

## **ВІДЗИВ**

офіційного опонента д.т.н., проф. Квасницького В.В.  
на дисертаційну роботу **Білоуса Валерія Юрійовича**  
**«Наукові основи аргонодугового та електронно-променевого зварювання**  
**перспективних високоміцних титанових сплавів»**,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.03.06 - Зварювання та спорідненні процеси і технології

Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 357 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 383 сторінки друкованого тексту, включаючи 243 рисунки, 93 таблиці, список літератури на 39 сторінках та 4 додатки.

**Актуальність обраної теми дисертації.** Сучасний рівень розвитку аерокосмічної та автомобільної промисловості, суднобудування та нової техніки вимагає підвищення надійності, несучої спроможності, зменшення маси та енерговитрат, підвищення коефіцієнту корисної дії та ефективності роботи елементів конструкцій, що забезпечується застосуванням нових матеріалів з високою питомою міцністю та корозійною стійкістю в широкому діапазоні температур, високими характеристиками якості зварних елементів конструкцій. Тому перспективність застосування сплавів на основі титану для виготовлення елементів конструкцій аерокосмічної та інших галузей промисловості не викликає сумнівів. Однак, широке застосування таких матеріалів стримується проблемою забезпечення рівномірності і високої пластичності зварних з'єднань з високоміцних титанових сплавів, вирішення якої вимагає створення удосконалених технологічних процесів зварювання таких сплавів на основі нового комплексного підходу щодо визначення впливу термічного циклу зварювання та ступеня легування металу зварного шва, а також режимів термообробки на властивості зварних з'єднань сучасних титанових сплавів. Наявні в науковій літературі відомості щодо особливостей структуроутворення та фазових перетворень, механізмів розміцнення та їх впливу на комплекс фізико-механічних характеристик зварних з'єднань з нових високоміцних титанових сплавів обмежені та носять неоднозначний характер або вивчені не достатньо, а ефективне застосування титанових сплавів у зварних конструкціях можливе лише за умови міцності зварних з'єднань на рівні 0,90-0,95 від основного металу. Це свідчить про актуальність та своєчасність теми представленої дисертаційної роботи, яка має як науковий, так і практичний інтерес.

Про актуальність теми роботи свідчить також її зв'язок з темами відомчих програм, що виконані в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України протягом 2009-2023 років, зокрема: «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- $\beta$  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.).

У реалізації названих робіт дисертант приймав безпосередню участь у якості відповідального виконавця.

**Метою роботи** є розвиток наукових основ процесів зварювання високоміцних титанових сплавів, встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів та термічних циклів зварювання на структурно-фазовий склад та механічні властивості зварних з'єднань, розроблення вдосконалених технологічних процесів аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом (АДЗ) та електронно-променевого зварювання (ЕПЗ), які забезпечать рівноміцність зварних з'єднань основному металу.

**У вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета й основні завдання досліджень, визначені об'єкт та предмет дослідження, сформульовані наукова новизна й практичне значення отриманих результатів роботи, наведені відомості про їх апробацію та представлений перелік публікацій по темі дисертаційної роботи із зазначенням особистого внеску автора.

**У першому розділі** автор ретельно проаналізував літературу щодо проблеми забезпечення рівноміцності і високої пластичності зварних з'єднань перспективних високоміцних титанових сплавів, провів детальний аналіз сучасного стану та актуальних завдань досліджень, які спрямовані на створення нових підходів щодо оцінки впливу технологічних чинників, зокрема термічного циклу зварювання, зміни хімічного складу металу шва, впливу післязварювальної термічної обробки на формування структури та міцність зварних з'єднань. Визначені перспективні шляхи забезпечення високих характеристик якості зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів. На підставі проведеного аналізу літературних джерел автором сформульовані мета та задачі досліджень.

