

ВІДЗИВ

офіційного опонента разової спеціалізованої вченої ради PhD 16750

Носова Дениса Геннадійовича

на дисертаційну роботу **Красносельського Кирила Віталійовича** на тему
«Керування формоутворенням багатошарових структур із високоміцних
низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві
шляхом регулювання захисного газового середовища», представлену на
здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за
спеціальністю 131 Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації

Електродугове адитивне виробництво з використанням дрітного присадного матеріалу (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) належить до найбільш продуктивних технологій пошарового формування великогабаритних металевих виробів. Його основними перевагами є висока продуктивність наплавлення, значний коефіцієнт використання матеріалу, можливість застосування серійного зварювального обладнання та інтеграції технологічного процесу з промисловими роботизованими комплексами. Водночас перехід від виготовлення демонстраційних зразків до одержання відповідальних функціональних деталей промислового призначення потребує забезпечення стабільності геометрії кожного шару, керованості теплового стану, належного міжшарового сплавлення та мінімізації припусків на подальшу механічну обробку.

Особливо складною є реалізація WAAM для високоміцних низьколегованих сталей системи Mn–Ni–Mo–V. За багаторазового термічного циклування зміна складу захисного газового середовища впливає не лише на умови захисту розплавленого металу, а й на енергетичні характеристики дуги, поверхневий натяг, напрям і інтенсивність термокапілярних течій у зварювальній ванні, умови змочування та кристалізації. Навіть незначні відхилення ширини або висоти окремого валика можуть накопичуватися від шару до шару, спричиняючи хвилястість бічних поверхонь, збільшення припусків на механічну обробку, формування міжшарових дефектів або втрату просторової стабільності адитивної структури.

За таких умов обґрунтованим є розгляд захисного газового середовища не лише як засобу захисту розплаву від атмосферного впливу, а й як активного технологічного чинника керування формоутворенням. Науковий інтерес становить також поєднання такого хіміко-термодинамічного впливу з керованими алгоритмами перенесення електродного металу, зокрема з безперервними та дискретно-імпульсними режимами Cold Metal Transfer. Такий підхід відповідає сучасній тенденції розвитку зварювальних та адитивних технологій, у межах якої емпіричний підбір технологічних параметрів поступово доповнюється кількісним описом взаємодії матеріалу, газового середовища, джерела енергії та цифрової системи керування.

Дисертаційна робота Красносельського Кирила Віталійовича спрямована на встановлення закономірностей сумісного впливу складу

активного газового середовища та енергетики дугового розряду на макрогеометрію багат шарових структур із високоміцної сталі типу MoNiVa, а також на розроблення прогностичних моделей та інженерного алгоритму вибору параметрів процесу. Така постановка наукової задачі має безпосередній науковий і практичний інтерес для прикладної механіки, роботизованого машинобудування, зварювальних та адитивних технологій.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Достовірність одержаних результатів забезпечується комплексним поєднанням теоретичного аналізу, фізичного експерименту, цифрової реєстрації параметрів технологічного процесу, автоматизованого опрацювання макрошліфів та математичного моделювання.

Експериментальні дослідження виконано на роботизованому комплексі з маніпулятором Yaskawa MH1440 та інверторною системою Fronius TPS 500i CMT. Як основний присадний матеріал використано високоміцну низьколеговану сталь типу MoNiVa, а як порівняльний матеріал – дріт ER70S-6. Досліджено широкий діапазон сумішей Ar/CO_2 , а також безперервні та дискретно-імпульсні режими масопереносу.

Для підвищення відтворюваності експериментів здійснювався контроль міжшарової температури, реєстрація внутрішньої телеметрії джерела живлення, а геометричні параметри та пористість у досліджених поперечних перерізах визначалися із застосуванням розробленого алгоритму комп'ютерного зору. Статистичне опрацювання результатів охоплювало кореляційний аналіз, багатофакторну поліноміальну регресію, дисперсійний аналіз, методологію поверхонь відгуку та перехресну валідацію. Сукупність застосованих методів загалом відповідає меті та поставленим завданням дисертаційного дослідження.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у встановленні закономірностей впливу окиснювального потенціалу захисного середовища та алгоритмів керованого масопереносу на термогідродинамічні процеси у ванні розплаву та макрогеометрію WAAM-структур із високоміцної низьколегованої сталі.

До найбільш вагомих результатів слід віднести такі.

1. Уперше для електродугового адитивного формування багат шарових структур зі сталі типу MoNiVa формалізовано роль захисного газового середовища як активного чинника керування формоутворенням. Показано взаємозв'язок між вмістом CO_2 у сумішах Ar/CO_2 , окиснювальним потенціалом дугового середовища, зміною умов розвитку термокапілярних течій та геометричними параметрами наплавленого шару. Це положення розширює традиційне уявлення про захисний газ переважно як про середовище для запобігання атмосферному забрудненню розплаву.

