

Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Білоуса Валерія Юрійовича

«Наукові основи аргонодугового та електронно-променевого зварювання перспективних високоміцних титанових сплавів»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук до захисту на Спеціалізованій вченій раді Д 26.182.01 за спеціальністю 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси і технології

Актуальність роботи.

Титанові сплави завдяки високому рівню питомої міцності, в'язкості руйнування, втомної міцності, корозійної стійкості та немагнітності є важливими конструкційними матеріалами, що широко використовуються в аерокосмічній, автомобільній, суднобудівній та військовій галузях. Найбільший економічний ефект як в авіабудуванні, так і в інших машинобудівних галузях дає застосування титанових сплавів високої (до 1300 МПа) і надвисокої (понад 1500 МПа) міцності, для чого останнім часом розроблялося ціла низка нових композицій сплавів як двофазного $\alpha+\beta$ -, так і метастабільного β -класів. Для отримання оптимальних властивостей виробів з них потрібно розробити як методи їх термомеханічної і термічної обробок, так і зварювання, оскільки останні є і залишаться в найближчій перспективі одним з основних методів створення складних виробів та конструкцій. А для розробки ефективних методів зварювання таких складних за хімічним та фазовим складом систем якими є промислові титанові сплави, які б забезпечили надійно відтворювані фізико-механічні властивості виробів, потрібно, в першу чергу, провести детальне дослідження фазових і структурних перетворень в суттєво нерівноважних умовах термічних циклів швидкого нагрівання і охолодження, що реалізуються при зварюванні. Тому дисертаційна робота Білоуса В.Ю., саме присвячена як детальному вивченню таких процесів і розробці на основі отриманих результатів методів аргонодугового (АДЗ) і електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) нових титанових сплавів, що забезпечують добре збалансовану високу міцність та пластичність, **безумовно є актуальною.**

Наукова новизна, достовірність і надійність результатів.

В роботі Білоуса В.Ю. вперше для перспективних високоміцних конструкційних титанових сплавів псевдо- β класу визначено загальні закономірності розпаду високотемпературної метастабільної β -фази в залежності від швидкості охолодження та побудовані відповідні діаграми фазових перетворень при неперервному охолодженні з різними швидкостями. На цій основі встановлено залежність характеристик міцності зварних швів від кількості залишкової β -фази та від сумарного вмісту легуючих елементів в металі шва.

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 аналогічних показників основного металу. Встановлено, найбільші значення коефіцієнту якості зварного з'єднання, які забезпечує аргонодугове зварювання різних сплавів в залежності від їх хімічного складу та режимів зварювання.

Виконано подальший розвиток уявлень про вплив попереднього підігріву при електронно-променевому зварюванні та АДЗ на властивості зварних з'єднань окремих титанових сплавів і встановлено, що його застосування до 200 °С при ЕПЗ та 400 °С при АДЗ забезпечує формування в зварному з'єднанні відносно дрібних зерен β -фази і достатньо дисперсної внутрішньозеренної $\alpha+\beta$ -мікроструктури Відманштетового типу, що забезпечує міцність зварних з'єднань на рівні до 1190 МПа при ударній в'язкості до 8,5 Дж/см².

Виконано подальший розвиток термічної обробки з метою формування в металі шва зварних з'єднань високоміцних ($\alpha+\beta$)- та псевдо- β -титанових сплавів найбільш дрібнодисперсної мікроструктури 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.

Достовірність і надійність отриманих в дисертаційній роботі наукових результатів і практичних рекомендацій визначається комплексним використанням сучасних методів фізичного матеріалознавства, та їх відповідністю результатам, які були отримані іншими науковцями та опублікованими у фаховій літературі. Основні результати роботи опубліковані в 34 статтях (з яких 8 – у реферованих та прийнятих до міжнародних наукометричних баз даних журналів) і щонайменше у 19 публікаціях міжнародних конференцій, а також захищені 1-м патентом України.

Значущість проведеної роботи для науки і практики.

