних β -зерен, які при відпалі зазнали розпад β -фази з

утворенням рівномірної однорідної ($\alpha+\beta$)-структури з пластинчатою α -фазою різної довжини 1...5 мкм і товщини 0,5...1 мкм (Рис.21).

Після гартування та старіння – мікроструктура металу швів найбільш дрібнодисперсна, розмір продуктів розпаду найчастіше не перевищує 1 мкм (Рис.21, б). Після уповільненого охолодження з регламентованої швидкістю 1°C/хв та регламентованого відпалу в структурі металу швів фіксуються частки α -фази товщиною 1...1,5 мкм.

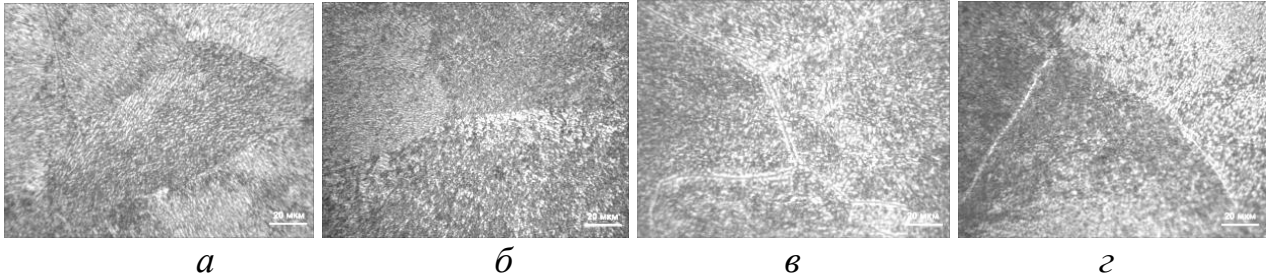


Рис. 21. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання псевдо- β -сплаву BT19, виконаного ЕПЗ, у стані після 4-х видів термообробки; а - №б.1; б - №б.2; в - №б.3; г-№б.4. x500.

Найменшу кількість β -фази зафіксовано в швах, виконаних з присадним металом BT1-00 та становить 29% для сплаву BT19 та 51% для сплаву LCB-5.1.

Дослідження мікроструктури виконаних зварних з'єднань і їх зіставлення з результатами досліджень механічних властивостей з'єднань дозволили встановити залежність міцності з'єднань псевдо- β сплаву BT19 (Рис. 22) виду:

$$\sigma_B = 1068 - 1,95 \cdot (\beta, \%), \text{ МПа:}$$

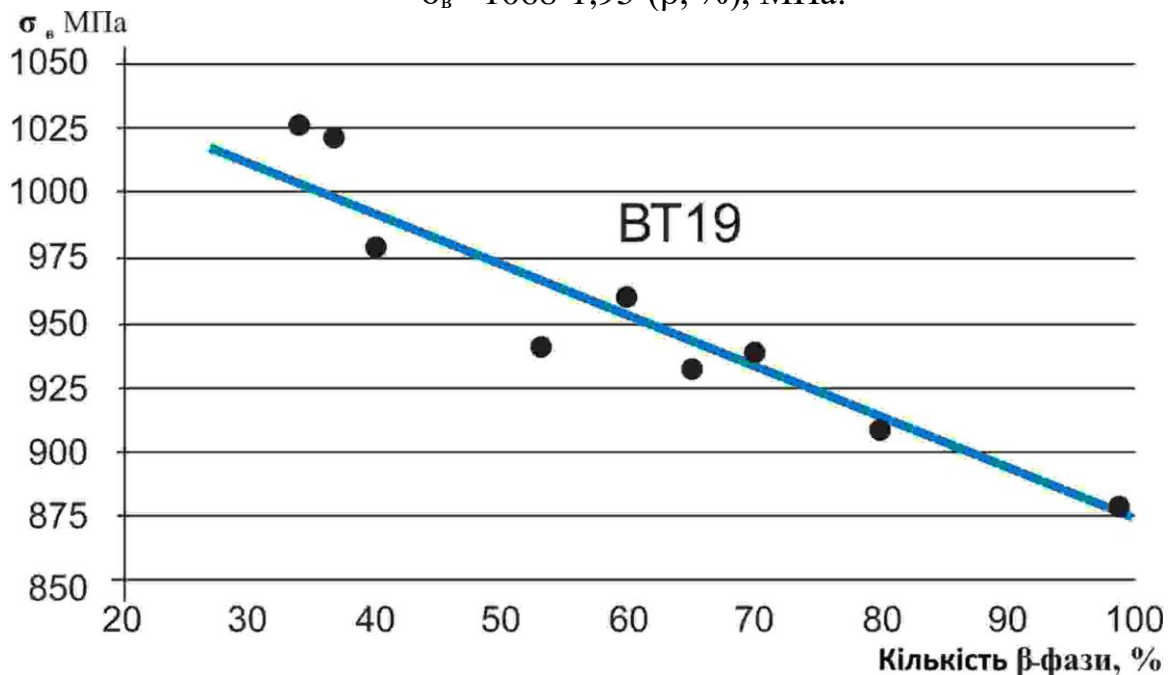


Рис. 22 - Залежність міцності з'єднань титанового псевдо- β сплаву BT19 від кількості β -фази в металі шву

Аналогічно для економнолегованого псевдо- β сплаву LCB-5.1 від кількості β -фази в металі шва (Рис. 23) виду:

$$\sigma_B = 1460 - 6,4 \cdot (\beta, \%), \text{ МПа}$$

Відповідно до цієї діаграми мінімальні значення міцності $\sigma_B = 820$ МПа зварних з'єднань фіксуються при вмісті β -фази 99,9 %, а при вмісті β -фази 35% очікувана міцність з'єднань становить $\sigma_B = 1236$ МПа.

