

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Лагодзінського Івана Миколайовича

на тему «**Адитивне дугове наплавлення просторових виробів
присадними дротами зі сталей та сплавів**», яка представлена на здобуття
ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія
за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації.

Стрімкий розвиток промисловості вимагає удосконалення технологічного процесу для виготовлення чи відновлення машин або їх частин. Технології адитивного виробництва набувають досить широкого застосування як спосіб значного скорочення технологічного ланцюга при виготовленні продукції, що дозволяє заощаджувати значні як матеріальні так і часові ресурси. Використання методів адитивного синтезу, зокрема заснованих на способах дугового наплавлення або технологій WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), стають дедалі популярнішими як в сенсі швидкого прототипування виробів та конструкцій, так і в технологічних процесах серійного виробництва.

Використання методів GMAW (Gas Metal Arc Welding) дозволяє досягти високих швидкостей наплавлення та забезпечити економічно вигідні показники завдяки використанню простого обладнання. Проте згадані методи мають і певні недоліки, такі як нерівномірність отриманої поверхні виробу, схильність до утворення дефектів та значний рівень залишкових напружень та деформацій, що виникають під дією термічного циклу пошарового адитивного наплавлення. Застосування методів регульованої імпульсної подачі зварювального струму (Pulse процес) та Cold Metal Transfer (CMT процес) дозволяє регулювати умови металоперенесення та суттєво розширює номенклатуру використовуваних присадних компактних матеріалів. Проте, питання комплексного впливу методів подачі зварювального струму, складу захисного газового середовища, технологічних параметрів та умов ведення процесу пошарового наплавлення на формування поверхонь при адитивному дуговому синтезі деталей та виробів залишаються малодослідженими, а наявні в літературі відомості мають суперечливий характер, що визначає актуальність теми представленої дисертаційної роботи. Також існує нестача науково підтверджених відомостей щодо можливості та особливостей використання сплавів на основі міді, зокрема кремнієвих бронз, та на основі нікелю для реалізації процесів адитивного виробництва деталей.

Визначення компонент напружено-деформованого стану у процесах адитивного виробництва є важливим завданням, оскільки дозволяє прогнозувати та уникати неприпустимих дефектів, виникнення яких у готових виробах, пов'язане з особливостями розвитку термодеомаційних процесів під дією термічного циклу пошарового дугового наплавлення. Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) під час використання WAAM технологій, в основному, присвячені матеріалам, які поширені у промисловості та являють собою низьковуглецеві сталі. Тому дослідження параметрів та

компонент НДС із застосуванням інших груп або специфічних матеріалів є досить актуальним.

Наведене вище дозволяє стверджувати, що проведення комплексних експериментальних та розрахункових досліджень щодо визначення впливу різних методів, технологічних параметрів та умов ведення процесів дугового наплавлення, а також складу захисного газового середовища на характеристики сформованих наплавленням шарів, структуру, величину компонент НДС та показники міцності наплавленого металу виробів залишається актуальною задачею.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- автором вперше встановлений комплексний вплив GMAW-CMT, GMAW-Pulse та PAW-CW способів дугового наплавлення та складу захисного газового середовища на формоутворення стінок виробів з низьковуглецевої сталі G3Si1, структурну будову та фізико-механічні властивості наплавленого металу;

- на основі порівняльного аналізу експериментальних даних, здобувачем вперше встановлено, що GMAW-CMT адитивне дугове наплавлення компактного присадного матеріалу у вигляді дроту суцільного перерізу з низьковуглецевої сталі G3Si1 забезпечує формування стінок виробів найбільшої висоти та найменшої товщини у порівнянні з GMAW-Pulse та PAW-CW способами. Наплавлення в газовій суміші M21 призводить до збільшення ефективної ширини у порівнянні з сумішшю M11, яке складає ~ 4 мм та $\sim 3,6$ мм відповідно, зменшенню висоти наплавлених шарів на ~ 10 %. Заміна захисної газової суміші M21 на M11 призводить до збільшення відхилення профілю на 45...47 %;

- експериментально, автором встановлено, що при GMAW-Pulse адитивному дуговому наплавленні низьковуглецевої сталі G3Si1 висота стінок є мінімальною, а ефективна ширина досягає максимальних значень у порівнянні з GMAW-CMT та PAW-CW способами. Заміна газової суміші M11 на M21 призводить до зменшення ефективної ширини стінок з одночасним зменшенням відхилення профілю на ≈ 23 %. Відхилення профілю при PAW-CW способі адитивного дугового наплавлення є мінімальним і становить близько 0,35 мм;

- вперше автором виконаний скінченно-елементний аналіз компонент напружено-деформованого стану при пошаровому GMAW та GMAW-Pulse наплавленні кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 на базі моделі об'ємного виробу складної геометричної форми. Здобувачем проаналізовані отримані дані розрахунків та встановлено, що виникнення тріщин у наплавленому металі пов'язане з формуванням нормальних та еквівалентних напружень розтягу, які за своєю величиною вищі за границю міцності матеріалу на $\approx 13 - 25\%$ в діапазоні температур 550...490 °C;