На підставі проведених досліджень розроблено технологічний процес ЕПЗ перспективних високоміцних титанових сплавів, що включає попередній підігрів та відпал після зварювання, який забезпечує міцність зварних з'єднань на рівні основного металу. Також розроблено технологічний процес АДЗ перспективних високоміцних титанових сплавів, який включає зварювання з певною «погонною енергією» із застосуванням зварювального дроту марки BT1-00св, і завершальний відпал, що забезпечує міцність зварних з'єднань на рівні основного металу.

Запропонована зміцнювальна термічна обробка, яка проводиться після зварювання для з'єднань псевдо- β титанових сплавів, виконаних АДЗ та ЕПЗ, що передбачає гартування у воду з подальшим старінням, забезпечує значення межі міцності з'єднань ЕПЗ сплаву BT19 на рівні 1270...1280 МПа.

Розроблені рекомендації для промислового використання аргонодугового зварювання при виготовленні конструкцій з псевдо- β -титанових (BT19) та економно легованого Ti-2.8Al-5.1Mo-4.9Fe (LCB-5.1) сплавів. Результати роботи впроваджені у навчальному процесі 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").

Оцінка змісту роботи.

Дисертаційна робота Білоуса В.Ю. добре оформлена, написана гарною літературною мовою і складається зі вступу, семи розділів, основних висновків, списку з 357 використаних літературних джерел. Вона описана на 461 сторінці, містить 243 рисунки, 93 таблиці, та має 4 додатки.

У вступі визначена актуальність роботи, сформульовані мета і конкретні задачі, які потрібно було вирішити. Мета і задачі представляються коректно обґрунтованими. В цій частині роботи відзначена її наукова новизна і практична значущість, як вона представляється дисертанту.

У першому розділі, присвяченому обґрунтуванню проблеми забезпечення рівноміцності і високої пластичності зварних з'єднань перспективних високоміцних титанових сплавів, які будуть використовуватися в промисловості України, проведено детальний аналіз сучасного стану досліджень, спрямованих на створення нових підходів до оцінки впливу таких технологічних чинників, як термічний цикл зварювання, зміна хімічного складу металу шва, а також вплив наступної термічної обробки, спрямованих на забезпечення як рівноміцності, так і якості зварних з'єднань. Для оцінки технологій зварювання, що розробляються, встановлено необхідність впровадження комплексного критерію якості зварного з'єднання в процесі створення нових композицій титанових сплавів різних за фазовим складом типів. Оскільки

двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави вирізняються високою чутливістю до термічного циклу зварювання, це приводить до ускладнення завдання отримання високоякісних зварних з'єднань, і отже, вимагає детального вивчення фазових та структурних перетворень в умовах циклів зварювання, тобто нагрівання і охолодження суттєво відмінних від рівноважних, та їх впливу на механічні характеристики зварних з'єднань. Відомо, що в подібних нерівноважних умовах в процесі нагрівання утворюється хімічно неоднорідна високотемпературна β -фаза, яка в умовах швидкого охолодження розпадається з утворенням декількох також нерівноважних фаз, включаючи як обидва типи титанового мартенситу (гексагональний α' , і орторомбічний α'') так і залишки метастабільної β -фази. Такий фазовий стан є як термічно, так і механічно нестабільним, і потребує стабілізації фазового складу і властивостей шляхом термічної обробки, вибір режимів якої повинен базуватися саме на результатах детального аналізу перетворень, які відбуваються в процесі зварювання. Проведений аналіз наявних в літературі робіт дозволив автору 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, і хімічний склад зварного шва. В зв'язку з тим, що для нових ($\alpha+\beta$)-сплавів та псевдо- β -сплавів були відсутні спеціальні зварювальні дроти, було зроблено висновок щодо доцільності дослідження впливу 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. Цілком логічним був і висновок щодо доцільності встановлення можливості підвищення властивостей зварних з'єднань $\alpha+\beta$ -сплавів та псевдо- β -сплавів за рахунок термічної обробки, та порівняння отриманих при цьому властивостей з'єднань з тими, що були отримані методом електронно-променевого зварювання з застосуванням локальної електронно-променевої термообробки в вакуумній камері. Також було визначено перспективи застосування та шляхи підвищення якості зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів. В результаті проведеного критичного аналізу літературних джерел Білоусом В.Ю. у цьому розділі були сформульовані мета та задачі дослідження.