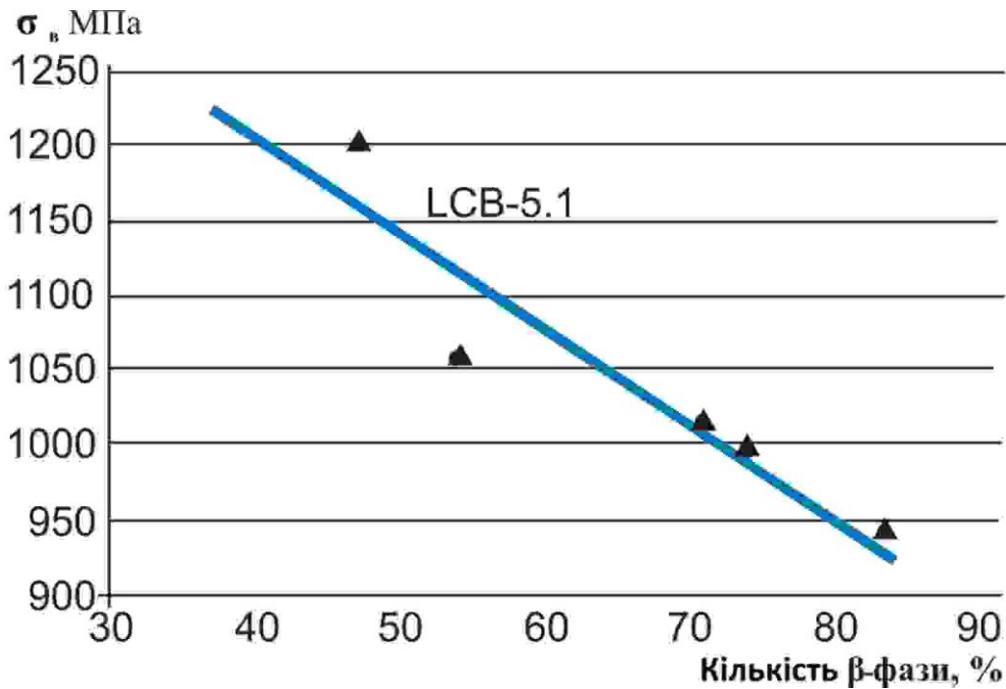


Рис. 23 - Залежність міцності з'єднань економно-легованого псевдо- β сплаву LCB-5.1 від кількості β -фази в металі шву

Сьомий розділ присвячено розробці рекомендацій зі зварювання перспективних високоміцних титанових сплавів методом ЕПЗ і АДЗ, а також розробці критерію оцінки ефективності обраного режиму зварювання та післязварювальної термообробки зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів [31, 34, 51]. Зазвичай для порівняння властивостей зварних з'єднань титанових сплавів використовують коефіцієнт міцності K_m , який представляє собою відношення межі міцності зварного з'єднання до межі міцності основного металу. З метою оцінки ефективності розробленого режиму зварювання та післязварювальної термообробки зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів було запропоновано критерій «якості режиму зварювання» в умовних одиницях, який враховував показників міцності, пластичності та ударної в'язкості зварних з'єднань титанових сплавів відносно основного металу відповідного сплаву.

В результаті проведених досліджень встановлено, що для розглянутих високоміцних титанових сплавів, зазвичай, підвищення міцності викликає відповідне зниження пластичності та показників ударної в'язкості. Але у деяких випадках це відбувається непропорційно. Показники пластичності та ударної в'язкості, як було встановлено, взаємопов'язані. Так зі збільшенням відносного

подовження металу швів збільшуються і показники ударної в'язкості. У зв'язку з цим був запропоновано коефіцієнт «якості режиму зварювання»:

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

де $K_{pзв}$ – коефіцієнт якості; $\sigma_{зв}$ – межа міцності зварного з'єднання, $\sigma_{ом}$ – межа міцності основного металу, $KCV_{зв}$ – ударна в'язкість зварного з'єднання, $KCV_{ом}$ – ударна в'язкість основного металу.

Розраховані значення критерію якості $K_{pзв}$ для АДЗ та ЕПЗ наведено в табл. 6. та в табл. 7 відповідно.

