

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу Олега ГАНУЩАКА

### **«РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ СТИКОВОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО БАГАТОПРОХІДНОГО ЗВАРЮВАННЯ БІМЕТАЛУ «ТИТАН-СТАЛЬ» ІЗ НАНЕСЕННЯМ БАР'ЄРНИХ ПОКРИТТІВ»,**

подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі  
знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство»

#### **1. Актуальність теми дисертаційної роботи.**

Дисертаційне дослідження присвячено вивченню металургійних особливостей процесів плазово-дугового багатопрохідного зварювання біметалу титан-сталь із нанесенням бар'єрних прошарків для мінімізації або повного усунення інтерметалідних фаз (ІМФ), які зазвичай утворюються при взаємодії титану і сталі у нагрітому до певних температур стані. Вивчення зазначених металургійних особливостей дозволить створити технології одержання зварних з'єднань прийнятної якості та спроектувати відповідний зварювальний комплекс, який дозволить виготовляти біметалеві конструкції за створеною технологією. Такими конструкціями можуть бути, у першу чергу, труби для магістральних трубопроводів, призначених для транспортування газу та нафтопродуктів.

Враховуючи зазначене, можна зробити висновок, що представлена на захист робота носить актуальний науковий характер, про що свідчить також її тісний зв'язок з темами Державних науково-технічних програм, які виконувалися у відділі № 21 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Результати дисертаційної роботи пов'язані з такими науковими програмами: «Розробка адитивних технологій отримання об'ємних виробів промислового та біомедичного призначення із сплавів та біметалів методами плазово-дугового та електронно-променевого наплавлення» (№ ДР 0122U000895, 2022); «Дослідження процесів сферидизації крапель-дисперсних часток і закономірностей формування структури гранул і порошків із складнолегованих сплавів та інтерметалідів при плазово-дуговому розпиленні струмопровідних порошкових дротів» (№ ДР 0122U001952, 2022–2024); «Розробка технологій одержання новітніх титанових сплавів методами електронно-променевого плавлення та виробів з них методами прокатки і 3D друку для потреб оборони та медицини» (№ ДР 0123U100870, 2023–2024).

## **2. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.**

Автором доцільно визначено об'єкт та предмет дослідження, його мету, сформульовано завдання дослідження. В роботі виконано ґрунтовний аналіз літературних джерел з великим інформаційним ресурсом.

Зміст дисертаційної роботи дає можливість оцінити роботу, як комплексну з науковими та технологічними компонентами.

Наукові положення, сформульовані дисертантом, узгоджуються із загальними уявленнями про особливості фізико-металургійних процесів при стиковому плазмово-дуговому багатопрохідному зварюванні біметалу «титан-сталь» із нанесенням бар'єрних покриттів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, сформульованих у дисертаційній роботі, висновків та практичне значення отриманих результатів є достатньо високим.

## **3. Достовірність та наукова новизна здобутих результатів.**

Достовірність наукових положень дисертації не викликає сумніву, оскільки всі теоретичні твердження підтверджуються результатами досліджень, отриманих стандартними методиками.

Отримані в роботі результати обговорені на наукових конференціях. Представлені на захист висновки і рекомендації є обґрунтованими і достовірними, підтверджуються результатами експериментів, при проведенні яких використовувались такі сучасні методи дослідження, як математичне моделювання, аналітичні та чисельні методи дослідження фізичних явищ; технологічні та металографічні методи дослідження зварювання і наплавлення титанового і сталевих шарів, наплавлення і напилення бар'єрних захисних прошарків; оптичне і механічне вимірювання геометричних параметрів наплавлених і напилених шарів; металографічні дослідження отриманих структур за допомогою оптичної та електронної мікроскопії, а також рентгенофазового аналізу; мікродюрOMETРІчний аналіз; дослідження міцності отриманих зварних з'єднань.

До найвагоміших результатів дисертаційної роботи, які відповідають ознакам наукової новизни, можна віднести наступне:

1) Вперше встановлено закономірності впливу величини погонної енергії  $E$  на товщину перехідної зони що утворюється при взаємодії розплаву сталі із



титаном в процесах плазмового і дугового наплавлення сталі на титан і включає інтерметалідні фази Ti-Fe, а саме – при значеннях  $E$  в інтервалі 45...60 Дж/мм ця величина досягає 10...60 мкм, а збільшенні величини  $E$  до 60-100 Дж/мм формується інтерметалідні прошарки товщиною 450 мкм і більше із значною кількістю мікротріщин та інших дефектів.

2) Отримало подальший розвиток уявлення про особливості металургійної взаємодії розплаву мідних сплавів з титаном і сталлю, а саме – встановлено режими плазмово-дугового наплавлення сплаву CuSi3Mn1 на титанову пластину, які забезпечують утворення в зоні сплавлення наплавленого покриття з титаном бездефектного прошарку товщиною 20-100 мкм, та режими подальшого наплавлення сталі на це покриття, при яких взаємна дифузія елементів на межах розділу «титан-CuSi3Mn1-сталь» не призводить до утворення крихких фаз та тріщиноутворення.