У другому розділі наведено хімічний склад та механічні властивості досліджуваних титанових сплавів, устаткування для АДЗ та ЕПЗ, методики визначення теплофізичних властивостей багатокомпонентних сплавів на основі титану. Наведено методику дослідження впливу термічного циклу аргонодугового зварювання на формування зварних швів високоміцних титанових сплавів та тривимірну модель зварного з'єднання. 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 тепла, що рухається вздовж лінії, для якого дійсний розподіл Гауса. Охолодження зразка відбувається за рахунок конвективного теплообміну з навколишнім середовищем та випромінювання. Також наведено стандартні методики дослідження структури, фазового складу і механічних характеристик зварних з'єднань титанових сплавів. Наведено використані в роботі методики світлової і електронної мікроскопії растрової та на просвіт; рентгеноструктурного аналізу. Порівняння розрахованих розмірів шва та експериментальних даних показало задовільну відповідність цих результатів.

Третій розділ присвячено дослідженню закономірностей впливу термічного циклу аргонодугового зварювання на фазовий склад зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів. Для перевірки адекватності математичної моделі аргонодугового зварювання з повним проваром псевдо- β -титанового сплаву VT19 було проведено комп'ютерне моделювання та експериментальне аргоно-дугове зварювання зразка цього сплаву за режимом, який забезпечує повний провар металу товщиною 6 мм. Порівняння розрахованих

розмірів шва та експериментальних даних показав задовільну відповідність результатів; величина розбіжностей складала не більше 5%. Ці обрахунки та експерименти були розвинуті шляхом побудови діаграм розпаду метастабільного твердого β -розчину титанових сплавів T110, BT19 і LCB-5.1 в умовах охолодження зі швидкостями, що варіювалися у широкому діапазоні. Отримані діаграми можуть слугувати практичною основою для вибору реальних режимів зварювання. А у поєднанні з розробленою методикою розрахунків теплових процесів при аргоно-дуговому зварюванні вони дозволяють визначити розміри та форму шва та ЗТВ, в яких протікають поліморфні перетворення з утворенням метастабільних α'' (α'), та β -фаз, поточні швидкості охолодження при температурах початку і кінця фазових перетворень і прогнозувати фазовий склад отриманих зварних з'єднань.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням впливу АДЗ з попереднім підігрівом, а також ЕПЗ з локальної термообробки (ЛТО) на властивості зварних з'єднань високоміцних титанових псевдо α -сплавів додатково легованих кремнієм, які призначені для застосування при підвищених температурах. Автором було виконано дослідження впливу таких факторів як застосування флюсу, попереднього підігріву зони шва до температур в діапазоні 200-400°C, а також наступної ЛТО при зварюванні псевдо- α сплаву Ti-5.6Al-2.2Sn-3.5Zr-0.4Mo-1.0V-0.6Si. Встановлено, що застосування ЛТО при ЕПЗ з попереднім підігрівом 200°C дозволило забезпечити рівномірний розподіл легуючих елементів в металі з'єднання, але подальше підвищення температури попереднього підігріву приводить до певного огрублення структури і деякого зниження ударної в'язкості зварних з'єднань цього сплаву.

У **п'ятому розділі** розглянуто вплив ЕПЗ і АДЗ, а також термічної обробки після зварювання на властивості високоміцних ($\alpha+\beta$)-сплавів різного хімічного складу. На основі порівняння трьох сплавів, а саме T120, T110 і Ti-3.6Fe-0.25O був зроблений висновок, що кращі характеристики забезпечує саме сплав T120 завдяки ширшій системі легування (6 елементів), підданий зварюванню за певними оптимальними режимами, а після зварювання – ЛТО. Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що властивості з'єднань з малим значенням погонної енергії мають низькі показники ударної в'язкості при випробуванні зразків з гострим надрізом. Властивості зварних з'єднань, виконаних при використанні більших значень енергії, у стані після зварювання знаходяться на незадовільному рівні, а при максимально використаних енергіях має місце формування структури метала шва та ЗТВ, які мають більш високі значення міцності при більших значеннях показників ударної в'язкості. Це було пояснено більш повним розпадом метастабільних фаз в металі шва та ЗТВ.