**У розділі 2** наведені хімічний склад та механічні властивості дослідних високоміцних сплавів, характеристики устаткування для АДЗ та ЕПЗ, методики визначення теплофізичних властивостей багатокомпонентних титанових сплавів. Наведена методика дослідження впливу термічного циклу аргонодугового зварювання на формування зварних швів високоміцних титанових сплавів. Досліджені властивості зварних з'єднань ( $\alpha+\beta$ )-сплавів Т120

(Ti-5.5Al-2.8Mo-2.3V-4Nb-1.3Cr-1Fe-2.7Zr), Ti-3.6Fe-0.25O; псевдо- $\beta$ -сплавів BT19 (Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr), економнолегованих Timet LCB (Ti-6.3Mo-4.4Fe-1.5Al), LCB-5.1 (Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe) сплавів; псевдо  $\alpha$ -сплаву Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si. Розрахункові дослідження впливу термічного циклу зварювання на структурно-фазовий стан зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів здійснювали за допомогою нестационарного теплового скінченно-елементного аналізу з урахуванням теплоти фазових переходів, методом скінченних елементів із застосуванням програмного комплексу ANSYS виконане математичне моделювання формоутворення зварного шва та термічних циклів зварювання, розподілу температурних полів. Дослідження проводилися за стандартизованими методиками.

**У розділі 3** наведені результати досліджень щодо вивчення процесів структуроутворення, досліджені закономірності впливу термічного циклу аргонодугового зварювання на фазовий склад зварних з'єднань високоміцних титанових ( $\alpha+\beta$ )-сплаву T120 псевдо- $\beta$ -сплавів BT19, LCB-5.1. Для попередньої оцінки фазового складу металу шва і ЗТВ використовували розрахункові діаграми анізотермічних перетворень для псевдо- $\beta$  сплавів BT19, LCB-5.1 та ( $\alpha+\beta$ )-сплаву T120. Визначені розрахунковим шляхом максимальні швидкості охолодження за температур початку поліморфного перетворення  $\beta\rightarrow\alpha$  (810°C) для псевдо- $\beta$  сплавів BT19, LCB-5.1 порівнювали з експериментально отриманими даними щодо вмісту  $\beta$ -фази в металі зварних з'єднань, що сформовані за розрахованими режимами. На основі отриманих даних встановлена залежність кількості  $\beta$ -фази від швидкості охолодження при температурі початку поліморфного перетворення  $\beta\rightarrow\alpha$ , що дозволяє прогнозувати фазовий склад зварних з'єднань.

**В розділі 4** експериментально досліджений вплив умов та параметрів АДЗ з попереднім підігрівом, а також ЕПЗ з наступною ЛТО на властивості зварних з'єднань псевдо  $\alpha$ -сплаву Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si, який легований кремнієм. Встановлено, що для запобігання утворенню холодних тріщин при АДЗ та ЕПЗ необхідно застосовувати попередній підігрів заготовок до 200 °С. Збільшення температури попереднього підігріву до 300 °С та 400 °С при ЕПЗ призводить до зменшення величини значення ударної в'язкості KCV з 9.1 до 4.4 Дж/см<sup>2</sup>. Застосування ЛТО призводить до формування в зварному шві структур типу кошикового плетіння, що складаються з пластин  $\alpha$ -фази товщиною від 1 до 5 мкм та дисперсних зерен  $\beta$ -фази товщиною до 1 мкм.

**У розділі 5** встановлені закономірності впливу технологічних параметрів процесів ЕПЗ та АДЗ, а також післязварювальної термічної обробки на властивості з'єднань ( $\alpha+\beta$ )-сплаву T120, а також вплив ЕПЗ на властивості з'єднань сплаву Ti-3.6Fe-0.25O.

Експериментально доведено, що термічний цикл ЕПЗ викликає збільшення кількості  $\beta$ -фази в металі зварних швів. Застосування ЛТО дозволяє зменшити кількість  $\beta$ -фази майже до її рівня в основному металі.

На основі проведених експериментальних досліджень встановлений вплив погонної енергії АДЗ сплаву T120 та ступеню легування металу шва на властивості з'єднань. Показано, що при АДЗ сплаву T120 доцільно застосовувати

режими зі значеннями погонної енергії в межах від 800 до 950 кДж/м. В якості присадного металу був обраний титановий дріт марки VT1-00св, який дозволяє, не змінюючи систему легування зварного шва, зменшити в ньому вміст легуючих елементів. Застосування нелегованого присадного матеріалу призводить до зменшення вмісту  $\beta$ -фази в металі шва зварних з'єднань безпосередньо після зварювання фактично до її рівня в основному металі. Однак обсяг присадного металу в зварному шві сплаву T120 має не перевищувати 10 %. Подальше збільшення вмісту присадного металу призводить до зменшення міцності зварних з'єднань до рівня меншого за 90 % від міцності ОМ – значення міцності з'єднання при [Mo]екв металу швів 7,9 становлять менше за 90 % від міцності ОМ.

