

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, **Вишнепольського Євгена Валерійовича** 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»**, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації

На сучасному етапі розвитку автоматизованого машинобудування технологія електродугового адитивного виробництва (WAAM) переходить від етапу лабораторного прототипування до промислового виготовлення функціональних великогабаритних виробів. Особливий інтерес становить застосування цієї технології для високоміцних низьколегованих (HSLA) сталей, що відкриває перспективи для виробництва відповідальних компонентів для важкого машинобудування, транспортної та енергетичної галузей.

Проте, як справедливо зазначає автор, багатошаровий 3D-друк таких складнолегованих систем супроводжується комплексом невирішених термогідродинамічних проблем. Зростання масштабного теплового ефекту та підвищена кінематична в'язкість розплаву призводять до деградації макрогеометрії стінок. Крім того, наявність легуючих елементів (молібдену та ванадію) в умовах активного захисного середовища спричиняє утворення стійких тугоплавких оксидних плівок на поверхні зварювальної ванни. Ці плівки діють як жорсткі механічні бар'єри, що блокують конвективні потоки Марангоні, погіршують латеральне розтікання металу та провокують просторову нестабільність (блукання валика) і капілярну нестабільність Релея-Плато. Існуючі підходи, які розглядають захисний газ лише як пасивний ізолятор, не здатні забезпечити прецизійний контроль формоутворення. З огляду на це, розробка методології, яка поєднує хіміко-термодинамічне регулювання (оптимізацію складу газу) з кіберфізичним керуванням масопереносом, є надзвичайно актуальною науково-технічною задачею. Загалом, напрямок дисертаційного дослідження є своєчасним, відповідає сучасним потребам промисловості та має високий потенціал для практичного впровадження у сфері адитивних технологій.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна результатів дисертації є глибокою та багатогранною. Здобувачем вперше для умов WAAM-виросування сталей типу MoNiVa формалізовано роль захисного газу (сумішей Ar/CO₂) як активного технологічного чинника, що модулює термокапілярні течії та визначає макрогеометрію шару. Важливим науковим здобутком є виявлення та математичний опис «енергетичного парадоксу WAAM»: встановлено, що режими з нижчим лінійним тепловкладенням можуть формувати вищу питому об'ємну енергоємність через кіберфізичну адаптацію фактичної масоподачі синергетичним джерелом живлення. Також вперше обґрунтовано механізм стабілізації формоутворення сталей MoNiVa шляхом застосування дискретно-імпульсного режиму CMT Cycle Step, короткочасні електродинамічні піки струму якого руйнують бар'єр тугоплавких оксидних плівок. Набули подальшого розвитку методи прогнозування макрогеометрії за рахунок створення багатофакторних топологічних моделей.

Достовірність отриманих результатів забезпечена використанням комплексу сучасного обладнання та передових методів аналізу. Експерименти виконано на високоточному роботизованому комплексі Yaskawa MH1440 із використанням інверторної системи Fronius TPS 500i CMT та газового змішувача WITT BM-2M. Висока роздільна здатність та надійність даних досягнута завдяки застосованій здобувачем методиці високочастотного логування внутрішньої телеметрії процесу. Для усунення суб'єктивного фактора при вимірюваннях застосовано розроблений автором алгоритм комп'ютерного зору (на базі бібліотеки OpenCV) для оцифрування та топологічного аналізу макрошліфів. Представлені наукові результати є глибоко обґрунтованими, отримані на сучасному апаратному рівні, а їхня достовірність підтверджується коректним застосуванням методів математичної статистики та обчислювальної техніки.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота Красносельського К.В. є цілісним, логічно побудованим та завершеним дослідженням, що відповідає освітньому стандарту зі спеціальності 131 Прикладна механіка.

У **першому розділі** детально проаналізовано сучасний стан технології WAAM, фізику зварювальної ванни (термокапілярний ефект Марангоні) та специфіку роботи зі сталями HSLA. Автор аргументовано розкриває проблематику утворення оксидів молібдену та ванадію і масштабного ефекту акумуляції тепла. Ключовим аспектом розділу є глибокий критичний аналіз світової літератури, який дозволив чітко

ідентифікувати наукову прогалину та сформулювати завдання дослідження.

У **другому розділі** викладено методологію досліджень. Описано апаратний комплекс, матеріали (ER70S-6 та MoNiVa), алгоритми логування телеметрії та методику цифрового аналізу геометрії за допомогою Python. Розробка та впровадження власних скриптів для комп'ютерного зору і обробки телеметрії свідчить про високий рівень інженерної та програмної підготовки здобувача.

У **третьому розділі** наведено результати масштабних фізичних експериментів. Досліджено термогідродинамічні закономірності, виявлено «енергетичний парадокс» та доведено ефективність дискретно-імпульсного режиму CMT Cycle Step для стабілізації ванни розплаву. Матеріал розділу відрізняється високою якістю експериментальних даних та глибокою фізичною інтерпретацією виявлених кіберфізичних реакцій обладнання.