2. Уточнено закономірності прояву масштабного ефекту газової активності при формуванні тонкостінних WAAM-структур за низького тепловкладення. Встановлено, що підвищення активності газового

середовища не в усіх випадках сприяє покращенню розтікання металу: за скорочення часу існування рідкої фази конвективний перерозподіл металу може бути обмеженим, унаслідок чого площа поперечного перерізу шару зменшується. Наукова цінність цього результату полягає у визначенні меж безпосереднього перенесення закономірностей, встановлених для традиційного дугового наплавлення, на умови формування тонкостінних адитивних структур.

3. Виявлено та математично описано явище, назване автором «енергетичним парадоксом WAAM», за якого режим із нижчим лінійним тепловкладенням може характеризуватися вищою питомою об'ємною енергоємністю внаслідок зміни фактичної масоподачі та площі сформованого перерізу. Одержаний результат має практичне значення для порівняння енергетичних характеристик різних режимів та свідчить про недостатність оцінювання енергоефективності процесу виключно за величиною лінійного тепловкладення.

4. Обґрунтовано доцільність застосування дискретно-імпульсного режиму CMT Cycle Step для стабілізації формоутворення сталі типу MoNiVa. Одержані експериментальні дані свідчать, що імпульсний характер масопереносу та короткочасні підвищення струму сприяють стабілізації макроеометрії. Запропоноване автором фізичне пояснення цього ефекту, пов'язане зі зменшенням негативного впливу поверхневих оксидних утворень, є логічним та узгоджується з результатами експериментальних спостережень, хоча потребує прямого мікрохімічного підтвердження складу та будови відповідних оксидних плівок.

5. Набули подальшого розвитку методи прогнозування макроеометрії WAAM-структур. Побудовано окремі моделі для безперервних та дискретних режимів, виконано багатокритеріальну оптимізацію та сформовано прототип програмного модуля мовою Python для розрахунку кроку підйому по осі Z і кроку паралельного зміщення траєкторії. Отримані результати створюють основу для скорочення кількості пробних наплавлень та подальшої інтеграції розрахункового ядра у САМ-системи.

Практичне значення результатів полягає у визначенні для дослідженого матеріалу та застосованого обладнання раціонального технологічного діапазону: дискретний режим CMT Cycle Step CMT-D_N, захисне середовище з вмістом CO₂ 5...10 % та лінійне тепловкладення 310...330 Дж/мм. За цих умов досягнуто коефіцієнта корисної ширини понад 95 %, знижено хвилястість бічних поверхонь та не виявлено макропористості у досліджених поперечних перерізах. Позитивним є те, що в завершальній частині роботи автор обмежує сферу застосування розроблених моделей конкретним матеріалом, апаратним комплексом та дослідженим факторним простором.

Особистий внесок здобувача

Заявлений особистий внесок здобувача охоплює планування та виконання експериментальних досліджень, роботизоване наплавлення зразків, реєстрацію й оброблення телеметричних даних, цифровий аналіз

макрогеометрії, побудову регресійних моделей, багатокритеріальну оптимізацію та програмну реалізацію розрахункового модуля.

Характер одержаних результатів та зміст опублікованих праць дають підстави вважати внесок Красносельського К. В. достатнім для кваліфікаційної наукової роботи такого рівня. Поставлену науково-прикладну задачу в цілому вирішено, а здобувач продемонстрував належний рівень володіння методологією експериментальних та розрахункових досліджень.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та дотримання принципів академічної доброчесності

За змістом дисертаційна робота відповідає предметній області спеціальності 131 Прикладна механіка та галузі знань 13 Механічна інженерія. У роботі досліджуються механіка вільного формоутворення розплаву, тепломасоперенесення, енергетичні характеристики дугового джерела, роботизоване керування технологічним процесом та математичне прогнозування геометричних параметрів виробу.

Дисертація є завершеною кваліфікаційною науковою працею, у якій мета, завдання, методи дослідження, одержані результати та загальні висновки логічно взаємопов'язані. Зміст розділів послідовно розкриває шлях від аналізу наукової проблеми та формування методології дослідження до експериментального встановлення закономірностей, їх математичного опису та практичної алгоритмізації.

У тексті наведено посилання на використані джерела, результати інших дослідників відокремлено від власних положень здобувача, а власний внесок у спільні публікації зазначено належним чином.

