

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента разової спеціалізованої вченої ради PhD 16750 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 наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації

Розвиток технологій електродугового адитивного виробництва (WAAM) є одним із ключових векторів оптимізації процесів виготовлення великогабаритних металевих деталей складної форми. Попри значну продуктивність та високий коефіцієнт використання матеріалу, широке впровадження WAAM для високоміцних низьколегованих (HSLA) сталей, зокрема систем Mn-Ni-Mo-V, стримується низкою фундаментальних теплофізичних та реологічних перешкод.

Як показано в дисертації, багатошарове формування таких сплавів супроводжується нестабільною поведінкою ванни розплаву, що зумовлено підвищеною кінематичною в'язкістю та потенційним утворенням тугоплавких оксидних плівок в умовах активного захисного середовища. У режимі вільного просторового формоутворення ці чинники призводять до гідродинамічної нестабільності, хвилястості бічних поверхонь та дефектів міжшарового сплавлення, що суттєво збільшує припуски на подальшу механічну обробку. Традиційний емпіричний підхід до налаштування параметрів процесу не здатний забезпечити належну стабільність. Отже, вирішення проблеми керування макроеометрією WAAM-структур шляхом системного поєднання хіміко-термодинамічного впливу газового середовища та кіберфізичних алгоритмів масопереносу є важливим науково-технічним завданням. Таким чином, обраний напрямок дисертаційного дослідження є науково обґрунтованим, своєчасним і повністю відповідає сучасним запитам автоматизованого машинобудування та прикладної механіки.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукові положення та висновки, сформульовані в дисертації Красносельського К.В., є глибоко обґрунтованими, що підтверджується

застосуванням комплексного методологічного апарату, який гармонійно поєднує теоретичний аналіз, натурний фізичний експеримент та математичне моделювання. Достовірність експериментальних даних забезпечується використанням сучасного промислового обладнання, зокрема роботизованого маніпулятора Yaskawa MH1440, інверторного джерела живлення Fronius TPS 500i CMT та прецизійного газового змішувача WITT BM-2M.

Методологічно коректним є вибір матеріалів для проведення досліджень. Паралельне порівняння базової низьковуглецевої сталі ER70S-6 та високоміцної низьколегованої сталі типу MoNiVa дозволило автору надійно відокремити загальні теплофізичні ефекти дугової плазми від специфічного впливу легуючих елементів та оксидних утворень. Високий рівень відтворюваності експериментів досягнуто завдяки жорсткому протоколу контролю міжшарової температури на рівні $85 \pm 10^\circ\text{C}$ із застосуванням систем активного охолодження, що дозволило ефективно нівелювати неконтрольований вплив теплового накопичення.

Метрологічна надійність результатів підкріплена сучасним підходом до збору та обробки даних. Здобувачем реалізовано високочастотну (10 Гц) реєстрацію внутрішньої телеметрії джерела живлення, а для вимірювання макрогеометрії застосовано розроблений скрипт на базі комп'ютерного зору (OpenCV). Оцифрування макрошліфів виконувалося з роздільною здатністю 600 dpi (0,0423 мм/піксель) із верифікацією за калібрувальним еталоном, що мінімізує суб'єктивні похибки. Статистична забезпеченість доводиться достатнім обсягом вибірки: досліджено 28 комбінацій технологічних параметрів (по три зразки на кожен), що склало 84 макрошліфи для комплексного аналізу. Адекватність побудованих прогностичних моделей підтверджена методами дисперсійного аналізу, багатокритеріальної оптимізації (RSM) та перехресної валідації LOOCV, яка продемонструвала низький рівень похибки прогнозування (RMSE близько 0,17 мм для ширини та 0,08 мм для висоти шару).

Одержані здобувачем результати містять виражену наукову новизну та формують цілісну систему знань щодо керованості процесу WAAM. У дослідженні вперше науково обґрунтовано механізм стабілізації процесу формоутворення багатошарових структур зі складнолегованих сталей типу MoNiVa за рахунок застосування дискретно-імпульсного режиму CMT Cycle Step. Автором доведено, що локальний електродинамічний вплив, який виникає від короткочасних піків зварювального струму, сприяє ефективному руйнуванню жорстких тугоплавких оксидних плівок молібдену та ванадію. Це, своєю чергою, забезпечує стабільність макрогеометрії стінки і запобігає її гідродинамічному колапсу під час наплавлення.