Таблиця 6. Властивості зварних з'єднань, виконаних АДЗ високоміцних титанових сплавів

Режим	σ_B МПа	δ , %	KCV, Дж /см ²	K_M	$K_{pзв}$
ОМ Т120	1146	10,7	30,6	1	-
Т120 з присадним матеріалом	1110	-	24,2	0,96	0,875
Т120 наскрізним проплавленням без присадного матеріалу	1157	-	17,6	1	0,785
ОМ ВТ19	958	7,3	27	1	-
ВТ19 з присадним матеріалом	963	7,3	28	1	1,01
ВТ19 наскрізним проплавленням без присадного матеріалу	860	13,3	19	0,89	0,795
ОМ LCB-5.1	1071	2,0	5,3	1	-
LCB-5.1 з присадним матеріалом	1002	-	5,5	0,93	0,98
LCB-5.1 наскрізним проплавленням без присадного матеріалу	972	10,0	5,7	0,9	0,985

Таблиця 7. Властивості зварних з'єднань, виконаних ЕПЗ високоміцних титанових сплавів

Режим	σ_B МПа	δ %	KCV, Дж /см ²	K_M	$K_{pзв}$
ОМ Т120	1146	10,7	30,6	1	-
ЕПЗ Т120 з ЛТО	1061	8,0	24	0,92	0,85
ОМ ВТ19	958	12	27	1	-
ЕПЗ ВТ19 з попереднім підігрівом	937	5,3	21	0,97	0,87
ОМ LCB-5.1	1015	1,9	3,6	1	-
ЕПЗ LCB-5.1 з попереднім підігрівом та ЛТО	997	6,5	5,3	0,98	1,225

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В результаті проведеної роботи для високоміцних титанових сплавів з $K_{\beta}=0,7-1,7$ запропоновано методика визначення впливу аргонодугового зварювання на формування зварного шва при зварюванні, що дозволяє визначити розміри зон, в яких протікають поліморфні перетворення з утворенням метастабільних α'' - та β -фаз, що дозволило встановити залежність залишкової кількості β - фази від швидкості охолодження та побудувати діаграми анізотермічних перетворень для псевдо- β -сплавів при охолодженні від температури плавлення до 20°C із зазначенням ліній початку та кінця анізотермічних перетворень $\beta \rightarrow \alpha$ і $\beta \rightarrow \alpha''$.

2. Вперше для титанових псевдо- β сплавів встановлено залежність межі міцності зварних з'єднань в діапазоні 860...960 МПа для сплаву Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr (BT19) та 960...1070 МПа для економнолегованого сплаву Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5.1) від сумарного вмісту легуючих елементів металу шва.

3. В результаті проведеної роботи встановлено вплив попереднього підігріву при електронно-променевому зварюванні (ЕПЗ) та аргонодуговому зварюванні (АДЗ) на структуру та властивості зварних з'єднань титанового псевдо- α -сплаву Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si з силіцидним зміцненням та встановлено, що застосування попереднього підігріву з'єднань до 200°C при ЕПЗ та 400°C при АДЗ забезпечує формування в зварному з'єднанні структур кошикового плетіння з пластин α -фази товщиною 1-5 мкм та дисперсних зерен β -фази товщиною до 1 мкм та міцність зварних з'єднань на рівні 1160...1190 МПа.

4. Показано, що попередній підігрів зварних з'єднань до температури 400°C і локальна термічна обробка (ЛТО) при ЕПЗ титанових псевдо- β -сплавів дозволяє знизити вміст β -фази в металі шва сплаву BT19 з 91% до 53% і підвищити міцність зварних з'єднань з 876 МПа до 937 МПа, а для економно легованого сплаву LCB-5.1 – знизити вміст β -фази до 72% і підвищити міцність зварних з'єднань з 960 МПа до 997 МПа і в результаті забезпечити рівномірність зварних з'єднань титанових псевдо- β -сплавів основному металу.

5. Вперше встановлено пропорційну залежність міцності з'єднань титанових псевдо- β -сплавів BT19 та економнолегованого сплаву LCB-5.1 від кількості β -фази в металі шва, $\sigma_{\beta} = 1460 - 6,4 \cdot (\beta, \%)$, МПа, згідно з якою мінімальні значення міцності $\sigma_{\beta} = 820$ МПа зварних з'єднань сплаву LCB-5.1 фіксуються при вмісті β -фази 99%, а максимальні $\sigma_{\beta} = 1236$ МПа – при вмісті β -фази 35%.

6. Встановлено залежності міцності зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів T120, BT19, LCB-5.1 від погонної енергії АДЗ та показано, що АДЗ конструкційного ($\alpha+\beta$)-сплаву T120 доцільно виконувати на режимах зі

значеннями погонної енергії в діапазоні 800...950 Дж/м, а псевдо- β -сплавів VT19 та економно легованого сплаву LCB-5.1 з значеннями погонної енергії в діапазоні 700...800 Дж/м що забезпечує формування в металі шва і ЗТВ більш однорідної структури з меншою кількістю β -фази – на рівні ОМ та забезпечує підвищення межі міцності зварних з'єднань до рівня ОМ.

7. Досліджено вплив чотирьох видів післязварювальної термічної обробки на властивості з'єднань титанових псевдо- β -сплавів, виконаних АДЗ та ЕПЗ. Найвищі значення міцності мають з'єднання піддані гартуванню в воду з подальшим старінням, при цьому в металі шва і ЗТВ формується найбільш дрібнодисперсна внутризерена структура, в якій розмір α -фази не більше 1 мкм, а міцність з'єднань ЕПЗ сплаву VT19 на рівні 1270...1280 МПа, а для з'єднань сплаву LCB-5.1 – до 1204 МПа. Пічний відпал після зварювання при 750°C дозволяє забезпечити міцність на рівні 100...115% від міцності сплаву в стані після прокату.