Для визначення можливості керування властивостями зварних з'єднань сплаву T120 післязварювальною термічною обробкою досліджений вплив 3-х видів термообробки – відпал, регламентований відпал, гартування у воду з наступним старінням. Найбільшу міцність демонструють зварні з'єднання сплаву T120, після гартування у воду з подальшим старінням.

**В розділі 6** наведені результати досліджень щодо впливу ЕПЗ, АДЗ, а також післязварювальної термічної обробки на властивості псевдо  $\beta$ -сплавів.

Експериментально встановлена залежність впливу погонної енергії процесу зварювання на формування фазового складу з'єднань. Показано, що найбільша кількість  $\beta$ -фази в металі зварних швів сплаву VT19 фіксується в металі після зварювання, причому зменшення величини погонної енергії майже на 50 % призводить лише до незначного збільшення кількості  $\beta$ -фази в шві. Попередній підігрів заготовок до температури 400 °С та локальна термічна обробка забезпечують збільшення міцності зварних з'єднань з одночасним зменшенням вмісту  $\beta$ -фази в металі шва з'єднань сплавів VT19 та LCB-5.1. Застосування попереднього підігріву до температури 400 °С призводить до зменшення вмісту  $\beta$ -фази в металі зварних швів з'єднань сплаву VT19 з 91 % до 53 %. Міцність зварних з'єднань після відпалу максимальна і становить 958 МПа, що більше на 5...7 % за міцність вихідного сплаву в стані поставки (після прокатування).

Зварні з'єднання економнолегованих псевдо- $\beta$  сплавів Timet LCB, LCB-5.1 схильні до утворення холодних тріщин внаслідок високого вмісту в сплавах легуючих елементів, зокрема заліза, що призводить до формування інтерметалідів заліза та титану. Локальна термічна обробка у сполученні з попереднім підігрівом до температури 400 °С дозволяють запобігти утворенню холодних тріщин при зварюванні економнолегованого сплаву LCB-5.1, зменшити вміст  $\beta$ -фази в металі шва до 72 %, забезпечують формування більш однорідної структури та підвищення міцності зварних з'єднань до 997 МПа, тобто до 98 % від міцності основного металу після прокатування.

Зварні шви сплавів VT19 і LCB-5.1 характеризуються наявністю рівновісних і нерівновісних зерен  $\beta$ -фази, а вміст  $\beta$ -фази в металі зварних швів безпосередньо після зварювання менший у порівнянні з отриманими ЕПЗ швами. Застосування нелегованого присадного дроту марки VT1-00св призводить до зменшення вмісту легуючих елементів, не змінюючи систему легування зварних швів,

забезпечує зменшення вмісту  $\beta$ -фази в шві з одночасним підвищенням міцності, що дозволяє отримати зварні з'єднання, які рівномічні основному металу.

В главі наведені результати досліджень щодо впливу різних видів термічної обробки на формування структури та властивості зварних швів псевдо- $\beta$ -сплавів. Досліджена структурна будова зварних з'єднань після відпалу, гартування з наступним старінням, вплив уповільненого охолодження зі швидкістю  $1^\circ \text{C/хв}$ . та регламентованого відпалу. Встановлено, що після гартування та старіння мікроструктура металу зварних швів характеризується найбільшою дисперсністю, що забезпечує найбільшу міцність зварних з'єднань.

Встановлена залежність міцності з'єднань псевдо- $\beta$  сплавів ВТ19, LCB-5.1 від кількості  $\beta$ -фази в металі зварних швів. Це в сполученні з встановленою в розділі 3 залежністю кількості  $\beta$ -фази від швидкості охолодження надає можливості здійснювати прогнозування міцності зварних з'єднань з урахуванням режимів зварювання.

У розділі 7 наведені технологічні рекомендації щодо зварювання титанових сплавів способами ЕПЗ та АДЗ, а також проведено порівняння режимів зварювання. Автором показано, що ЕПЗ за визначеними режимами забезпечує найбільший «коефіцієнт якості» для економнолегованого псевдо- $\beta$ -сплаву LCB-5.1 при одночасному застосуванні попереднього підігріву та ЛТО. В разі зварювання конструкційного псевдо- $\beta$ -сплаву ВТ19 найбільший «коефіцієнт якості» забезпечується при АДЗ із застосуванням присадного матеріалу з меншим ступінем легування.