3) Вперше виявлено особливості металургійної взаємодії на межі «титан – плазмово напилене сталеве покриття» при плазмово-дуговому напавленні сталевого дроту на це покриття, а саме – умови мінімізації його товщини (не менше 400 мкм) і величини погонної енергії наплавлення на це покриття (до 200...250 Дж/мм), при яких між напиленим покриттям і титаном утворюється бездефектна перехідна зона.

4) Вперше встановлено, що в результаті нагріву плазовими і дуговими зварювальним джерелами при заповненні розробки стикового з'єднання біметалу «титан-сталь» в процесі багатопрохідного зварювання до 900-1300°C в цьому біметалі зоні контакту титану і сталі в твердій фазі утворюється бездефектний інтерметалідний прошарок Fe-Ti товщиною від 1 до 10 мкм, а при подальшому підвищенні температури вище 1300°C в ньому формується інтерметалідна фаза типу  $TiFe_2$ , яка при нагріві до 1430°C переходить у суміш інтерметалідів з інтегральним хімічним складом, що відповідає формулі  $Ti_2Fe$ , та спричиняє утворення дрібних пор розміром до 0.1 мкм та підвищення мікротвердості HV 600-800.

#### **4. Практичне значення одержаних результатів.**

На основі результатів наукових досліджень, виконаних автором дисертаційної роботи, та встановлених закономірностей зроблено наступне:

1. Розроблено технологічний процес багатопрохідного стикового плазмово-дугового зварювання біметалевих пластин «титан-сталь», який забезпечує міцність отримання з'єднань до 85% міцності складових біметалу.

2. Розроблено спеціальний плазмотрон для зварювання титанового шару в U-подібній розробці.
3. Встановлені оптимальні інтервали технологічних параметрів нанесення наплавленого шару мідного кремній-марганцевого сплаву на титановий шар і подальшого наплавлення сталевго шару.
4. Розроблена методика інженерного розрахунку висоти кожного наплавленого сталевго шару при заповненні розробки стикового з'єднання біметалу «титан-сталь».
5. Розроблено структурно-апаратну схему і комп'ютерну 3D модель дослідно-промислового обладнання для багатопрхідного зварювання прямошовних швів трубних заготовок із біметалевих листів «титан-сталь», а також неповоротних стиків зварених біметалевих труб орбітальним зварюванням.
6. Результати дисертаційної роботи Олега Ганущака впроваджено в ТОВ «НВЦ ПЛАЗЕР» (Україна), при розробці та виготовленні дослідно-промислової лінії з виробництва прямошовних труб «титан-сталь».

#### **5. Повнота викладу результатів дисертаційного дослідження та наукових положень в опублікованих працях.**

Основний зміст дисертації Олега Ганущака викладений у 26 наукових працях, з них 4 статі у наукових фахових виданнях України категорії «Б», 5 статей у віднесених до першого – третього квартилів (Q1-Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal (Scopus і Web of Science) виданнях, 2 статті у закордонних наукових виданнях, 13 тез доповідей на наукових конференціях та 2 патенти.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пунктів 8 та 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року.

#### **6. Оцінка змісту дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота Олега Ганущака складається з анотації двома мовами, вступу, 5-ти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2-х додатків. Загальний обсяг роботи складає 240 сторінок машинописного тексту, в тому числі 110 рисунків, 45 таблиць, список використаних джерел із 123 найменувань на 15 сторінках да двох додатків на 8 сторінках.



Представлена дисертаційна робота присвячена дослідженню ефективності застосування бар'єрних покриттів з різних матеріалів та способів їх нанесення на титан та сталь з використанням різних способів плазово-дугового наплавлення і напилювання для мінімізації утворення інтерметалідних фаз при зварюванні встик сталевих листів, плакованих шаром титану. За результатами цього дослідження автором розроблено технології одержання таких стикових з'єднань та рекомендацій по створенню дослідно-промислового обладнання для виготовлення повздовжньошовних біметалевих труб.

*У вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні завдання дослідження, встановлено предмет та об'єкт дослідження, вказано наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, сформульовані основні положення, що винесені на захист.

*У першому розділі* приведені результати аналізу особливостей отримання зварних біметалевих з'єднань титану і сталі із використанням сучасних зварювальних технологій і технологічних прийомів. Розглянуто технологічні особливості зварювальних процесів і структурні особливості формування таких зварних з'єднань, визначено характерні дефекти їх утворення. Сформульовано базову проблематику отримання з'єднань титану і сталі зварюванням плавленням. На основі проведеного аналізу визначені мета та завдання досліджень.

*Другий розділ* присвячений опису застосованих стандартизованих та оригінальних методів проведення дослідження, наведені опис та характеристики обраних матеріалів, технологічного зварювального обладнання для проведення експериментів і металографічних досліджень.