За результатами аналізу рукопису ознак некоректного запозичення, фабрикації або фальсифікації результатів не виявлено.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою. Матеріал викладено послідовно, із використанням відповідної фахової термінології у галузях зварювання, адитивного виробництва, термогідродинаміки та статистичного моделювання. Графічні матеріали, макрошліфи, схеми експериментального комплексу, діаграми та поверхні відгуку загалом належно ілюструють результати проведених досліджень.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 193 сторінки, з яких 164 сторінки припадають на основний текст. Робота містить 40 рисунків, 13 таблиць та список використаних джерел із 93 бібліографічних найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та п'ять завдань дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено положення наукової новизни, практичне значення, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан WAAM, принципи керованого масопереносу СМТ, термодинамічні процеси у зварювальній ванні, вплив течій Марангоні, особливості багаторазового термічного циклу та проблеми адитивного формування високоміцних низьколегованих сталей. Окрему увагу приділено впливу газового середовища на енергетичні характеристики дуги, змочування, утворення оксидних систем та геометрію валика. За результатами огляду обґрунтовано необхідність поєднання хіміко-термодинамічного регулювання з цифровими алгоритмами керування масопереносом.

У другому розділі наведено характеристику матеріалів, газових сумішей, технологічного обладнання та методології експериментальних досліджень. Описано роботизований комплекс, протокол контролю міжшарової температури, методику реєстрації телеметрії, підготовку макрошліфів, алгоритм комп'ютерного зору та процедури оцінювання похибок і невизначеностей. Порівняння сталі ER70S-6 зі сталлю типу MoNiVa є методично доцільним, оскільки дає змогу розмежувати загальні теплофізичні ефекти та ефекти, зумовлені специфікою легування досліджуваного матеріалу.

Третій розділ містить основний масив експериментальних результатів. У ньому досліджено вплив складу Ar/CO₂ на макрогеометрію та енергетичні параметри безперервних режимів, встановлено обмеження застосування чистого аргону та чистого CO₂ для сталі типу MoNiVa, проаналізовано адаптивну реакцію синергетичного джерела живлення та обґрунтовано явище інверсії між лінійним тепловкладенням і питомою об'ємною енергоемністю. Показано переваги дискретно-імпульсного режиму СМТ Cycle Step та визначено діапазон параметрів, за якого досягається раціональне співвідношення просторової стабільності, якості та енергоефективності.

У четвертому розділі виконано кореляційно-статистичний аналіз, побудовано моделі фактичної масоподачі та макрогеометрії для безперервних і дискретних режимів, проведено багатокритеріальну оптимізацію методом поверхонь відгуку. На основі одержаних моделей сформовано інженерний алгоритм та прототип Python-модуля, призначеного для визначення базових параметрів технологічної траєкторії. Позитивним є те, що автор визначає межі прогностичної здатності розробленого математичного апарату та зазначає необхідність подальшої інтеграції із системами адаптивного керування в реальному часі.

Загальні висновки відповідають поставленим завданням та відображають основні результати дослідження. Дисертаційна робота за оформленням у цілому відповідає Вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

За темою дисертації опубліковано п'ять наукових праць: три статті у наукових фахових виданнях України та дві тези доповідей у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій. Результати роботи

апробовано на конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2025» та XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» у 2026 році.

Зміст опублікованих праць відповідає основним положенням дисертації. У публікаціях висвітлено результати теоретичного моделювання впливу складу захисного газу на геометрію наплавленого шару, експериментальні закономірності впливу окиснювального потенціалу середовища на геометрію та енергетику наплавлення високоміцної сталі, а також впливу CO₂ на макрогеометрію і питому об'ємну енергоємність WAAM-процесу.

Таким чином, основні наукові результати, що виносяться на захист, оприлюднено у профільних наукових працях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Поряд із позитивною оцінкою дисертаційної роботи вважаю за необхідне висловити окремі зауваження та положення, які можуть бути предметом наукової дискусії під час захисту.

1. У роботі запропоновано фізичне пояснення впливу дискретно-імпульсного режиму CMT Cycle Step на стабілізацію формоутворення, пов'язане з особливостями поведінки оксидних плівок на основі легуючих елементів. Наведена автором інтерпретація є фізично обґрунтованою та узгоджується з отриманими експериментальними результатами. Водночас додаткові мікроструктурні та мікрохімічні дослідження дозволили б більш детально розкрити механізм встановленого ефекту.

2. При аналізі телеметричних параметрів процесу використано дані внутрішньої системи реєстрації з певною частотою дискретизації. З огляду на високу частоту окремих циклів CMT доцільно було б додатково конкретизувати особливості реєстрації та подальшої обробки швидкозмінних параметрів дугового процесу. Це дозволило б чіткіше пов'язати зареєстровані характеристики джерела живлення з окремими етапами циклу масопереносу.