Досліджено вплив присадкового матеріалу, зокрема титанового дроту BT1-00св, і показано, що в залежності від режиму зварювання це дозволяє не змінюючи систему легування зварного шва зменшити в ньому вміст легуючих елементів. Проведено детальне вивчення механічних властивостей зварних з'єднань титанового сплаву T120, виконаних ЕПЗ, в стані після завершального відпалу 900°C, 1 година з наступним охолодженням із піччю. Така обробка забезпечує найбільші значення ударної в'язкості зразків з гострим надрізом ($KCV=52$ Дж/см²), а також найбільші значення показників відносного подовження і відносного звуження. А найбільша міцність зварних з'єднань сплаву T120, виконаних ЕПЗ ($\sigma_b=1348$ МПа) була отримана після гартування у воду і подальшого старіння.

В якості головного результату цього розділу можна відмітити висновок, що застосування гартування та старіння забезпечує формування в металі зварного з'єднання ($\alpha+\beta$)-сплаву T120 найбільш однорідної структури з найменшим розміром структурних елементів.

Шостий розділ присвячено експериментальним дослідженням впливу ЕПЗ і АДЗ, а також термічної обробки після зварювання на властивості титанових псевдо β -сплавів VT19, TIMET-LCB і LCB-5.1. Для електронно-променевого зварювання псевдо β -сплавів також було застосовано локальну термічну обробку відпалом (750°C, 15 хв) зварних з'єднань після зварювання, а для сплавів VT19 та LCB-5.1 також було застосовано попередній підігрів до температури 400°C. Було встановлено, що найбільша кількість β -фази в стані після зварювання фіксується в металі шва зварного з'єднання сплаву VT19, причому зменшення погонної енергії майже на 50% приводить до незначного збільшення кількості β -фази в шві. Структура метала шва сплаву VT19 складається головним чином з β -фази, а метал швів сплавів TIMET-LCB та LCB-5.1 має структуру, що складається з β -зерен із дрібнодисперсними виділеннями всередині зерен і вздовж їх границь. Відповідно найменшу міцність мають зварні з'єднання сплаву VT19, де кількість β -фази в стані після зварювання найвища, але при цьому значення ударної в'язкості зразків з гострим надрізом в таких зварних з'єднаннях сплаву VT19 є найбільшими.

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 сплавів 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 є максимальною і становить 958 МПа, що складає 105...107% від міцності цього сплаву в стані після прокатування. Зварні з'єднання економно легованих псевдо- β сплавів TIMET-LCB, LCB-5.1 внаслідок високого вмісту в металі сплаву таких легуючих елементів, як залізо, та утворення інтерметалідів на основі заліза та титану, схильні до утворення холодних тріщин. Застосування локальної термообробки і попереднього підігріву до 400°C сплаву LCB-5.1 дозволило запобігти утворенню холодних тріщин, знизити кількість β -фази в металі шва, забезпечити більш однорідну структуру та підвищити міцність зварних з'єднань до 997 МПа, що майже дорівнює міцності основного металу. Для сплавів VT19 та LCB-5.1 більш оптимальною були визначені порівняно нижчі температури ЛТО у порівнянні з високоміцними двофазними сплавами, такими як VT23, T110 або T120, що є досить логічним з точки зору нижчих значень температури поліморфного перетворення.

На основі отриманих результатів автором була встановлена обернена залежність між вмістом метастабільної β -фази і рівнем міцності зварних з'єднань, показані практичні шляхи і режими зварювання та наступної термічної обробки, які забезпечать мінімальну кількість цієї фази, а отже й максимальну міцність.