*В третьому розділі* приведено технологічні і металографічні дослідження для виявлення ступеню впливу дугового або плазово-дугового джерела наплавлення сталевих шару на титановий шар, встановлено залежність параметрів формування ІМФ прошарку від погонної енергії зварювального процесу. З урахуванням отриманих даних обрано найбільш перспективні зварювальні та споріднені технології для наплавлення і напилювання бар'єрних шарів, призначених для усунення ІМФ прошарку. Проведено низку технологічних експериментів з наплавлення і напилювання титанових матеріалів бар'єрних прошарків із наступним наплавленням тонкого (1-2 мм) сталевих шару. Проведено металографічні дослідження структуроутворення після нанесення бар'єрних покриттів на титан, після нанесення бар'єрних покриттів на

сталь і після наплавлення тонкого сталевого шару на нанесені покриття. Обрано найбільш перспективні матеріал і технологію нанесення на титан бар'єрного покриття із наступним наплавленням сталевого шару.

*У четвертому розділі* дисертаційної роботи досліджено структурні особливості вихідних зразків біметалу «титан – сталь», з яких надалі планується зварювати трубні конструкції. Приведені результати математичного і фізичного моделювання процесу нагріву в твердій фазі зразків біметалевого листа титан-сталь, який відбувається при дуговому або плазмово-дуговому зварюванні. Проаналізовано особливості утворення ІМФ у твердій фазі залежно від температури нагріву ЗТВ при зварюванні та виконано оцінку небезпеки таких ІМФ з позицій подальшої експлуатаційної стійкості зварюваних конструкцій.

*У п'ятому розділі* представлені результати робіт із практичної реалізації проведених досліджень, а саме: розроблено низку технологій, послідовне застосування яких дозволяє одержати зварне з'єднання біметалу «титан-сталь» прийнятної якості, розроблено структурно-апаратні схеми і сконструйовано відповідне обладнання для практичної реалізації розроблених технологій.

**Висновки** дисертаційної роботи в достатній мірі відображають найважливіші її наукові та практичні результати.

Автором дисертації усі наукові результати одержано самостійно.

Дисертацію виконано на високому науково-технічному рівні, вона містить достатній обсяг виконаних досліджень та оформлена згідно з вимогами до змісту і об'єму дисертаційних робіт.

Зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 132 - «Матеріалознавство» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

## **7. Академічна доброчесність.**

Ознак порушення дисертантом вимог академічної доброчесності в представлений роботі та публікаціях, у яких висвітлені основні її наукові результати, не виявлено.

## **8. Зауваження до дисертації.**

В цілому дисертаційна робота справляє добре враження, проте є наступні зауваження:

1) Як зазначає автор у першому розділі, з літератури є відомим явище утворення інтерметалідних фаз при наплавленні сталевого шару на титан. У зв'язку з цим описані у пункті 3.1 дослідження з наплавлення сталі на титан



виглядають недостатньо обґрунтованими.

2) В своїй роботі автор досліджує низку бар'єрних покриттів, які наносяться двома основними способами – плазово-дуговим наплавленням і напилюванням. Металургійні процеси, що відбуваються при плазово-дуговому наплавленні досліджені задовільно, проте описаним у пункті 3.3 процесам, що відбуваються при плазовому напилюванні із наступним наплавленням сталевго шару, приділено мало уваги.

3) Серед описаних у розділі 2 процесів наплавлення сталевго дроту ER70S у тому числі обрано процес наплавлення з дугою плавкого електроду. З тексту роботи не зрозуміло, який саме процес мається на увазі – MAG наплавлення постійним струмом або імпульсний процес Pulse-MAG наплавлення.

4) У розділі 5 по суті наведено опис базових технологічних прийомів, які можуть бути покладені в основу подальшого створення технологічних процесів виготовлення зварних труб і магістральних трубопроводів. Це не відповідає заявленій у назві цього розділу розробці технологій зварювання труб з біметалевого листа «титан – сталь», оскільки розробка технологій має за мету прив'язку до певного виробу чи конструкції.

5) Частина рисунків з фотографіями мікроструктури у розділах 3 та 4 наведені без розмірних маркерів чи вказання збільшення, наприклад 3.20, 3.27.г, 3.32.

6) На наведених у Додатку А технологічних схемах, використовується шрифт дуже малого розміру, що обмежує правильність сприйняття та можливість оцінювання даних технологічних схем.

Наведені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки розглянутої дисертаційної роботи.

## **ВИСНОВОК**

Дисертаційна робота Ганущака Олега Васильовича на тему «Розробка технології стикового плазово-дугового багатопрхідного зварювання біметалу «титан-сталь» із нанесенням бар'єрних покриттів» є самостійною та завершеною науково-дослідною роботою, яка у сукупності може бути охарактеризована як успішне вирішення важливої науково-технічної задачі.

За змістом, актуальністю отриманих результатів, науковою новизною, достовірністю та практичною цінністю дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 6, 8, та 9 «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової

установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 року, а її автор – Ганущак Олег Васильович – заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Рецензент:

Завідувач відділу №77

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України,

к.т.н., с.д.

Артемій БЕРНАЦЬКИЙ

Підпис завідувача відділу №77 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, кандидата технічних наук, старшого дослідника Артемія Бернацького засвідчую.

Учений секретар

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

к.т.н., с.д.



Ілля КЛОЧКОВ