8. Запропоновано коефіцієнт якості для оцінки властивостей зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів. Встановлено, що найбільший коефіцієнт якості для конструкційних псевдо- β -титанових сплавів VT19 та LCB-5.1 забезпечує АДЗ з подачею менш легованого присадного матеріалу та ЕПЗ економнолегованого титанового псевдо- β -сплаву LCB-5.1, яке передбачає застосування попереднього підігріву та ЛТО.

9. На підставі проведених досліджень встановлено комплекс технологічних прийомів і параметрів ЕПЗ з ЛТО та попереднім підігрівом, АДЗ, а також режими післязварювальної термічної обробки перспективних високоміцних титанових псевдо- β -сплавів, ($\alpha+\beta$)-сплаву і дисперснозміцненого псевдо α -сплаву системи Ti-Al-Sn-Zr-Mo-V-Si, який забезпечує рівномірність зварних з'єднань основному металу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. Аргонодугове та електронно-променеве зварювання псевдо- β титанового сплаву VT19.: монографія. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2022. – 128 с. ISBN978-617-7785-49-0.

Статті проіндексовані в міжнародних наукометричних базах даних:

2. Akhonin S.V., Belous V.Yu., Berezos V.A., Selin R.V. Effect of TIG-Welding on the Structure and Mechanical Properties of the Pseudo- β Titanium Alloy VT19 Welded Joints. *Materials Science Forum*, Vol. 927, pp. 112-118, 2018 DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.927.112> (*Scopus*).

3. Akhonin S.V., Belous V.Yu., Selin R.V. Electron Beam Welding, Heat Treatment and Hardening of Beta-Titanium. IOP Conf. Series: *Materials Science and*

Engineering 582 (2019) 012050 DOI: <http://10.1088/1757-899X/582/1/012050> (*Scopus*).

4. Akhonin S.V., **Belous V.Yu.**, Selin R.V., Berezos V.O. Structure and Properties of High-Strength Titanium Alloy Ti-6.5Al-3Mo-2.5V-4Nb-1Cr-1Fe-2.5Zr Welded Joints. *Solid State Phenomena Submitted*, Vol. 313, pp 82-93 2021 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. (*Scopus*).

DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.313.82>

5. Hryhorenko, G., Akhonin, S., Berdnikova, O., **Bilous, V.**, Kushnaryova, O. Fine Structure of Heat-Resistant Titanium Alloys Welded Joints. Proceedings of the 2019 *IEEE 9th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties*, NAP 2019, 2019, 9075755. <http://10.1109/NAP47236.2019.219071>

6. Akhonin S.V., **Belous V.Yu.**, Selin R.V., Kostin V.A. Influence of TIG Welding Thermal Cycle on Temperature Distribution and Phase Transformation in Low-cost Titanium Alloy. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 688(2021), 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/688/1/012012/ (*Scopus*).

7. Akhonin S.V., **Belous V.Yu.**, Selin R. Effect of Electron Beam Welding on the Microstructure and Mechanical Properties of Low-Cost Titanium Alloys. *Materials Science Forum*, 2022, Vol. 1059, pp 15-20. <https://doi.org/10.4028/p-j08xw2/> (*Scopus*).

8. Akhonin S.V., **Belous V.Yu.**, Selin R.V. Effect of Pre-Heating and Post-Weld Local Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Low-Cost β -Titanium Alloy Welding Joints, Obtained by EBW (2022) *Defect and Diffusion Forum*, 416, pp. 87-92. DOI: 10.4028/p-o8uehr. (*Scopus*).

Статті в наукових фахових виданнях України

9. Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю., Ахонин С.В., **Белоус В.Ю.**, И.К.Петриченко, А.В.Сиора, А.Н.Палагеша, Селин Р.В. Особенности лазерно-дуговой сварки титановых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2012. №12. С.36–40. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2012/12/06>

10. Ахонин С.В., **Белоус В.Ю.**, Мужиченко А.Ф., Селин Р.В. Математическое моделирование структурных превращений в ЗТВ титанового сплава VT23 при сварке TIG. *Автоматическая сварка*. 2013. №3. С.26–29. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2013/03/05>

11. Ахонин С.В., **Белоус В.Ю.**, Антонюк С.Л., Селин Р.В. Свойства соединений высокопрочного титанового сплава T110, выполненных сваркой плавлением. *Автоматическая сварка*. 2014. №1. С.54–57. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2014/01/08>

12. Ахонин С.В., **Белоус В.Ю.**, Селин Р.В., Петриченко И.К., Вржижевский Э.Л. Структура и свойства сварных соединений высокопрочных двухфазных титановых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2015. №8. С16-19. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2015/08/03>

13. Ахонин С.В., **Белоус В.Ю.**, Петриченко И.К., Селин Р.В. Влияние присадочного материала на структуру и свойства сварных соединений высокопрочных двухфазных титановых сплавов, выполненных аргонодуговой

сваркой. *Автоматическая сварка*. 2016. №1. С. 42 –46. <https://doi.org/10.15407/as2016.01.06>

