

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Лагодзінського Івана Миколайовича

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

представлена на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 13 – Механічна інженерія
за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації.

За останні 10-15 років технології адитивного синтезу набули стрімкого розвитку. На початкових етапах свого розвитку ці технології розглядалися як засоби, які значно скорочують технологічний ланцюг від проектування моделі виробу до отримання готового робочого прототипу. Це сприяло розвитку основ та принципів швидкого прототипування, які полягають у поєднанні різних типових процесів виготовлення в єдиний технологічний процес або установку. Такий підхід дозволяє виготовляти зразки виробів або конструкцій різного рівня складності та точності з відносно високою швидкістю та без додаткових витрат на попередню підготовку чи оснащення виробництва.

Технологія Gas Metal Arc Welding (GMAW), відома також як наплавлення плавким електродом у середовищі захисних газів, отримала значний розвиток та застосування в адитивному процесі. Однак застосування дугових джерел тепла в процесі пошарового наплавлення супроводжується нерівномірністю формування наплавлених шарів. Це призводить до збільшення кількості відходів наплавленого металу під час кінцевої механічної обробки заготовки виробу, а також збільшує ризик утворення дефектів під впливом термічного циклу зварювання/наплавлення. Порівняно з виготовленими в заводських умовах матеріалами, фізико-механічні характеристики металу адитивно наплавлених шарів можуть бути нижчими. Також при адитивному формуванні виникає проблема деформацій виробу. Одним із можливих способів контролю точності формування виробів під час пошарового адитивного дугового наплавлення є вибір відповідного захисного газового середовища або спеціальних методів подачі зварювального струму. В деяких дослідженнях доведено перспективність використання імпульсного зварювального струму у поєднанні з різними газовими сумішами та показаний їх вплив на геометричні характеристики адитивно наплавлених виробів. Проте, питання впливу імпульсної подачі зварювального струму у поєднанні з різними за складом захисними газовими середовищами та технології плазово-дугового адитивного наплавлення на формування поверхневих шарів металу, його структуру, формування залишкових напружень та деформацій ще не вивчені достатньо. Вивчення згаданих процесів є актуальним, оскільки структурно-фазовий склад, формування напружено-деформованого стану чинять визначальний вплив на рівень фізико-механічних властивостей металу готових виробів з низьковуглецевих сталей та кольорових металів, визначають схильності наплавленого металу до утворення критичних дефектів. Особливий інтерес викликають дослідження із застосуванням мідних сплавів в адитивному

процесі, оскільки існують певні проблеми при пошаровому наплавленні таких матеріалів. Окрім того, експериментальне визначення компонент напружено-деформованого стану (НДС) адитивно наплавлених виробів є складним та витратним процесом, однак вкрай необхідним для розуміння кінетики розподілу напружень та визначення шляхів уникнення можливого утворення небажаних дефектів. Отже, проведення комплексних експериментальних та розрахункових досліджень щодо визначення впливу різних методів, технологічних параметрів режимів та умов процесів дугового наплавлення, а також складу захисного газового середовища на характеристики виробів є актуальною задачею. Це важливо як для наукових, так і для практичних цілей.

Про актуальність теми роботи здобувача Івана Лагодзінського свідчить також її зв'язок з ініціативною науковою темою кафедри зварювального виробництва «Дослідження впливу зварювальних теплових, термомеханічних, статистичних процесів на структуру, технологічну міцність, якість металевих і композиційних матеріалів при зварюванні та адитивних технологіях». У виконанні досліджень за темою здобувач брав безпосередню участь в якості виконавця.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- автором у ході досліджень вперше встановлений комплексний вплив дугових методів наплавлення з імпульсною подачею струму, технології дугового наплавлення з короткими замиканнями (СМТ-процес) та складу захисного газового середовища на формоутворення друко-зварних виробів з низьковуглецевої сталі, структурну будову та фізико-механічні властивості адитивно сформованого металу.

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

- автором встановлено, що при GMAW-Pulse адитивному дуговому наплавленні низьковуглецевої сталі, висота стінок є мінімальною, а ефективна ширина досягає максимальних значень. Заміна газової суміші M11 на M21 призводить до зменшення ефективної ширини стінок та відхилення профілю у середньому на 23%. При плазмовому способі адитивного дугового наплавлення відхилення профілю є мінімальним у порівнянні з GMAW методами і складає в середньому 0,35 мм.

- проведений скінченно-елементний аналіз компонент напружено-деформованого стану при адитивному GMAW та GMAW-Pulse наплавленні

кремнієвої бронзи. Автором вперше встановлено, що виникнення тріщин пов'язане з формуванням напружень розтягу, що перевищують границю міцності матеріалу на 13...25 % на етапі охолодження останнього шару в інтервалі температур 550...490 °С.