У висновках відображені основні результати дисертаційної роботи.

У додатках надані відомості, щодо практичного застосування результатів досліджень і список опублікованих праць.

Слід додати, що при наведеному вище огляді змісту розділів дисертації коротко відзначені ті результати, які є найбільш вагомими.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність.**

У дисертаційній роботі визначені закономірності впливу технологічних параметрів і умов ведення процесів аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом та електронно-променевого зварювання, їх термічних циклів та ступеня легування металу на структурно-фазовий склад і механічні властивості зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів. На цій основі запропоновані вдосконалені технологічні процеси АДЗ та ЕПЗ, які дозволяють отримати рівномічні основному металу зварні з'єднання.

Обґрунтованість та достовірність основних наукових положень, висновків і рекомендацій роботи визначається наступним:

- використанням у роботі праць визнаних учених і фахівців у галузі прикладного матеріалознавства;

- верифікацією та доброю збіжністю результатів аналітично-розрахункових і експериментальних досліджень;

- застосуванням автором добре апробованих методів та методик досліджень, зокрема методів оптичної та електронної мікроскопії, рентгеноструктурного та мікрорентгеноспектрального аналізу, методів комп'ютерно-вимірювального

аналізу, методів статистичної обробки та аналізу експериментальних результатів, результатами механічних випробувань;

- значним обсягом отриманих шляхом проведення прямих експериментів експериментальних даних;

- наявністю чисельних публікацій у фахових виданнях та апробацією основних результатів роботи на всеукраїнських та міжнародних конференціях.

Отримані автором теоретичні закономірності підтверджені дослідженнями реальних зразків. Вони не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та накопиченим досвідом. Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями. Їх достатня обґрунтованість підтверджується визнанням на відомих міжнародних конференціях з матеріалознавства, зварювання і споріднених технологій.

Таким чином, основні результати представленого наукового дослідження є достовірними та обґрунтованими, що підтверджується великим обсягом проведених досліджень. Наукові положення, висновки і рекомендації, що сформульовані у дисертації, відповідають всім вимогам МОН України щодо дисертаційних робіт.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в теоретичному узагальненні та розширенні уявлень щодо впливу технологічних параметрів і умов ведення процесів аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом та електронно-променевого зварювання, їх термічних циклів та ступеня легування металу на структурно-фазовий склад і механічні властивості зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів, що є науковою базою для розробки нових технологій аргонодугового та електронно-променевого зварювання, які дозволяють отримати рівномірні основному металу зварні з'єднання.

Положення наукової новизни відповідають поставленим завданням наукової роботи.

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

Автором вперше встановлена пропорційна залежність міцності з'єднань титанових конструкційних та економнолегованих псевдо- $\beta$ -сплавів Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr (BT19), Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5.1) від кількості залишкової  $\beta$ -фази в металі шва, визначено, що збільшення кількості  $\beta$ -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.

Вперше для титанових псевдо  $\beta$ -сплавів встановлена залежність величини значення межі міцності зварних з'єднань у 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 у металі шва. Показано, що зменшення вмісту легуючих елементів у металі шва 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  $\beta$ -фаз, а подальше зменшення вмісту легуючих елементів призводить до зменшення показників міцності з'єднань.

Для кількісної оцінки впливу режиму та способу зварювання на експлуатаційні характеристики зварних з'єднань титанових сплавів вперше запропоноване використання «коефіцієнту якості зварного з'єднання», який розраховується як половина суми співвідношень межі міцності та ударної в'язкості зварного з'єднання до відповідних показників основного металу. Встановлено, що найбільші значення «коефіцієнту якості» забезпечує АДЗ сплаву системи Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr (BT19) з присадним матеріалом та ЕПЗ економнолегованого сплаву системи Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5,1) при застосуванні попереднього підігріву та ЛТО.

Отримали подальший розвиток уявлення щодо впливу попереднього підігріву на властивості зварних з'єднань титанового псевдо- $\alpha$ -сплаву системи Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si. Встановлено, що застосування попереднього підігріву з'єднань до 200 °C при ЕПЗ та 400 °C при АДЗ забезпечує формування в зварному з'єднанні структур типу кошикового плетіння, що складаються з пластин  $\alpha$ -фази товщиною та дисперсних зерен  $\beta$ -фази.