14. Ахонин С.В., Григоренко С.Г., **Белоус В.Ю.**, Таранова Т.Г., Селин Р.В., Вржижевский Э.Л. Электронно-лучевая сварка сложнолегированного высокопрочного титанового сплава. *Автоматическая сварка*. 2016. №5-6. С. 69 –73. <https://doi.org/10.15407/as2016.06.11>

15. Ахонин С. В., Вржижевский Э. Л., **Белоус В. Ю.**, Петриченко И. К. 3D электронно-лучевая наплавка титановых деталей. *Автоматическая сварка», №5-6, 2016, с. 141-144. <https://doi.org/10.15407/as2016.06.22>*

16. Grigorenko S.G., Akhonin S.V. **Belous W.Ju.**, Selin R.W. Wpływ obróbki cieplnej na strukturę i własności połączeń wysokostopowego stopu tytanu spawanych elektronowo. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2016. №5. С. 80–83.

17. Ахонин С. В., **Белоус В. Ю.**, И. Влияние флюсов на процесс АДС титана. *Автоматическая сварка*. 2017. №2. С. 8-14. <https://doi.org/10.15407/as2017.02.02>

18. Ахонин С. В., Вржижевский Э. Л., **Белоус В. Ю.**, Петриченко И. К. Влияние предварительного подогрева и локальной термообработки на структуру и свойства соединений дисперсионно-упрочненных титановых сплавов легированных кремнием, выполненных электронно-лучевой сваркой. *Автоматическая сварка*. 2017. №7. С. 53-58. <https://doi.org/10.15407/as2017.07.09>

19. Ахонин С.В., **Белоус В.Ю.**, Северин А.Ю., Березос В.А., Пикулин А.Н., Ерохин А.Г. Структура и свойства нового высокопрочного титанового сплава Т120, полученного способом ЭЛП после деформационной и термической обработки. *Современная электрометаллургия*. 2017. №2. С. 11-16. <https://doi.org/10.15407/sem2017.02.02>

20. Ахонин С. В., **Белоус В. Ю.** , Селин Р. В. Воздействие термического цикла аргонодуговой сварки на структуру и свойства псевдо-β-титановых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2018. №8. С.32-38. <https://doi.org/10.15407/as2018.08.05>

21. Ахонин С. В., **Белоус В. Ю.**, Селин Р. В., Вржижевский Э. Л., Петриченко И. К. Электронно-лучевая сварка и термообработка сварных соединений высокопрочного псевдо-β-титанового сплава ВТ19. *Автоматическая сварка*. 2018. №7. С.12-17. <https://doi.org/10.15407/as2018.07.02>

22. Swietłana G. Grigorenko, **Valerij Ju. Belous**. Wpływ spawania elektronowego i obróbki cieplnej na strukturę i własności tytanu technicznego z domieszką stopową boru. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2018. №5. С. 61–72.

23. Григоренко С.Г., **Белоус В.Ю.**, Таранова Т.Г., Вржижевский Э.Л., Костин В.А. Структура и свойства жаропрочного псевдо-α-титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Mo–V–Si и его сварных соединений. *Современная электрометаллургия*, № 2, 2019, С.27-34. <https://doi.org/10.15407/sem2019.02.05>

24. Ахонин С.В., Березос В.А., **Белоус В.Ю.** Новые перспективные сплавы на основе титана. *Современная электрометаллургия*. 2019. №3. С. 35 – 44. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.03.03> 10.