- за результатами скінченно-елементного моделювання утворення компонент напружено-деформованого стану при адитивному PAW-CW наплавленні прутків жароміцного нікелевого сплаву SBM-4 на нікелевий дисперсійнотвердіючий жароміцний сплав ЧС88УВІ, автором вперше

встановлено, що на ділянках різкої зміни траєкторії наплавлення ($r < 3 - 5$ мм) величина напружень розтягу в області сплавлення з основою досягає границі міцності матеріалу. Розрахунковим шляхом, з експериментальною верифікацією результатів скінчено-елементного моделювання автором встановлено, що застосування попереднього підігріву основи до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, дозволяє зменшити рівень залишкових напружень та уникнути утворення дефектів.

Положення наукової новизни повністю відповідають завданням, поставленим перед науковою роботою, вони узгоджуються з існуючими науковими концепціями щодо впливу термодеоформаційних процесів на формування структури та компонент напружено-деформованого стану при наплавленні та не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та закономірностями. Сформульовані автором наукові положення, висновки та рекомендації є обґрунтованими, що підтверджується результатами чисельних експериментальних та верифікованих розрахункових досліджень, доброю збіжністю результатів скінчено-елементного моделювання з результатами прямих вимірювань. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в фахових наукових виданнях та пройшли апробацію на міжнародних конференціях з прикладної механіки, зварювання та споріднених процесів і технологій.

Наукові дослідження виконані здобувачем в рамках реалізації ініціативної наукової теми «Дослідження впливу зварювальних теплових, термомеханічних, статистичних процесів на структуру, технологічну міцність, якість металевих і композиційних матеріалів при зварюванні та адитивних технологіях», що виконувалась в період 2021–2022 рр. на кафедрі зварювального виробництва під керівництвом завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доктора технічних наук, професора Квасницького Віктора Вячеславовича. Здобувач брав безпосередню участь у виконанні досліджень в якості виконавця.

Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання щодо встановлення закономірностей впливу методів дугового наплавлення, складу захисного газового середовища та умов ведення процесу адитивного наплавлення на геометричні, механічні та структурні характеристики виробів з низьковуглецевих сталей та кольорових сплавів, виконане в повному обсязі. Результати аналізу комплексних теоретичних та експериментальних досліджень, якість їх виконання та узагальнення свідчать, що здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності та має передбачені стандартом та освітньо-науковою програмою підготовки докторів філософії зі спеціальності Прикладна механіка 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 освітньо-науковій програмі підготовки докторів філософії Прикладна механіка.

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

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. Представлена дисертаційна робота не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані здобувачем ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела літератури.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана грамотно українською мовою. Результати проведених автором досліджень добре систематизовані та логічно розподілені на окремі розділи, що сприяє повному розумінню суті виконаних наукових досліджень.

Дисертаційна робота включає в себе вступ, 6 розділів, загальні висновки, список використаної літератури з 109 джерелами та 1 додаток. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 188 сторінок.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, наведені мета та задачі дослідження, методи та методики їх проведення, сформульовані наукова новизна та практична цінність результатів досліджень.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану адитивних дугових технологій, зокрема, впливу технологічних параметрів процесу на геометричні характеристики адитивно наплавлених виробів. Встановлено, що інформація щодо комплексного впливу складу захисного газового середовища на дугове адитивне наплавлення не достатньо розкрита на даний час. Також описується доцільність та актуальність застосування адитивного процесу для виготовлення деталей з кремнієвих бронз та нікелевих сплавів із застосуванням електричної дуги як джерела тепла. Автором розглянуто сучасний стан методів скінченно-елементного моделювання процесу адитивного виготовлення та доцільність досліджень у цьому напрямку.

У другому розділі описуються методики експериментальних досліджень, зокрема, визначення геометричних характеристик адитивно наплавлених шарів та їх фізико-механічних властивостей. Наведено опис та характеристики лабораторного обладнання, методи визначення термічних циклів адитивного дугового наплавлення та скінченно-елементного аналізу формування компонент напружено-деформованого стану і верифікації теоретичних розрахунків. Також надаються технологічні рекомендації та вибір обладнання для виготовлення прутків з малопластичних нікелевих сплавів.

У третьому розділі досліджено процес пошарового наплавлення низьковуглецевої сталі за допомогою методів GMAW-CMT/Pulse у поєднанні з різними захисними газовими сумішами на основі аргону та PAW-CW наплавлення в аргоновому середовищі. В результаті аналізу отриманих даних встановлено вплив зміни складу газового середовища та методу подачі зварювального струму на формування та геометричні характеристики стінок виробів. Проведено експерименти з встановлення впливу методів GMAW-

СMT/Pulse наплавлення на геометричні параметри виробів із алюмінієвих сплавів, аустенітних нержавіючих сталей та кремнієвих бронз. Аналіз та узагальнення цих даних дозволили розширити розуміння впливу методів подачі зварювального струму на формування геометричних параметрів стінок виробів у процесі адитивного синтезу. Також, показано можливість виготовлення просторових виробів плазмовим способом наплавлення за допомогою прутків жароміцного нікелевого сплаву з використанням методики, запропонованої автором.