Вагомим здобутком є формалізація ролі захисного газового середовища для умов електродугового адитивного вирощування. Здобувачем доведено, що

суміші на основі аргону та діоксиду вуглецю діють не лише як пасивний ізолятор розплаву, а виступають активним технологічним чинником. У дисертації встановлено кількісний взаємозв'язок між окиснювальним потенціалом середовища, зміною напрямку термокапілярних течій Марангоні та фінальними макроеометричними параметрами наплавленого шару.

Розвиваючи цю концепцію, дисертант уточнив закономірності прояву масштабного ефекту газової активності. Було виявлено специфічні реологічні особливості поведінки розплаву при формуванні тонкостінних структур за умов низького тепловкладення. Зокрема, показано, що через швидке охолодження зварювальної ванни підвищення активності газу може суттєво обмежувати конвективний перерозподіл металу, що має наслідком непередбачуване зменшення площі поперечного перерізу шару.

Крім того, у роботі вперше зафіксовано та детально описано явище, яке отримало назву «енергетичного парадоксу WAAM». Цей ефект полягає у тому, що режими з нижчим лінійним тепловкладенням здатні формувати вищу питому об'ємну енергоемність. Здобувачем обґрунтовано, що така аномалія є прямим наслідком кіберфізичної адаптивної реакції синергетичної системи керування, яка здійснює дроселювання фактичної масоподачі у відповідь на теплове стиснення дуги в активних газах.

Набули подальшого розвитку методи прогнозування макроеометрії WAAM-структур. Автором створено комплекс багатofакторних термодинамічних та топологічних моделей, у яких вперше вдалося інтегрувати склад захисного газу, енергетику процесу та режим масопереносу в єдиний розрахунковий алгоритм. Це дозволяє з високою точністю визначати крок підйому по осі Z та необхідне зміщення траєкторії інструменту без проведення попередніх матеріаломістких натурних випробувань.

Підсумовуючи викладене, можна констатувати, що наукові положення, висновки та результати, винесені на захист, є глибоко обґрунтованими, спираються на надійну експериментальну і математичну базу, а рівень їх наукової новизни повністю відповідає критеріям, що ставляться до кваліфікаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота Красносельського Кирила Віталійовича є цілісним, логічно побудованим та глибоко аргументованим дослідженням, структура якого повністю розкриває поставлені наукові та практичні завдання. У першому розділі здобувачем здійснено ґрунтовний аналіз фізики тепломасоперенесення,

гідродинаміки зварювальної ванни з акцентом на термокапілярні течії Марангоні та специфіки формування структур із високоміцних низьколегованих сталей. Позитивною рисою цієї частини є детальна систематизація чинників, що викликають просторову нестабільність під час адитивного вирощування, що своєю чергою створило надійну і науково виважену основу для подальшого формування методології дослідження.

У другому розділі автор дисертації детально описує використаний апаратний комплекс та метрики технологічного процесу. Застосування оригінальних методик, зокрема створення авторських скриптів на базі мови програмування Python для обробки внутрішньої телеметрії та аналізу макрошліфів за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору, переконливо свідчить про сучасний підхід здобувача до усунення суб'єктивних похибок вимірювання.

Третій розділ становить основу експериментальної бази дисертації, де послідовно викладено дані щодо впливу сумішей на основі аргону та діоксиду вуглецю на макрогеометрію і енергетику наплавлення як для еталонної низьковуглецевої сталі ER70S-6, так і для легованої MoNiVa. Значним науковим здобутком у цій частині є отримана кількісна оцінка адаптивної реакції синергетичного джерела живлення, а також експериментальне доведення беззаперечних переваг дискретного режиму CMT Cycle Step для стабілізації процесу.

Логічним завершенням наукового пошуку є четвертий розділ, у якому успішно реалізовано статистичне узагальнення зібраних даних, побудовано високоточні топологічні моделі та визначено оптимальне технологічне вікно, яке лежить у межах 5-10 відсотків концентрації вуглекислого газу при лінійному тепловкладенні 310-330 Дж/мм. Розробка на базі цих моделей прототипу програмного розрахункового модуля виступає вагомим прикладним результатом, що ефективно пов'язує фізику дугового процесу з інженерною підготовкою автоматизованого виробництва.