25. Ахонин С.В., **Білоус В.Ю.**, Селин Р.В., Петриченко И.К. Термічна обробка отриманого способом ЕПП високоміцного псевдо- β -титанового сплаву та його зварних з'єднань. *Современная электрометаллургия*. 2020. №1. С. 14–25. <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.02>
26. Ахонин С.В., **Білоус В.Ю.**, Селин Р.В., Петриченко И.К. Структура та механічні властивості з'єднань псевдо- β титанового сплаву при TIG зварюванні. *Автоматическая сварка*. 2020. №2. С. 11-17. <https://doi.org/10.37434/as2020.02.02>.
27. Ахонин С.В., **Білоус В.Ю.**, Березос В.О., Петриченко И.К., Селин Р.В., Северин А.Ю., Пікулін О.М.. Структура та властивості конструкційних економнолегованих сплавів на основі титану, одержаних методом ЕПП. *Сучасна електрометалургія*. 2020. №4. С. 18-22. DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/sem2020.02.03>.
28. Ахонин С.В., **Білоус В.Ю.**, Селин Р.В., Костін В.А. Структурні перетворення при охолодженні економнолегованого псевдо- β -титанового сплаву Ti–2.8Al–5.1Mo–4.9Fe. *Сучасна електрометалургія*. 2021. №1. С. 17-26. <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.02>
29. Ахонин С.В., **Білоус В.Ю.**, Селин Р.В., Петриченко И.К., Радченко Л.М. Аргонодугове зварювання високоміцного економнолегованого псевдо- β -титанового сплаву Ti–2.8Al–5.1Mo–4.9Fe. «Автоматичне зварювання», № 5, 2021, С. 34-39. <https://doi.org/10.37434/as2021.05.05>
30. Григоренко С.Г., Таранова Т.Г. Костін В.А., Соломійчук Т.Г., **Білоус В.Ю.**, Вржижевський Е.Л. Вплив термічної обробки на структуру та характер руйнування зварних з'єднань економно легованого титанового сплаву. *Сучасна електрометалургія*, № 3, 2021, С 42-48. <https://doi.org/10.37434/sem2021.03.07>
31. Ахонин С.В., **Білоус В.Ю.**, Селин Р.В., Вржижевський Э.Л., Петриченко И.К., Антонюк С.Л. Вплив термічної обробки на структуру та властивості зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів на основі β -фази. *Сучасна електрометалургія*. № 4, 2021, С. 51-58. <https://doi.org/10.37434/sem2021.03.07>
32. Ахонин С.В., **Білоус В.Ю.**, Селин Р.В., Петриченко И.К., Радченко Л.М., Руханський С.Б. Аргонодугове зварювання жароміцного титанового сплаву легованого кремнієм. *Автоматичне зварювання*. 2022. №5. С. 33–39. <http://doi.org/10.37434/as2022.05.05>
33. Ахонин С.В., **Білоус В.Ю.**, Селин Р.В., Петриченко И.К., Радченко Л.М., Руханський С.Б. Вплив присадного матеріалу на структуру та властивості зварних з'єднань високоміцного титанового сплаву VT19. *Сучасна електрометалургія*. 2022. №3. С. 53-62. <http://doi.org/10.37434/sem2022.03.08>
34. Ахонин С.В., **Білоус В.Ю.**, Костін В.А., Григоренко С.Г., Пузрін О.Л., Вржижевський Е.Л. Підвищення механічних властивостей зварних з'єднань економно легованого титанового сплаву Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe термічною обробкою. *Автоматичне зварювання*. 2022. №12. С. 38-44. <http://doi.org/10.37434/as2022.12.05>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

35. Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Мужиченко А.Ф., Селин Р.В. Исследование влияния термического цикла сварки на структурные превращения в зоне термического влияния титанового сплава VT23 методами математического моделирования. Сб. тр. Шестой межд. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». 29 мая-1 июня 2012г. Кацивели, Крым, Украина. С. 13–16.
36. Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Петриченко И.К., Селин Р.В., Антонюк С.Л. Фазовые превращения при охлаждении в металле шва и зоне термического влияния при сварке вольфрамовым электродом двухфазных титановых сплавов. Сборник трудов Межд. конф. «Титан-2013 в СНГ». Донецк, Украина, 26-29 мая 2013г. С.324-328.
37. Белоус В.Ю., Ахонин С.В., Селин Р.В., Антонюк С.Л. Сварка высокопрочного титанового сплава T110. Сборник тезисов стендовых докладов международной конференции «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее». – Украина, Киев, 25-26 ноября 2013. С. 59-60.
38. Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В., Григоренко С.Г. Математическое моделирование влияния термического цикла аргонодуговой сварки с поперечными колебаниями на структурные превращения в зоне термического влияния двухфазного титанового сплава. Сб. тр. Седьмой межд. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». 15-19 сентября 2014г. Одесса, Украина. С. 5-7.
39. Селин Р.В., Белоус В.Ю. Оценка влияния термического цикла сварки вольфрамовым электродом по флюсу на фазовые превращения в металле шва и зоне термического влияния сложнолегированного титанового сплава VT23. Материалы VIII научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Сварка и родственные технологии», 20-22 мая, 2015, смт Ворзель, Киевская область, Украина С.247.
40. Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Вржижевский Э.Л., Петриченко И.К. Электронно-лучевая 3-d наплавка с применением сварочной титановой проволоки. Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції «Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні» Запоріжжя 2016 р. 152с., С.11-12.
41. Akhonin S.V., Belous V., Selin R. Effect evaluation of the flux coated gas tungsten arc welding thermal cycle on phase transformation in the weld metal and heat affected zone of ($\alpha+\beta$) titanium alloy VT23 using mathematical modeling. *Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій* –К.: ТОВ «НВП Інтерсервіс», 2016. С. 327-335.
42. Белоус В.Ю., Костин В.А., Григоренко С.Г., Селин Р.В. Влияние режима дуговой сварки на фазовый состав сварных соединений высокопрочного титанового сплава системы Ti-6.5Al-3Mo-2.5V-4Nb-1Cr-1Fe-2.5Zr. Сб. тр. Восьмой межд. конф. «Математическое моделирование и информационные

технологии в сварке и родственных процессах». 15-19 сентября 2016 г. Одесса, Украина. С. 5-7.

43. Ахонин С.В., **Белоус В.Ю.**, Селин Р.В., Вржижевский Э.Л. Влияние электронно-лучевой сварки и локальной термической обработки на свойства сварных соединений высокопрочного псевдо β -титанового сплава ВТ19. Сб. трудов восьмой международной конференции «*Лучевые технологии в сварке и обработке материалов*», 11-15 сентября 2017 г., Одесса, Украина. Киев: Международная Ассоциация «Сварка», с.7-10.

44. Ахонин С. В., **Белоус В. Ю.**, Селин Р. В., Воздействие термического цикла аргонодуговой сварки на структуру и свойства псевдо- β -титановых сплавов. *Титан 2018: Производство и применение в Украине*: Тез.докл. Межд.конф. Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2018, с. 37.