3. Оцінювання дефектності наплавленого металу в роботі здійснюється за результатами дослідження поперечних макрошліфів. Такий підхід є цілком прийнятним для встановлення закономірностей формування структури та геометрії досліджуваних шарів. Разом із тим для подальшого розвитку роботи становить інтерес доповнення цих досліджень методами об'ємного неруйнівного контролю, що дозволило б отримати більш повну характеристику внутрішньої дефектності багатошарових структур.

4. Основна увага в дисертації приділена геометричним характеристикам, стабільності формоутворення та енергетичним показникам процесу. З огляду на специфіку високоміцних низьколегованих сталей подальше розширення досліджень у напрямі встановлення взаємозв'язку між параметрами процесу, структурою та механічними властивостями наплавленого металу дозволило б комплексніше оцінити технологічне вікно, запропоноване автором.

5. Запропонований автором «енергетичний парадокс WAAM» є цікавим результатом дослідження співвідношення лінійного тепловкладення та питомої об'ємної енергоємності. Вважаю, що це положення становить інтерес

передусім як інженерна характеристика конкретної технологічної системи. Подальше дослідження цього явища для інших матеріалів, режимів масопереносу та технологічних схем дозволило б визначити межі його узагальнення.

6. Побудовані в роботі фізико-статистичні моделі характеризуються різним рівнем прогнозної здатності залежно від досліджуваного параметра. Вважаю доцільним у подальших дослідженнях розширити експериментальну базу та провести додаткову верифікацію моделей за межами використаних при їх побудові експериментальних даних. Це сприятиме підвищенню надійності їх використання для різних технологічних траєкторій.

7. Розроблений Python-модуль є корисним прототипом математичного ядра, однак коефіцієнт перекриття 0,738 та інші використані залежності отримані для конкретної геометрії валика, матеріалу MoNiVa, режиму CMT-D_N та плоских траєкторій. Застосування розробленого алгоритму до криволінійних, похилих, багатопрохідних або різнотовщинних структур потребує додаткової перевірки та адаптації. Крім того, у роботі не наведено підтвердження інтеграції модуля в промислову САМ-систему. Тому коректніше розглядати його як прототип, підготовлений до подальшої інтеграції, а не як завершений промисловий постпроцесор.

8. У тексті дисертації трапляються окремі редакційні та термінологічні неточності, а також формулювання, які видаються дещо категоричними. Зокрема, у вступі на сторінках 20–21 потребує редакційного уточнення граматична узгодженість формулювання завдань («Побудовано ... та виконати»); на сторінці 23 заявлено «повну відсутність макропористості» та «повне виключення» необхідності тестових наплавлень, тоді як у четвертому розділі коректно визначено межі застосовності моделей та необхідність їх експериментальної перевірки. Доцільною є також уніфікація термінології, зокрема використання понять «електродугове адитивне виробництво» та «вирощування» відповідно до конкретного контексту. Формулювання «гарантує», «повністю виключає», «фундаментальний» доцільно застосовувати лише у випадках, коли відповідні твердження безпосередньо підтверджені обсягом проведених досліджень.

Наведені зауваження мають переважно дискусійний та уточнювальний характер, визначають напрями подальшого розвитку досліджень і не зменшують загальної наукової новизни та практичного значення одержаних результатів. Вони не ставлять під сумнів основні положення дисертаційної роботи та не впливають на її загальну позитивну оцінку.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота Красносельського Кирила Віталійовича на тему «Керування формоутворенням багатошарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» є завершеним самостійним науковим дослідженням, виконаним на належному науковому рівні.

результатів. Вони не ставлять під сумнів основні положення дисертаційної роботи та не впливають на її загальну позитивну оцінку.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота Красносельського Кирила Віталійовича на тему «Керування формоутворенням багатошарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» є завершеним самостійним науковим дослідженням, виконаним на належному науковому рівні.

Сукупність одержаних теоретичних та експериментальних результатів дає змогу вирішити актуальну науково-прикладну задачу керування макрогеометрією та просторовою стабільністю WAAM-структур із високоміцних низьколегованих сталей, що має істотне значення для галузі знань 13 Механічна інженерія.

Дисертаційна робота за актуальністю теми, науковою новизною, обґрунтованістю та достовірністю одержаних результатів, їх теоретичним і практичним значенням, повнотою оприлюднення основних положень та рівнем оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності відповідає вимогам пунктів 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 року № 44, а також Вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40.

Красносельський Кирило Віталійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Офіційний опонент
завідувач кафедри технології
та устаткування зварювання
Дніпровського державного
технічного університету,
кандидат технічних наук, доцент



Денис НОСОВ

Підпис кандидата технічних наук, доцента, завідувача кафедри технології та устаткування зварювання Дніпровського державного технічного університету Д.Г. Носова засвідчую:

Начальник відділу кадрів



Ірина ЛЕСОВА