Доведена перспективність та визначені рекомендовані способи термічної обробки для регулювання структури, фазового складу та забезпечення високих властивостей зварних з'єднань високоміцних ( $\alpha+\beta$ )- та псевдо- $\beta$ -титанових сплавів. Так, гартування та старіння призводить до формування в металі шва найбільш дрібнодисперсної структури з розмірами пластин  $\alpha$ -фази, що не перебільшують 1 мкм. Це забезпечує значення межі міцності отриманих ЕПЗ зварних з'єднань сплаву Ti-5.5Mo-5.5Cr-3.5Fe-3Al-Zr (BT19) на рівні 1270...1280 МПа.

Наукова новизна сформульована зрозуміло, з розкриттям суті.

**Практичне значення роботи.** На основі встановлених автором закономірностей процесів структуроутворення розроблений технологічний процес ЕПЗ перспективних високоміцних титанових сплавів, що включає попередній підігрів до температури 200 °C та післязварювальний відпал при температурі 900 °C протягом 10 хвилин. Це забезпечує рівноміцність зварних з'єднань основному металу.

Розроблений технологічний процес АДЗ перспективних високоміцних титанових сплавів, що включає зварювання з погонною енергією в межах від 700 до 800 кДж/м, введення в зварювальну ванну до 10 % матеріалу зварювального присадкового дроту марки BT1-00св, післязварювальний відпал. Отримані зварні з'єднання є рівноміцними основному металу.

Запропоновані режими післязварювальної термічної обробки отриманих за технологіями АДЗ та ЕПЗ з'єднань з псевдо- $\beta$  титанових сплавів та розроблені рекомендації щодо промислового впровадження аргонодугового зварювання при виготовленні конструкцій з псевдо- $\beta$ -титанових BT19 та економнолегованого сплаву Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5.1).

**Впровадження результатів.** Результати роботи впроваджені у навчальний процес при підготовці здобувачів 3-го рівня вищої освіти в

аспірантурі Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України.

Отримані автором наукові результати та технологічні рекомендації щодо зварювання використовуються при виконанні контрактних робіт з установами та підприємствами.

На основі отриманих дисертантом результатів досліджень на підприємствах України, що працюють у галузях авіаційної, космічної, автомобілебудівної промисловості і нової техніки можливо реалізувати технології АДЗ та ЕПЗ перспективних високоміцних сплавів на основі титану.

**Повнота викладу основних результатів роботи в наукових фахових виданнях.** Основні результати досліджень дисертації опубліковані в 55 наукових роботах, 26 з них – у виданнях, які є в переліку ДАК України як фахові, 7 – опубліковані в виданнях, які реферуються в наукометричній базі Scopus; 17 у збірниках праць науково-технічних конференцій; 1 – в інших виданнях.

Автором опублікований 1 патент України.

Результати досліджень, що були одержані при виконанні кандидатської дисертації «Управління формуванням шва при зварюванні сплавів титану у вузький зазор вольфрамовим електродом з магнітокерованою дугою» (2008 р.) у представленій докторській дисертації не використовуються.

**Висновки дисертації** відображають найважливіші наукові та практичні результати дисертації, в якій наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення актуальної науково-технічної проблеми, що полягає у забезпеченні рівномірності та високої пластичності отриманих за удосконаленими технологіями аргонодугового та електронно-променевого зварювання зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів, що забезпечують формування високоякісних бездефектних зварних з'єднань.

Висновки сформульовані конкретно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

**Зміст дисертації і автореферату ідентичний.** Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює наведені в самій дисертації результати.

### **Зауваження та коментарі до дисертації:**

1. Робота має деякі неточності в застосуванні термінів та помилки, наприклад на стор. 4 «...анізотропічних перетворень...», «...рівномірний розподілу легуючих елементів...»; на стор. 5 «...після гарту...»; на стор. 39 «...іншого встаткування...»; на стор. 41 «Сплави з урахуванням інтерметалідів.»; на стор. 44 «...термічного напруження...»; на стор. 58 «...домішок внедріння...»; на стор. 101 «...збільшити деформаційну властивість...»; на стор. 133 «...концентрація напруги...»; на стор. 138 «...расстояние от оси шва...»; на стор. 158 «...не призводить до сильних змін...»; на стор. 193 «...з роздробленою при прокатуванні оторочкою...»; на стор. 211 «...корзинкового плетіння...» та ін., хоча в цілому написана грамотно логічно та зрозуміло.