45. Ахонин С. В., **Белоус В. Ю.**, Селин Р. В., Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом высокопрочного псевдо- β -титанового сплава ВТ19. *Титан 2018: Производство и применение в Украине*: Тез.докл. Межд. конф. Киев: Между-народная ассоциация «Сварка», 2018, с. 37.

46. Ахонин С. В., Березос В.А., Белоус В. Ю. Разработка новых сплавов и технологии их получения методом электронно-лучевой плавки. *Титан 2018: Производство и применение в Украине*: Тез.докл. Межд. конф./Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2018, с. 38.

47. Ахонин С.В., **Белоус В.Ю.**, Селин Р.В. Влияние предварительного подогрева на термический цикл аргоно-дуговой сварки экономно легированных титановых сплавов. Сб. тр. Восьмой межд. конф. «*Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах*». 10-14 сентября 2018г. Одесса, Украина. С. 23-27.

48. **Белоус В.Ю.**, Костин В.К., Селин Р.В., Григоренко С.Г. Влияние режима дуговой сварки на формирование метастабильных фаз в металле шва и ЗТВ высокопрочного псевдо β -титанового сплава ВТ19. Сб. тр. Восьмой межд. конф. «*Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах*». 10-14 сентября 2018г. Одесса, Украина. С. 28-30.

49. Ахонин С.В., **Белоус В.Ю.**, Селин Р.В., Вржижевский Э.Л., Петриченко И.К. Сварка и термообработка псевдо β -титановых сплавов. *Зварювання та споріднені технології сьогодення і майбутнє*: Тези стенд. доп. /Міжнародна Асоціація «Зварювання». – Київ, 2018. – 136 с. С.23.

50. Akhonin S., Hryhorenko G., Berdnikova O., Hryhorenko S., **Bilous V.**, Kushnarova O. Fine structure of heat-resistant titanium alloys welded joints. Proc. of the 2019 IEEE 9th Int. Conf. on Nanomaterials: *Applications & Properties (NAP-2019)*. Part 1. Odessa, Ukraine, September 15-20, 2019. Sumy, Sumy State University. 2019. Pp.1-5.

51. Ахонин С.В., **Белоус В.Ю.**, Селин Р.В., Вржижевский Э.Л., Петриченко И.К. ЭЛС и локальная термообработка экономно легированных титановых сплавов на основе β -фазы. Сб. трудов IX межд. конф. «*Лучевые технологии в сварке и обработке материалов*», 9-13 сентября 2019 г., Одесса, Украина. -Киев: Межд. Ассоциация «Сварка», 2019. С. 12-15.

52. Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В., Петриченко І.В., Радченко Л.М. Аргонодугове зварювання високоміцного економно-легованого псевдо β - сплаву Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe. Тези доповідей міжнародної конференції . «Сучасні технології з'єднання матеріалів». 31 травня-2 червня 2021. м.Київ. – Київ: Міжн. Асоціація «Зварювання», 2021. –С.18.

53. Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В., Вржижевський Е.Л., Петриченко І.В., Максимов С.Ю. Электронно-лучевая сварка и упрочняющая термообработка высокопрочных титановых сплавов на основе β -фазы. Збірка тез доповідей X Міжн. Конф. «Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів». 6-10 вересня 2021. м. Одеса. – Київ: Міжн. Асоціація «Зварювання», 2021. – С.12.

54. Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. Вплив попереднього підігріву на термічний цикл аргоно-дугового зварювання жароміцних титанових сплавів нового покоління. Збірка тез допов. наук. конф. «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України», 17 листопада 2022 р., м. Київ, Україна. -Київ: Міжн. Асоціація «Зварювання», 2022. С. 26.

Патенти

55. Ахонін С.В. Березос В.О., Білоус В.Ю., Пікулин О.М., Петриченко І.К., Селін Р.В., Єрохін О.Г. Високоміцний титановий сплав. Патент України 111002 С22С 14/00, С22В 34/12. - №а2014 06878, Зареєстровано 19.06.2014р. Опубл. Бюл. №5 від 10.03.2016.

АНОТАЦІЯ

Білоус В.Ю. Наукові основи аргонодугового та електронно-променевого зварювання перспективних високоміцних титанових сплавів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, 2023р.

Дисертація присвячена рішенням важливої науково-практичної проблеми, що полягає в розвитку наукових основ формування структури та комплексу властивостей зварних з'єднань нових високоміцних титанових сплавів з $\sigma_b > 1100$ МПа, і на цій основі розробці технології аргонодугового та електронно-променевого зварювання.

В роботі встановлено шляхи підвищення якості зварних з'єднань перспективних високоміцних титанових сплавів, виконаних ЕПЗ та АДЗ – зварювання на режимах які забезпечуть оптимальний фазовий склад металу шва і ЗТВ, використання присадного матеріалу який містить на 20...30% менше легуючих елементів та застосування відповідної післязварювальної термічної обробки. Досліджено зварні з'єднання високоміцних титанових сплавів з $K_\beta = 0,7-1,7$, таких як ($\alpha+\beta$)-сплави розроблені в Україні Т120 (Ti-5Al-2.8Mo-2.3V-4Nb-1.3Cr-1Fe-2.7Zr) та економно-легований Ti-3.6Fe-0.25O. З Псевдо- β -сплавів досліджено зварні з'єднання сплавів ВТ19 та економно легуваних Timet LCB (Ti-6.3Mo-4.4Fe-1.5Al), LCB-5.1 (Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe). З Псевдо α -сплавів

досліджено вплив зварювання на властивості з'єднань жароміцного сплаву Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si.