У четвертому розділі досліджено вплив умов застосування методів GMAW-CMT/Pulse наплавлення та зміни захисного газового середовища на формування структури і механічних властивостей металу у виробках із низьковуглецевої сталі, а також використання методу подачі зварювального струму (GMAW-CMT/Pulse) під час наплавлення кремнієвих бронз. Встановлені закономірності у формуванні структури, виникнення дефектів, та розподілу мікротвердості в наплавленому металі при адитивному формуванні металевих виробів.

У п'ятому розділі побудовані розрахункові скінченно-елементні моделі, проведене комп'ютерне моделювання та здійснений аналіз результатів скінченно-елементного моделювання компонент напружено-деформованого стану просторових виробів під час адитивного дугового наплавлення кремнієвої бронзи та жароміцного сплаву на основі нікелю у формі компактного присадного матеріалу. Для підтвердження адекватності результатів попередніх розрахунків та можливості їх подальшого застосування проведена верифікація розробленої скінченно-елементної моделі та результатів комп'ютерного моделювання, порівнявши їх збіжність з отриманими експериментальними даними.

У шостому розділі сформульовані технологічні рекомендації щодо процесу пошарового адитивного виготовлення просторових виробів за допомогою електричної дуги як джерела нагріву та компактного присадного матеріалу (дротів та прутків суцільного перетину). Автором запропоновано методику визначення технологічних втрат металу під час фінішної механічної обробки виготовлених різними способами адитивного дугового наплавлення просторових виробів.

Відображені в науковій новизні, висновках по розділах та загальних висновках по роботі результати наукових досліджень отримані автором самостійно та викладені послідовно, зрозуміло та лаконічно з використанням загальноприйнятої наукової термінології та стандартизованих термінів, що забезпечує повне розуміння та легке сприйняття представлених результатів досліджень. Результати роботи не мають протиріч з сучасними уявленнями та існуючими науковими концепціями. Представлений фотографіями, скріншотами, графіками та загальними ілюстраціями графічний матеріал дисертаційної роботи є зрозумілим та відбиває найважливіші результати чисельних теоретичних та експериментальних досліджень, які отримані безпосередньо автором шляхом прямих експериментів на реальних зразках, скінчено-елементним моделюванням та інструментальними вимірюваннями.

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 з Прикладної механіки, зварювання та наплавлення.

При підготовці публікацій автор неухильно дотримувався принципів академічної доброчесності. В дисертаційній роботі представлений перелік опублікованих за темою дисертації робіт з чітким визначенням особистого внеску здобувача як при проведенні наукових досліджень, так і при підготовці наукових публікацій у співавторстві. Це дозволяє стверджувати, що представлені в дисертаційній роботі наукові результати повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. З роботи не зрозуміло принцип вибору матеріалів дослідження, адже в деяких розділах зазначається тільки про сплави на основі міді та нікелю, а в деяких про низьковуглецеві сталі та алюмінієві сплави.
2. Відсутня системність в описанні методики досліджень, наприклад, описано методику підготовки шліфів для низьковуглецевих сталей і кремнієвої бронзи, проте немає сплавів на основі нікелю. Так само по механічних властивостях, на випробування підготовлено тільки низьковуглецева сталь, а інших сплавів немає.
3. З рисунку 3.13 важко зрозуміти глибину розчинення припоєм основного металу, адже за розміром шкали 2 мм оцінити зміни з 100 мкм до 244 мкм при збільшенні температури в межах 15 °C (1220-1235 °C) досить проблематично.
4. В розділі 4.1 автор за результатами металографічного аналізу робить припущення, що в структурі наявні оксидні та силікатні включення, для підтвердження цього твердження бажано було зробити рентгенофазовий аналіз матеріалів. Це також дало б можливість визначити склад включень на рисунку 4.3.
5. На рисунку 4.37 автор наводить графічні залежності мікротвердості наплавлених зразків з кремнієвої бронзи за трьома точками, що не є коректним, варто було навести дані у вигляді гистограми.
6. В роботі присутні деякі орфографічні та стилістичні помилки, наприклад на сторінці 67 «...рекомендації по виготовленню прутнів з малопластичних металів та сплавів»

Однак, наведені зауваження не є визначальними та не зменшують загальну наукову новизну та високу практичну значимість результатів роботи, не впливають на позитивну оцінку представленої 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 ступеня доктора філософії у галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Рецензент:

професор кафедри
високотемпературних матеріалів
та порошкової металургії
КПІ ім. Ігоря Сікорського
доктор технічних наук, професор



Анатолій МІНІЦЬКИЙ

«28» травня 2024 року