У **четвертому розділі** проведено кореляційно-статистичний аналіз, побудовано термокінематичні моделі та виконано багатокритеріальну оптимізацію процесу методом поверхонь відгуку. На базі моделей створено програмний модуль для інтеграції в САМ-системи. Цей розділ має виняткову практичну цінність, оскільки трансформує фундаментальні знання у готовий цифровий інструмент для автоматизованого виробництва.

Аналіз звіту подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння свідчить, що дослідження виконано здобувачем самостійно. У тексті відсутні ознаки академічного плагіату, фабрикації чи компіляції. Результати досліджень інших авторів супроводжуються коректними посиланнями на першоджерела. За своїм змістом, структурою та дотриманням етичних норм дисертація є повноцінною і завершеною академічною працею.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою. Текст відрізняється стилістичною культурою, чіткістю формулювань та дотриманням академічного стилю викладу. Автор володіє складною міждисциплінарною термінологією на перетині зварювального виробництва, матеріалознавства, гідродинаміки та програмування. Загальний обсяг дисертації становить 193 сторінки, з яких 164 сторінки займає основний текст. Робота якісно ілюстрована: містить 40 рисунків та 13 таблиць, що суттєво полегшує сприйняття складних термодинамічних та статистичних залежностей. Список використаних джерел налічує 93 найменування. Оформлення роботи, мова та візуалізація результатів повністю відповідають чинним вимогам Міністерства освіти і науки України до кваліфікаційних наукових праць.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Основні наукові результати, положення та висновки дисертації повною мірою висвітлені у 5 наукових публікаціях автора. З них 3 статті опубліковано у фахових виданнях України («Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні», «Технічні науки та технології»). Апробація результатів здійснювалася шляхом представлення 2 тез доповідей на авторитетних міжнародних науково-практичних конференціях («КЗЯТПС – 2026» та «Сучасні технології промислового комплексу – 2025»). Науковий доробок здобувача пройшов належне фахове обговорення та рецензування, що підтверджує валідацію отриманих результатів науковою спільнотою.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Достатньо високо оцінюючи науково-теоретичний рівень та прикладну значущість дисертаційної роботи Красносельського К.В., вважаю за доцільне висловити такі дискусійні зауваження:

1. Основний акцент у дослідженнях зроблено на макрогеометричних параметрах, енергетиці дуги та макропористості наплавлених валиків. Для більш комплексного обґрунтування переваг імпульсного режиму СМТ Cycle Step було б доцільно доповнити третій розділ даними мікроструктурного аналізу (наприклад, оцінкою розміру зерна або частки голчастого фериту), що дозволило б наочно підтвердити позитивний вплив подрібнення оксидних плівок на структуру сталі MoNiVa.
2. Під час багатокритеріальної оптимізації процесу (Розділ 4) автор обґрунтовано використовує критерії геометричної точності та ефективності використання матеріалу. З огляду на промислову орієнтованість розробленого програмного модуля, практична цінність роботи зростає, якби автор навів хоча б базовий економічний розрахунок доцільності (наприклад, порівняння витрат на дорожчі газові суміші з економією від зменшення обсягів подальшої механічної пост-обробки виробів).
3. У першому розділі ґрунтовно описано проблему масштабного ефекту акумуляції тепла для масивних структур. Проте, у загальних висновках автору варто було б чіткіше окреслити просторові (габаритні) межі застосовності його оптимізаційних моделей, пояснивши, наскільки розроблені алгоритми кіберфізичної адаптації є інваріантними при переході від тонкостінних тестових зразків до повномасштабних промислових деталей складної топології.

Наведені зауваження мають науково-дискусійний і рекомендаційний характер. Вони жодним чином не зменшують загальну наукову новизну, не спростовують отриманих закономірностей і не впливають на високу позитивну оцінку представленої дисертаційної роботи й можуть бути предметом подальших досліджень автора.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії 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. Робота виконана на високому науковому та методологічному рівні, не порушує принципів академічної доброчесності. Сукупність отриманих теоретичних і практичних результатів розв'язує важливе науково-прикладне завдання щодо підвищення керованості та стабільності 3D-друку HSLA-сталей, що має суттєве значення для галузі знань 13 «Механічна інженерія».

За своєю актуальністю, обґрунтованістю, науковою новизною та практичною цінністю представлена дисертаційна робота повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені 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 Красносельський Кирило Віталійович у повній мірі заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Доцент кафедри
технології машинобудування
Національного університету
«Запорізька політехніка»

к.т.н.



Євген ВИШНЕПОЛЬСЬКИЙ

Підпис Вишнепольського Є.В. засвідчую:

Учений секретар вченої ради
Національного університету
«Запорізького університету»

к.соц.н., доцент



Віктор КУЗЬМІН