- за результатами скінченно-елементного моделювання вперше встановлено, що при адитивному наплавленні жароміцного нікелевого припою SBM-4 на нікелевий дисперсійнотвердіючий жароміцний сплав ЧС88УВІ на ділянках різкої зміни траєкторії наплавлення відбувається суттєве збільшення величини напружень розтягу на границі розподілу основа-перший наплавлений шар і значення напружень розтягу досягають межі міцності металу. Попередній підігрів основи до 150 °С сприяє зменшенню величини напружень розтягу та запобігає утворенню дефектів типу тріщин та відшарувань.

Наукова новизна чітко сформульована та зрозуміло викладена, повністю, із розкриттям суті. Сформульовані автором положення наукової новизни відповідають завданням досліджень, які поставлені в роботі. Сформульовані здобувачем теоретичні закономірності та практичні рекомендації підтверджені проведенням чисельних експериментальних досліджень реальних зразків. Вони не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та закономірностями, а наукові положення, сформульовані висновки і запропоновані рекомендації добре узгоджуються з існуючими концепціями. Визнання обґрунтованості положень наукової новизни підтверджується апробацією результатів роботи на відомих міжнародних конференціях з прикладної механіки, зварювання та суміжних технологій.

Наукові дослідження виконані здобувачем на кафедрі зварювального виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках виконання ініціативної наукової теми кафедри «Дослідження впливу зварювальних теплових, термомеханічних, статистичних процесів на структуру, технологічну міцність, якість металевих і композиційних матеріалів при зварюванні та адитивних технологіях» (2021-2022 рр.) під керівництвом завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доктора технічних наук, професора Квасницького Віктора Вячеславовича.

Таким чином, слід вважати, що поставлені в дисертаційній роботі наукові завдання виконані в повному обсязі. При виконанні експериментальних та теоретичних досліджень здобувач продемонстрував наявність необхідних компетентностей та володіння методологією наукової діяльності повною мірою.

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 визначеним в ньому напрямкам досліджень. Наведені в роботі відомості та висока якість представленого матеріалу свідчить про те, що здобувач повною мірою опанував компоненти освітньо-наукової програми підготовки докторів філософії за спеціальністю Прикладна механіка.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені в ній результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у розвиток наукового напрямку з Прикладної механіки.

За результатами розгляду звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги та співпадіння можна зробити однозначний висновок, що дисертаційна робота Лагодзінського Івана Миколайовича є результатом самостійних наукових досліджень здобувача. Представлена дисертація не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані здобувачем ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні літературні джерела.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота грамотно написана українською мовою. Представлені результати комплексних теоретичних та експериментальних досліджень, їх аналіз та узагальнення логічно розподілені здобувачем за розділами. Структура дисертації надає можливість послідовно та у повному обсязі чітко зрозуміти сутність наукових досліджень, виконаних здобувачем самостійно. Графічний матеріал дисертаційної роботи представлений фотографіями, скріншотами, графіками та загальними ілюстраціями, які демонструють найважливіші результати експериментальних та теоретичних досліджень, отриманих шляхом експериментів на реальних зразках, скінчено-елементним моделюванням, математичним обчисленням та інструментальним вимірюванням. Сутність отриманих результатів та їх аналіз викладені послідовно, зручно та лаконічно. Автор використовує загальноприйнятту наукову термінологію, що сприяє повному розумінню представлених результатів досліджень.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури зі 109 джерел та 1 додатка. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 188 сторінок.

У **вступі** описана актуальність теми дисертаційної роботи, описані мета та завдання дослідження, розкриті методи та методологія їх проведення, визначена наукова оригінальність та практичне значення отриманих результатів.

У **першому** розділі здійснено аналіз актуального стану технологій адитивного виробництва з використанням WAAM, що дозволяє створювати тривимірні вироби. Ретельно вивчені існуючі методи генеративного виготовлення деталей і конструкцій, а також фактори, що впливають на геометричні характеристики виготовлених виробів. Зазначено, що напрям досліджень відносно впливу складу захисного газового середовища на результати дугового адитивного виробництва є недостатньо дослідженим в контексті комбінування методів GMAW-CMT, GMAW-Pulse та плазмового наплавлення. Здобувачем оглянуто перспективний напрямок використання компактного матеріалу, такого як дроти з суцільним перетином або прутки, для виготовлення та ремонту деталей з кремнієвих бронз та жароміцних нікелевих сплавів за допомогою електричної дуги як джерела тепла. Також розглянуто поточний стан методів скінченно-елементного моделювання при адитивному виробництві та показано, що використання сучасних програмних комплексів та комп'ютерного обладнання дозволяє прогнозувати напружено-деформований

стан складних просторових виробів, виготовлених за допомогою адитивного виробництва. На основі проведеного огляду здобувач сформулював мету та задачі досліджень.