Окремо в цьому розділі розглянуто питання використання присадкового дроту VT1-00св на зміну хімічного та фазового складу металу шва, та механічні властивості зварних з'єднань.

У сьомому розділі автор проводить узагальнення отриманих результатів і наводить розроблені на їх основі рекомендації зі зварювання перспективних високоміцних титанових сплавів методами ЕПЗ і АДЗ, а також демонструє розробку критерію оцінки ефективності обраного режиму зварювання та наступної термообробки зварних з'єднань таких титанових сплавів. На відміну від раніше використовуваного для порівняння властивостей зварних з'єднань титанових сплавів коефіцієнту міцності K_m , який представляє собою відношення межі міцності зварного з'єднання до межі міцності основного металу, автором запропоновано з метою оцінки ефективності розроблених режимів зварювання та наступної термообробки зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів використовувати критерій «якості режиму зварювання» в умовних одиницях, який враховує не тільки показники міцності, але й пластичності та ударної в'язкості зварних з'єднань відносно таких же характеристик основного металу відповідного сплаву.

В результаті проведених досліджень автором 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»:

$$K_{p36} = 0,5(\sigma_{зв} / \sigma_{ом}) + 0,5(KCV_{зв} / KCV_{ом});$$

де K_{p36} – 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.

У цьому розділі наведено відповідні розрахунки вищезгаданих запропонованих автором коефіцієнтів для усіх досліджених титанових сплавів та режимів зварювання і наступної термічної обробки.

Незважаючи на цілком позитивну загальну оцінку дисертаційної роботи Білоуса В.Ю., потрібно зробити наступні зауваження.

- 1) Відомо, що нагрівання титанових сплавів з високими швидкостями (що має місце при зварюванні) приводить до реалізації фазових перетворень в суттєво нерівноважних умовах. Наслідком цього є утворення хімічної неоднорідності утворюваної в ході $\alpha + \beta_0 \rightarrow \beta_m$ перетворення метастабільної β_m -фази (нерівномірності розподілу в ній легувальних елементів) на мікрорівні. Це суттєво впливає на процеси розпаду такої хімічно неоднорідної метастабільної β_m -фази при наступному охолодженні, перш за все – на формування при протіканні $\beta \rightarrow \alpha'(\alpha'') + (\beta_m')$ різних за природою та хімічним складом фаз і на мікроструктуру, а отже і на властивості зварних з'єднань. На жаль, я не знайшов відображення цих моментів у дисертації.
- 2) В третьому розділі наведено дуже цікаві та практично корисні результати щодо фазових перетворень, які відбуваються при зварюванні протягом циклу нагрівання-охолодження, зокрема кількісні данні щодо вмісту різних метастабільних фаз і їх кристалографічної ідентифікації (наприклад Таблиці 3.8-3.10, Рис. 3.39, 3.47, 3.46). Але не зрозуміло яким саме чином були отримані ці результати як на якісному так і на кількісному рівні. Зазвичай такі дослідження та вимірювання отримують методами Рентгенівського дифракційного фазового аналізу (узагальнені данні), або мікродифракції при електронно-мікроскопічних дослідженнях (локалізовані на мікрорівні данні). Проте подібних вихідних результатів (хоча б окремих прикладів первинних експериментальних даних – рентгенограм, мікроструктур з відповідними мікродифракціями) в цьому розділі роботи я не знайшов.
- 3) Одним із важливих методів оцінювання механічних властивостей різномірних/шаруватих матеріалів є вимірювання їх твердості/мікротвердості в різних мікрооб'ємах. В роботі такі данні наводяться тільки в 6-му розділі для сплавів метастабільного β -класу, хоча, такі результати били б дуже доречними і в попередніх розділах для сплавів $(\alpha + \beta)$ - і псевдо- α класів.
- 4) У другому розділі автором вказано, що в роботі використовували дослідження методом сканувальної електронної мікроскопії, в тому числі у поєднанні з мікро рентгеноспектральним аналізом, а також було використано «мікродифракційного просвічуючого електронного мікроскопа». Оскільки у підписах до рисунків автор не вказав яким саме методом була отримані зображення мікроструктур (як це загально прийнято – ОМ або СЕМ), то не можливо зрозуміти, чи взагалі було використано інший метод окрім оптичної металографії (ОМ). Щодо мікро рентгеноспектрального аналізу і трансмісійної електронної мікроскопії, то я не знайшов в тексті дисертації прямих первинних даних використання таких методик, які б помітно прикрасили роботу.
- 5) На Рис.7.1 показано узагальнення певних результатів отриманих на різних титанових сплавах, які позначені на осі «X» через коефіцієнт стабілізації β -фази (K_β). Цей показник

