

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Лагодзінського Івана Миколайовича

на тему «Адитивне дугове наплавлення просторових виробів присадними дротами зі сталей та сплавів», що

представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 – Механічна інженерія

за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації.

Розвиток промисловості та сфери машинобудування вимагає пошуку нових підходів до оптимізації процесів виготовлення одиниць продукції починаючи з її проектування та закінчуючи виготовленням готового виробу. У зв'язку з цим, технології адитивного синтезу стало розвиваються як спосіб значного скорочення технологічного ланцюга у сучасному промисловому виробництві. Враховуючи перспективність застосування адитивних технологій не лише у сфері швидкого прототипування виробів, але й при серійному виробництві, широкого застосування набули способи адитивного синтезу із застосуванням дугового пошарового наплавлення або WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) технології.

Використання способів GMAW (Gas Metal Arc Welding) наплавлення забезпечує досить високі швидкості наплавлення та техніко-економічні показники за рахунок використання відносно простого обладнання. Однак, існують суттєві недоліки використання даного способу пошарового наплавлення у вигляді нерівномірності отриманої поверхні виробу. Застосування методів подачі імпульсного зварювального струму та використання зварювання з короткими замиканнями – CMT (Cold Metal Transfer), дозволяють регулювати процес металопереносу та розширити номенклатуру використовуваних присадних матеріалів. Однак, окрім регулювання технологічних параметрів процесу наплавлення, на формоутворення кожного окремого шару металу можна впливати за допомогою зміни хімічного складу захисних газових сумішей. На даний час існують дослідження з цього напрямку, однак питання щодо комплексного впливу методів подачі зварювального струму та захисного газового середовища на формоутворення поверхонь при пошаровому адитивному наплавленні залишається малодослідженим, а наявні відомості мають суперечливий характер.

Разом із цим існує брак наукових відомостей про використання мідних сплавів, а саме кремнієвих бронз для адитивного процесу. Аналогічно до питань застосування адитивних процесів у сфері ремонтного відновлення частин машин та механізмів, актуальним є питання застосування матеріалів на основі нікелю, що використовуються для виготовлення елементів газотрубінних двигунів.

Визначення компонент напружено-деформованого стану (НДС) у процесах адитивного виробництва є досить важливим, оскільки дозволяє спрогнозувати та уникнути утворення дефектів у готовому друко-зварному виробі.

Вищезгадане свідчить, що проведення комплексних експериментальних та розрахункових досліджень щодо впливу різних методів, технологічних параметрів режимів та умов процесів дугового адитивного наплавлення, а також складу захисного газового середовища на характеристики виробів є актуальним завданням.

Про актуальність теми роботи свідчить також її зв'язок з науковою тематикою, зокрема дисертаційна робота виконана в рамках ініціативної наукової теми кафедри зварювального виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського «Дослідження впливу зварювальних теплових, термомеханічних, статистичних процесів на структуру, технологічну міцність, якість металевих і композиційних матеріалів при зварюванні та адитивних технологіях» (2021-2022 рр., керівник – д.т.н, проф. Квасницький В.В.). Здобувач брав безпосередню участь у виконанні робіт у якості виконавця.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- Вперше встановлений комплексний вплив GMAW методів дугового наплавлення та складу захисного газового середовища на формування просторових виробів з низьковуглецевої сталі, а також досліджений вплив на структуру і механічні властивості отриманого наплавленого металу. Результати представлені у порівнянні з класичним плазмовим наплавленням з подачею «холодного» присадного дроту.

- Здобувачем виконаний аналіз експериментальних даних та вперше встановлено, що при наплавленні з короткими замиканнями (СМТ метод) з використанням присадних дротів з низьковуглецевих сталей у порівнянні у порівнянні з імпульсною подачею струму та плазмовим наплавленням (PAW-CW) забезпечується формування мінімальної ширини та найбільшої висоти для кожного окремого валика. Використання суміші з більшим вмістом CO_2 (суміш M21) призводить до збільшення ефективної ширини адитивнонаплавлених валиків просторового виробу у порівнянні з сумішшю M11, ширина збільшується від 3,6 до 4 мм з одночасним зменшенням висоти наплавлених шарів до 10%. Заміна захисної газової суміші M21 на M11 призводить до збільшення відхилення профілю від 45% до 47%.

- Встановлено, що адитивне дугове наплавлення низьковуглецевої сталі з імпульсною подачею струму забезпечує формування стінок виробів мінімальної висоти, а ефективна ширина стінок навпаки досягає максимальних значень. Заміна газової суміші M11 на M21 призводить до зменшення ефективної ширини стінок з одночасним зменшенням відхилення профілю на $\approx 23\%$. Відхилення профілю при PAW-CW способі адитивного дугового наплавлення є мінімальним у порівнянні з іншими розглянутими способами та складає близько 0,35 мм.

- Здобувачем проведено скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану при адитивному GMAW та GMAW-Pulse наплавленні кремнієвої бронзи. Встановлено, що виникнення дефектів типу тріщин пов'язане з формуванням напружень розтягу, які перевищують границю

міцності матеріалу на 13...25 % на етапі охолодження останнього шару в інтервалі температур 550...490 °C.