У **другому** розділі описано методики проведення експериментальних досліджень, спрямованих на визначення геометричних характеристик наплавлених шарів, аналіз структури та фізико-механічних властивостей металу, визначення хімічного складу та властивостей використовуваних матеріалів. У цьому розділі також подано опис та характеристики лабораторного обладнання для проведення наплавлення, досліджень структури та механічних властивостей, а також визначення термічних циклів дугового адитивного наплавлення. Окрім 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 отриманих даних дозволив встановити вплив зміни складу газового середовища та методу подачі зварювального струму на геометричні характеристики наплавлених виробів. Разом із цим виконані експериментальні дослідження впливу методів GMAW наплавлення на геометричні характеристики виробів з алюмінієвих сплавів, аустенітних нержавіючих сталей та кремнієвих бронз. Аналіз та узагальнення отриманих даних сприяли подальшому розвитку розуміння впливу методів подачі зварювального струму на формування геометричних характеристик поверхонь виробів під час адитивного синтезу. Окремо виконані дослідження та підтверджено можливість адитивного процесу плазмово-дуговим способом наплавлення за допомогою прутків з жароміцних нікелевих сплаву, що були виготовлені згідно з запропонованою автором методикою.

У **четвертому** розділі виконано аналіз впливу застосованих методів GMAW-CMT/Pulse наплавлення та зміни захисного газового середовища на формування структури і механічних властивостей металу, отриманих зразків із низьковуглецевої сталі, та вплив методу подачі зварювального струму із застосуванням мідних сплавів. В розділі описані встановлені закономірності формування структури, виникнення дефектів та розподілу мікротвердості в наплавленому металі при адитивному формуванні просторових виробів. Також проведений аналіз характеру руйнування і показників фізико-механічних властивостей адитивно наплавлених зразків із низьковуглецевої сталі та нікелевих сплавів.

У **п'ятому** розділі побудовані та досліджені розрахункові скінченно-елементні моделі для компонент напружено-деформованого стану просторових виробів, отриманих шляхом адитивного дугового наплавлення кремнієвої бронзи та жароміцного сплаву на основі нікелю у вигляді компактного присадного матеріалу. Здійснено комп'ютерне моделювання та проведений аналіз результатів скінченно-елементного моделювання, що дозволило виявити

причини виникнення дефектів при використанні кремнієвої бронзи та їх зв'язок з методами подачі зварювального струму. Описано зв'язок між виникненням дефектів та формуванням напружень розтягу вищих за границю міцності металу в області високих температур. Також описані дослідження термодформаційних процесів при пошаровому плазмово-дуговому наплавленні жароміцного нікелевого припою SBM-4. Для верифікації розрахункових моделей та підтвердження адекватності скінченно-елементного моделювання виконано практичний дослід і докладно описано процедуру співставлення практично та теоретично отриманих даних.

У **шостому** розділі сформульовані технологічні рекомендації для використання процесів адитивного виготовлення із застосуванням тепла електричної дуги та компактних присадних матеріалів у комбінації з методами імпульсної подачі струму та коротких замикань. В розділі також запропонована методика визначення технологічних втрат металу під час фінішної механічної обробки виготовлених за різними способами дугового адитивного наплавлення просторових виробів. Додатково, розроблена та створена комп'ютеризована установка для адитивного дугового наплавлення виробів з числовим програмним керуванням на основі G-кодів. Також, у розділі наведені приклади виготовлених виробів, які були адитивно наплавлені згідно з сформульованими автором технологічними рекомендаціями.

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 віднесене до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Отримані автором результати дисертації пройшли апробацію на 8 наукових фахових конференціях.

При підготовці публікацій автор неухильно дотримувався принципів академічної доброчесності. В представлений дисертації наведений перелік опублікованих за темою дисертації робіт з наведенням особистого внеску здобувача при виконанні наукових досліджень та при 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. При аналізі утворення тріщин у зразках з кремнієвої бронзи не вказано до якого типу технологічних тріщин можна віднести ці дефекти і відповідно за яким механізмом вони утворюються.

2. Не приведено експериментальних результатів, згідно яких задані параметри моделей джерела тепла (Таблиці 5.3 і 5.4). Якщо параметри b і d можуть відповідати ширині та глибині шару наплавлення на макрошлифі, то як

визначали радіуси розподілення тепла у фронтальній і хвостовій частині еліпсоїда не зрозуміло.

3. На графіках Рис.5.10 і 5.17 треба позначити механічні властивості, для яких побудовані графіки залежності від температури.

4. Твердження стосовно утворення високих розтягувальних напружень при аналізі розрахункових результатів за еквівалентними напруженнями на Рис.5.18, 5.19 і 5.22 не є коректним. Такі висновки треба можна робити за результатами розподілу нормальної компоненти напружень.

Однак, зазначені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну високу наукову новизну та практичну значимість отриманих 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 ступеня доктора філософії у галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Офіційний опонент:

завідувач відділу
математичних методів дослідження
фізико-хімічних процесів при зварюванні
та спецелектрометалургії
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
д.т.н., с.н.с.



Олег МАХНЕНКО

Підпис оф. Опонента д.т.н., с.н.с. Олега Махненка

Засвідчую

Учений секретар

Інституту електрозварювання
ім. Є.О.Патона НАН України



Ілля КЛОЧКОВ

М.П.

«29» травня 2024 року