2. Наведені в розділі 1 відомості щодо складу та властивостей сплавів титану, які загалом використовуються в промисловості, можна було б скоротити,



оскільки більшість з них в роботі не розглядаються. Це саме стосується наведених в розділі 2 пояснень щодо формування електронного променя при ЕПЗ.

3. Наведені в розділі 2 відомості щодо застосування програмного комплексу ANSYS для визначення розподілу температур при зварюванні бажано було б розширити наведенням характеристик та типу скінчених елементів.

4. В розділі 2 на рис. 2.17, 2.19,а, 2.20 та ін. автор наводить термічні цикли зварювання, але відсутність розмірності шкали часу дещо ускладнює сприйняття отриманих результатів. На рис. 2.22 шкала часу взагалі відсутня.

5. В розділі 2 на стор. 128 автор стверджує, що «Таким чином, АДЗ за рахунок менших швидкостей охолодження дозволяє більше змінювати фазовий склад металу шва та ЗТВ зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів», що вимагає додаткових пояснень.

6. На стор. 134 наведений рис. 3.1,а, що має незадовільну якість. Також, бажано було б пояснити вибір трьох режимів аргонодугового наплавлення складнолегованого титанового сплаву Т120, які наведені в табл. 3.2. На рис. 3.2-3.4 бажано було б навести шкалу відстані від осі шва.

7. На стор. 140 автор стверджує про «Низькі значення похибок при зіставленні форми і геометрії отриманих розрахункових і експериментальних даних», бажано навести конкретні результати оцінки збіжності.

8. На стор. 205 вказано, що «Очевидно, ці дисперсні частинки є силіцид титану  $Ti_5Si_3$ , оскільки вміст кремнію в сплаві перевищує межу його розчинності в  $\alpha$ -титані, який становить 0,12 - 0,45 % кремнію», бажано підтвердити це твердження результатами визначення фазового складу.

9. На стор. 235 автор стверджує, що «Наявність субструктури свідчить про напружений стан у цій зоні ЗТВ після зварювання...», але дослідження щодо оцінки компонент напруженого стану в роботі не проводилися.

10. На стор. 248 наведені рекомендовані автором режими ступінчастого відпалу зварних з'єднань з температурами 870<sup>0</sup>С, 800<sup>0</sup>С, 380<sup>0</sup>С, 550<sup>0</sup>С. Бажано пояснити чому саме такі значення температур витримки при ступінчастому відпалі обрані.

11. При наведенні режимів ЕПЗ зварювання бажано було б навести характеристики фокусування електронного променя.

12. Наведені в главі 7 технологічні рекомендації щодо зварювання сплавів на основі титану було б доцільно доповнити вимогами щодо чистоти та складу захисних газів для АДЗ та глибини вакууму при ЕПЗ.

Однак відзначені недоліки та зауваження не зменшують загального високого рівня роботи та цінності отриманих результатів.

Дисертація відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України. Назва та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

**Загальний висновок.** Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що дисертаційна робота В.Ю. Білоуса «Наукові основи аргонодугового

та електронно-променевого зварювання перспективних високоміцних титанових сплавів» є завершеною науково-дослідною розробкою, що присвячена актуальній науково-практичній проблемі забезпечення рівномірності та високої пластичності отриманих за удосконаленими технологіями аргонодугового та електронно-променевого зварювання зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів з  $\sigma_{\text{в}} > 1100$  МПа, що забезпечують формування бездефектних зварних з'єднань з високими характеристиками міцності та якості.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології», не містить елементів академічного плагіату та запозичень, здобувач дотримується вимог академічної доброчесності, дотримується норм законодавства про авторське право.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем представлена робота відповідає вимогам п.п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою № 1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року щодо докторських дисертацій, а її автор Білоус Валерій Юрійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології.

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри зварювального виробництва  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
доктор технічних наук,  
професор

В.В. Квасницький

Підпис завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н, проф. Квасницького В.В. засвідчую:

Вчений секретар  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



В.В. Холявко