- Вперше встановлено, що при адитивному PAW-CW наплавленні прутків жароміцного нікелевого припою SBM-4 на нікелевий дисперсійнотвердіючий жароміцний сплав ЧС88УВІ спостерігається суттєве зростання напружень розтягу на границі розподілу основа-перший наплавлений шар. Аналіз результатів скінченно-елементного моделювання формування компонент напружено-деформованого стану свідчить, що їх величина досягає межі міцності матеріалу. Розрахунковим шляхом, з експериментальним підтвердженням, встановлено, що попередній нагрів основи до температур 150 °C дозволяє зменшити величину напружень розтягу та забезпечує уникнення утворення дефектів типу тріщин та відшарувань.

Наукова новизна дисертаційної роботи сформульована чітко, зрозуміло викладена, що повністю розкриває її сутність.

Обґрунтованість та достовірність основних наукових положень, висновків і рекомендацій роботи підтверджується вагомими критеріями, а саме:

- верифікацією та доброю збіжністю результатів аналітичних, обчислювальних та експериментальних досліджень;

- застосуванням широкого спектру сучасних методів та стандартизованих методик досліджень, зокрема методів оптичної та електронної мікроскопії, методів інструментальних вимірювань, комп'ютерного скінченно-елементного моделювання, результатами механічних випробувань, використанням сучасного дослідного обладнання;

- значним обсягом даних отриманих шляхом проведення прямих практичних дослідів;

- наявністю публікацій у спеціалізованих фахових виданнях з Прикладної механіки та апробацією основних результатів роботи на національних 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.

Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання щодо встановлення закономірностей впливу способів дугового наплавлення, складу захисного газового середовища та умов ведення процесу на формування та геометричні характеристики, структуру, утворення напружень та деформацій, фізико-механічні властивості просторових виробів з низьковуглецевих сталей та кольорових металів виконане автором в повному обсязі, здобувач повною мірою оволодів методологією наукових досліджень та продемонстрував високі фахові компетентності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

Представлена дисертаційна робота Лагодзінського І.М. за своїм змістом повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 131 – Прикладна

механіка та напрямкам досліджень, що визначені в освітній програмі Прикладна механіка.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Прикладна механіка».

За результатами розгляду звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння можна зробити висновок, що дисертаційна робота Лагодзінського Івана Миколайовича є результатом самостійних наукових досліджень здобувача. Вона не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані здобувачем ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота грамотно написана українською мовою. Представлені результати виконаних досліджень логічно розподілені здобувачем за розділами. Графічний матеріал представлений фотографіями, ілюстраціями та графіками, що демонструють результати комплексних експериментальних та розрахункових досліджень.

Дисертаційна робота викладена на 188 сторінках і складається із вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та 1 додатка. Дисертація містить 117 рисунків, 17 таблиць, список літератури із 109 найменувань на 13 сторінках, одного додатку на 4 сторінках.

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми, розкриваються мета та завдання дослідження, описуються методи та методики його проведення, формулюється наукова новизна та практична цінність результатів.

У **першому** У першому розділі дослідження проведено аналіз сучасного стану технологій адитивного виробництва з використанням WAAM. Виявлено недостатньо досліджені аспекти впливу складу захисного газового середовища на результати дугового адитивного виробництва, особливо в контексті поєднання методів GMAW-CMT, GMAW-Pulse та плазмового наплавлення. Здобувачем обґрунтовано перспективність використання компактних матеріалів, таких як дроти з суцільним перетином, для виготовлення та ремонту деталей з кремнієвих бронз та жароміцних нікелевих сплавів за допомогою дугових способів наплавлення. Також розглянуто поточний стан методів скінченно-елементного моделювання, що дозволяє прогнозувати напружено-деформований стан виробів, виготовлених за допомогою адитивного виробництва. На основі проведеного аналізу сформульовано мету та завдання досліджень.

У **другому** розділі дисертації описано методику проведення експериментальних досліджень, спрямованих на визначення геометричних характеристик наплавлених шарів, аналіз структури та фізико-механічних властивостей металу, визначення хімічного складу та властивостей використовуваних матеріалів. Також у цьому розділі подано опис та характеристики лабораторного обладнання для проведення наплавлення, досліджень структури та механічних властивостей, а також визначення термічних циклів дугового адитивного наплавлення. Покрім того, розглянуто

методику скінченно-елементного аналізу формування компонент напружено-деформованого стану та верифікації отриманих розрахункових результатів. Додатково, автором запропоновано технологічні рекомендації та обрано необхідне обладнання для виготовлення прутків з малопластичних матеріалів на основі нікелю.

У **третьому** розділі проведено експериментальне дослідження процесу пошарового наплавлення низьковуглецевої сталі за допомогою методів GMAW-CMT/Pulse та плазмового наплавлення в різних газових середовищах. Аналіз даних встановив вплив зміни складу газового середовища та методу подачі зварювального струму на геометричні характеристики виробів. Проведено дослідження впливу методів GMAW наплавлення на геометричні характеристики виробів з алюмінієвих сплавів, аустенітних нержавіючих сталей та кремнієвих бронз. Ці дослідження дозволили розширити розуміння впливу методів подачі зварювального струму на формування геометричних характеристик виробів під час адитивного синтезу. Також описано дослідження можливості адитивного процесу плазмовим способом наплавлення за допомогою прутків з жароміцних нікелевих сплавів згідно з запропонованою автором методикою.