був введений багато років тому із розрахунку, що межа між двофазними ($\alpha+\beta$) сплавами і метастабільними β -сплавами відповідає саме $K_\beta=1,0$, в той час як на цьому рисунку така межа чомусь перевищує 1,5!

б) Потрібно відмітити використання нестандартної термінології та наявність навіть помилок. Зокрема:

а) «Діаграми анізотермічних перетворень». Подібних термінів в інших роботах я не зустрічав. Широко вживаним є вираз «діаграми перетворень», або «розпаду аустеніту в сталях», чи «розпаду твердого β -розчину в титанових сплавах». В англomовній літературі використовується термін «continuous cooling transformation», якому більше відповідає переклад українською «діаграми розпаду (або перетворень) при неперервному охолодженні».

Також недоречними вважаю вирази:

б) «післязварювальний відпал» – норми української мови не мають подібних зворотів, потрібно вживати «відпал після зварювання»;

в) «зміцнююча» термічна обробка – краще вживати «зміцнювальна»;

г) замість «просвітлюючої електронної мікроскопії» краще вживати «трансмісійної», або «електронної мікроскопії на просвіт»;

д) замість «сходимість результатів», - «відповідність» чи «подібність»;

е) «волосоподібні межі» зерен - взагалі незрозуміло; тощо.

7) В оформленні дисертації є окремі недоліки. Наприклад:

а) На титульній сторінці назва інституту, в якому була виконана робота, чомусь указана двічі.

б) Підпис до Рис. 5.38 не зрозумілий – що означає слово «може»?

в) Дивна фраза «Експериментально досліджувався вплив ЕПЗ та ЛТО в вакуумній камері після зварювання» на стор. 14 автореферату. Що, зварні з'єднання по різному поведуть у вакуумній камері і поза нею?

г) На окремих мікроструктурах не наведено масштабні мітки (наприклад Рисунки 3.43-3.46, та інші), що ускладнює оцінку реальної дисперсності структури та її складових.

Висновок

Відзначені недоліки не знижують наукової і практичної значущості та загальної позитивної оцінки дисертації. Вона представляє собою цілісну за поставленою та досягнутою метою повністю закінчену науково-дослідну роботу, в якій **вирішена важлива наукова та практична проблема** розробки основ зварювання нових перспективних титанових високоміцних сплавів різних типів. Основні результати роботи опубліковані в 1 монографії, 34 статтях (з яких 8– у реферованих та прийнятих до міжнародних наукометричних баз даних журналах) і щонайменше у 19 публікаціях міжнародних конференцій, а також захищені патентом України. Зміст автореферату і основних положень дисертації є ідентичними. Дисертація оформлена (текст, малюнки) на рівні, що відповідає всім вимогам.

Вважаю, що дисертація Білоуса В.Ю. є закінченою роботою, що містить нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності представляються істотними для розробки оптимізованих методів зварювання високоміцних титанових сплавів нового покоління. Виконана дисертаційна робота не містить академічного плагіату та повністю задовольняє вимоги, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, п. 7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а її

автор – Білоус Валерій Юрійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси і технології.

Офіційний опонент
Завідувач відділу фізики міцності та пластичності
негетерогенних металевих матеріалів
Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Марковський П.Є.

Підпис Марковський П.Є. засвідчую

Вчений секретар
Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України
кандидат фізико-математичних наук



Савчук М.І.