Запропоновано методику визначення впливу аргонодугового зварювання на швидкості охолодження в металі шва та ЗТВ при АДЗ титанових сплавів таких як VT19, VT6, VT23, T120м шляхом математичного моделювання за методом кінцевих елементів, що дозволяє визначити розміри зон, в яких протікають поліморфні перетворення з утворенням метастабільних α' - та β -фаз.

Побудовані діаграми анізотермічних перетворень при охолодженні ($\alpha+\beta$) сплавів T120, псевдо- β титанових сплавів VT19 та LCB-5.1 із зазначенням ліній початку та кінця анізотропічних перетворень $\beta\rightarrow\alpha$ і $\beta\rightarrow\alpha''$, з залежністю кількості β -фази в металі зварного з'єднання від максимальних швидкостей охолодження зварного з'єднання титанового псевдо- β -сплаву VT19.

Досліджено вплив чотирьох видів післязварювальної термічної обробки на властивості з'єднань псевдо- β титанових сплавів, виконаних АДЗ та ЕПЗ, найвищі значення міцності мають з'єднання піддані гартуванню в воду з подальшим старінням, при цьому міцність з'єднань ЕПЗ сплаву VT19 на рівні 1270...1280 МПа. Встановлено обернено пропорційну залежність міцності з'єднань титанових псевдо- β -сплавів VT19, LCB-5.1 від кількості β -фази в металі шва, запропоновано критерій якості зварних з'єднань.

Ключові слова: Титан, титанові сплави, зварювання, аргонодугове зварювання, електронно-променеве зварювання, ($\alpha+\beta$)-сплави, псевдо- β -сплави, псевдо- α -сплав, погонна енергія, фазові перетворення, міцність, ударна в'язкість, швидкість охолодження.

ABSTRACT

Belous V.Yu. Bilous V.Yu. Scientific foundations of argon arc and electron beam welding of promising high-strength titanium alloys. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Thesis for a scientific degree of Doc. Sci (Eng.) in speciality 05.03.06 – “Welding and Related Processes and Technologies” - E.O.Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to solution of an important scientific and practical problem, which consists in development of scientific foundations of formation of the structure and set of properties of welded joints of new high-strength titanium alloys with $\sigma_t > 1100$ MPa, and development of the technology of argon-arc and electron beam welding on this basis.

The work establishes ways to improve the quality of welded joints of promising high-strength titanium alloys made by EBW and TIG-welding in modes that will ensure the optimal phase composition of metal of the weld and HAZ, use of filler material which contains 20-30% less alloying elements and application of the appropriate post-weld heat treatment. Welded joints of high-strength titanium alloys with $K_\beta = 0.7-1.7$, such as developed in Ukraine ($\alpha+\beta$)-alloys T120m (Ti-5Al-2.8Mo-2.3V-4Nb-1.3Cr-1Fe-2.7Zr) and sparsely-alloyed Ti-3.6Fe-0.25O were studied. From

pseudo- β -alloys, welded joints of VT19 alloys and sparsely-alloyed Timet LCB (Ti-6.3Mo-4.4Fe-1.5Al) and LCB-5.1 (Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe) were studied. From pseudo α -alloys, the effect of welding on the properties of heat-resistant Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si alloy joints was studied.

A procedure for establishing the effect of argon-arc welding on the cooling rates in the metal of the weld and HAZ at TIG-welding of such titanium alloys as VT19, VT6, VT23, T120 by means of mathematical modeling using the finite element method is proposed, which allows determining the sizes of zones, where polymorphic transformations occur with formation of metastable α' - and β -phases.

Diagrams of anisothermal transformations during cooling of ($\alpha+\beta$) T120 alloys, pseudo- β titanium alloys VT19 and LCB-5.1 are constructed with indication of the lines of the beginning and end of anisotropic transformations $\beta\rightarrow\alpha$ and $\beta\rightarrow\alpha''$, with the dependence of the amount of β -phase in the welded joint metal on the maximum cooling rates of the welded joint of pseudo- β -titanium alloy VT19.

The influence of four types of post-weld heat treatment on the properties of joints of pseudo- β titanium alloys made by TIG-welding and EBW has been studied, the highest strength values are demonstrated by joints subjected to quenching in water with subsequent aging, while the strength of EBW joints of VT19 alloy is at the level of 1270...1280 MPa. The inversely proportional dependence of the strength of joints of titanium pseudo β -alloys VT19, LCB-5.1 on the amount of β -phase in the weld metal was established, and a criterion for the quality of welded joints was proposed.

Key words: Titanium, titanium alloys, welding, TIG welding, electron-beam welding, ($\alpha+\beta$)-alloys, pseudo- β -alloys, pseudo- α -alloy, kinetic energy, phase transformations, strength, impact toughness, speed cooling.