Детальний аналіз тексту дисертації та відповідного звіту подібності, сформованого системою перевірки на плагіат, підтверджує високий рівень оригінальності кваліфікаційної роботи. Зафіксовані текстові збіги стосуються переважно власних опублікованих праць автора у фахових виданнях, що є абсолютно правомірним. Жодних ознак фабрикації, фальсифікації чи некоректних текстових запозичень у рукописі не виявлено. Результати досліджень інших вчених чітко відокремлені від власних напрацювань здобувача та супроводжуються відповідними бібліографічними посиланнями. Загалом представлена робота є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яка виконана з неухильним дотриманням усіх сучасних етичних стандартів та норм.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертація написана українською мовою з дотриманням норм наукового стилю. Матеріал викладено логічно, використано коректну фахову термінологію зі сфер прикладної механіки, матеріалознавства та систем керування. Загальний обсяг роботи становить 193 сторінки, з яких 164 сторінки – основний текст. Дисертація містить 40 рисунків та 13 таблиць, що якісно ілюструють фізичні процеси та результати моделювання. Список використаних джерел містить 93 найменування. Стиль викладення та оформлення рукопису відповідають Вимогам до оформлення дисертації (наказ МОН України від 12.01.2017 р. № 40).

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Основні положення дисертації повною мірою висвітлено у 5 наукових працях: 3 статтях у фахових наукових виданнях України та 2 тезах доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях («Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем – 2026», «Сучасні технології промислового комплексу – 2025»). Кількість та якість публікацій повністю відповідають вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Високо оцінюючи дисертаційну роботу, слід вказати на низку дискусійних положень та зауважень:

1. Описуючи методологію експерименту (розділ 2), автор зазначає, що для контролю міжшарової температури використовувався інфрачервоний пірометр із жорстко зафіксованим коефіцієнтом теплової емісії на рівні 0,85. Проте зміна концентрації CO₂ від 5 % до 100 % неминуче призводить до різної інтенсивності утворення поверхневих оксидів, що здатне суттєво змінити випромінювальну здатність поверхні. Було б корисно почути коментар щодо можливого впливу цього фактора на абсолютну точність реєстрації початкових теплових умов перед наплавленням кожного наступного шару.

2. При аналізі кіберфізичних реакцій обладнання автор спирається на логування телеметрії з частотою 10 Гц. Оскільки мікроцикли процесу СМТ відбуваються з істотно вищою частотою (до 100-130 Гц), потребує роз'яснення, наскільки коректно зафіксовані локальні піки струму ($I_{\max}$) відображають реальні електродинамічні імпульси, і яка була природа агрегації цих даних контролером джерела живлення.

3. При розробці термокінематичних і топологічних моделей у четвертому розділі автор використовує швидкість подачі дроту та концентрацію захисного газу як змінні фактори, досягаючи високої точності прогнозування макроеометрії в межах дослідженого простору. Водночас кінематична швидкість переміщення пальника (TS) в основних експериментах залишалася фіксованою на рівні 45 см/хв. З огляду на те, що зміна швидкості переміщення є одним із базових інструментів регулювання лінійного тепловкладення на виробництві, варто було б окреслити перспективи та шляхи розширення отриманих поліноміальних рівнянь для умов змінного параметра швидкості зварювання.

4. Робота робить висновок про відсутність пористості в межах оптимальних режимів, спираючись виключно на оптичний аналіз 2D-макрошліфів. Цей метод фіксує лише поверхневу (площинну) дефектність. Для твердження про повну відсутність об'ємних дефектів у масиві стінки доцільно було б навести результати неруйнівного 3D-контролю, наприклад, рентгенографічного чи томографічного.

5. Розроблений Python-модуль представлений як інструмент для інтеграції у САМ-системи. Проте математичні залежності були отримані на базі плоских прямолінійних траєкторій. Потребує додаткового коментаря питання адаптації цього алгоритму для проєктування складних просторових, похилих або багатопрохідних (перехресних) структур, де умови тепловідведення можуть змінюватися.

Наведені зауваження не є визначальними, мають рекомендаційно-уточнювальний характер і жодним чином не впливають на загальну позитивну оцінку наукових та прикладних результатів дисертації.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота Красносельського Кирила Віталійовича на тему «Керування формоутворенням багат шарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» є самостійним та завершеним науковим дослідженням. Отримані теоретичні та експериментальні результати успішно розв'язують актуальне науково-прикладне завдання забезпечення стабільної геометрії WAAM-структур, що має суттєве значення для розвитку галузі 13 «Механічна інженерія».

Дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю, достовірністю результатів та практичним значенням повністю відповідає вимогам «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.

Автор роботи, Красносельський Кирило Віталійович, у повній мірі заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка».

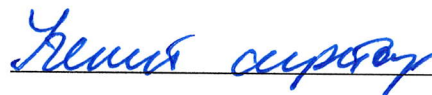
Офіційний рецензент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інтегрованих
технологій зварювання та моделювання
конструкцій Національного університету
«Запорізька політехніка»



Михайло БРИКОВ

Підпис доктора технічних наук, професора, професора кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка» засвідчую:



(посада уповноваженої особи)



(підпис, Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)