У **четвертому** розділі проаналізовано вплив методів GMAW-CMT/Pulse наплавлення та зміни захисного газового середовища на структуру і механічні властивості металу зразків з низьковуглецевої сталі. Автором описані закономірності формування структури, виникнення дефектів та розподіл мікротвердості зразків з низьковуглецевої сталі, кремнієвої бронзи та жароміцного нікелевого сплаву.

У **п'ятому** розділі побудовано та досліджено скінченно-елементні моделі для компонент напружено-деформованого стану виробів, отриманих методом адитивного дугового наплавлення кремнієвої бронзи та жароміцного сплаву на основі нікелю. Проведено комп'ютерне моделювання і аналіз результатів, виявлено причини виникнення дефектів та їх зв'язок з методами подачі зварювального струму. Описано зв'язок між дефектами та формуванням напружено-деформованого стану у процесі та після виготовлення просторового виробу. Також досліджено термодформаційні процеси при плазмовому наплавленні жароміцного нікелевого припою SBM-4. Для верифікації моделей виконано практичний дослід і процедуру співставлення практичних та теоретичних даних.

У **шостому** розділі представлені технологічні рекомендації для адитивного виготовлення з використанням електричної дуги та компактних присадних матеріалів, у поєднанні з методами імпульсної подачі струму та коротких замикань. Також викладено методику визначення технологічних втрат металу при фінішній механічній обробці виробів, отриманих за різними методами дугового адитивного наплавлення. Автором описано розроблену комп'ютеризовану установку для адитивного наплавлення з числовим програмним керуванням. Також, наведено приклади виготовлених виробів, що були адитивно наплавлені за допомогою вказаних технічних рекомендацій.

Висновки дисертації відображають найважливіші наукові та практичні результати роботи, в якій наведене нове вирішення актуального науково-

технічного завдання, що полягає у встановленні закономірностей впливу способів дугового наплавлення, складу захисного газового середовища та умов ведення процесу на формування та геометричні характеристики, структуру, утворення компонент напружень та деформацій, фізико-механічні властивості просторових виробів з низьковуглецевих сталей та кольорових металів.

Висновки сформульовані конкретно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертаційної роботи висвітлені у 4 наукових публікаціях здобувача, зокрема в 3 статтях у наукових виданнях, що включені до переліку наукових фахових видань України та 1 статті у періодичному науковому виданні, яке індексується у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus та віднесено до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації пройшли апробацію на 8 наукових фахових конференціях.

При підготовці публікацій автор неухильно дотримувався принципів академічної доброчесності. В представленій дисертації наведений перелік опублікованих за темою дисертації робіт з наведенням особистого внеску здобувача при проведенні наукових досліджень та підготовці наукових публікацій із співавторами.

Таким чином, описані в дисертаційній роботі наукові результати повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У поданій дисертації немає порівняльної оцінки нової технології адитивного наплавлення з традиційними способами отримання шаруватої композиції дуговим наплавленням. Бажана також конкретика при проведенні порівняльної оцінки досліджених у дисертації способів адитивного наплавлення між собою.

2. Для оцінки напружено-деформованого стану використовується розрахунково-експериментальний підхід, але в розрахунках необхідні або довідкові дані про фізичні параметри, або експериментальні дані. Зокрема, це стосується модуля пружності E , значення якого у кожному наплавленому шарі відрізняються, що вносить похибку до розрахунків.

3. У дисертації йдеться про дефекти типу тріщин. Однак при пошаровому нарощуванні матеріалу специфічні властивості кожного шару і композиції в цілому змінюються. Змінюється також напружено-деформований стан по перерізу композиції, і, отже, умови зародження тріщин по перерізу відрізняються. Відрізняється такий важливий показник, як тріщиностійкість, механізм зародження тріщин різний. Бажано було б у роботі представити аналіз тріщиноутворення, враховуючи пошарове наплавлення.

4. Отримана при адитивному наплавленні шарувата композиція характеризується конкретним складом, ступенем неоднорідності, кількістю шарів, градієнтом властивостей на границях. В роботі бажано було би більш

конкретніше розкрити питання розрахунку розподілу температурного поля по перерізу такого достатньо товстого наплавленого шару.

Однак, вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Лагодзінського Івана Миколайовича на тему «Адитивне дугове наплавлення просторових виробів присадними дротами зі сталей та сплавів» виконана на високому науковому рівні, вона не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має суттєве значення для галузі знань Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, які наведені в п.п. 6 – 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 від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Лагодзінський Іван Миколайович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Рецензент:

професор кафедри
зварювального виробництва
Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
доктор технічних наук, професор

 Вячеслав КОПИЛОВ

Підпис професора кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н, проф. Копилова Вячеслава Івановича засвідчую:

Вчений секретар

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



 Валерія ХОЛЯВКО

«28» травня 2024 року