

ВІДГУК

офіційного опонента 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 ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка

Актуальність теми дисертаційної роботи

Електродугове адитивне виробництво з використанням дрітчастих присадних матеріалів (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) сьогодні є одним із перспективних напрямів розвитку технологій виготовлення великогабаритних металевих деталей. Порівняно з низкою інших металевих адитивних процесів технологія WAAM характеризується високою продуктивністю наплавлення, можливістю формування виробів значних габаритів та відносно високим коефіцієнтом використання матеріалу. Особливого практичного значення ця технологія набуває для виготовлення відповідальних деталей транспортного, енергетичного та важкого машинобудування.

Разом із тим перехід від наплавлення традиційних низьковуглецевих сталей до високоміцних низьколегованих матеріалів суттєво ускладнює процес керування формоутворенням. Для сталей системи Mn–Ni–Mo–V характерними є складна поведінка рідкої ванни, підвищена чутливість процесу до теплового стану, умов змочування, складу захисного середовища та характеру перенесення електродного металу. При пошаровому вирощуванні ці чинники безпосередньо впливають на стабільність ширини і висоти шару, хвилястість бічної поверхні, міжшарове сплавлення та загальну геометричну стійкість формованої конструкції.

У цьому контексті тема дисертаційної роботи Красносельського К.В., спрямована на встановлення закономірностей сумісного впливу захисного газового середовища, енергетичних характеристик дуги та алгоритмів керованого масопереносу на формоутворення WAAM-структур із високоміцних сталей, є актуальною як у науковому, так і в прикладному аспекті.

Важливим є те, що автор не обмежився традиційним пошуком окремого раціонального режиму наплавлення, а розглядає процес як взаємопов'язану систему «джерело живлення – дуга – захисне середовище – зварювальна ванна – масоперенос – геометрія шару». Такий підхід відповідає сучасній тенденції переходу від емпіричного налаштування процесів адитивного виробництва до їхнього кількісного прогнозування та алгоритмічного керування.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Метою дисертаційної роботи є встановлення фізико-технологічних закономірностей сумісного впливу активного захисного середовища та енергетики дугового розряду на реологічну поведінку ванни розплаву і розроблення на цій основі інженерної методики керування просторовим

формоутворенням багатошарових структур при WAAM високоміцних низьколегованих сталей. Об'єкт і предмет дослідження відповідають поставленій меті та спеціальності 131 Прикладна механіка.

Для вирішення поставлених завдань здобувачем використано комплекс взаємодоповнювальних методів. Експериментальні дослідження виконувалися на роботизованому комплексі на базі промислового маніпулятора Yaskawa MH1440 та джерела живлення Fronius TPS 500i CMT. Регулювання складу бінарних захисних сумішей Ar–CO₂ здійснювалося газовим змішувачем WITT BM-2M. Для обробки внутрішньої телеметрії джерела живлення та результатів геометричних вимірювань використовувалися програмні засоби Python, а визначення параметрів макрогеометрії здійснювалося із застосуванням алгоритмів комп'ютерного зору OpenCV. Статистична частина роботи включала кореляційний аналіз, регресійне моделювання та методологію поверхонь відгуку.

Позитивно слід оцінити метрологічне опрацювання експерименту. Оцифрування макрошліфів виконувалося з роздільною здатністю 600 dpi із відповідним масштабом 0,0423 мм/піксель, а система була перевірена за калібрувальним еталоном. У роботі також наведено оцінки похибок вимірювання струму, напруги, швидкості подачі дроту, швидкості переміщення, концентрації CO₂ та температури.

Достатній рівень статистичної забезпеченості експерименту підтверджується тим, що дослідний масив охоплював 28 комбінацій технологічних параметрів, кожна з яких відтворювалася на трьох ідентичних зразках. Загалом для математичного аналізу було використано результати дослідження 84 макрошліфів. Для перевірки прогностичних моделей автором застосовано також перехресну валідацію LOOCV; для прогнозування ефективної ширини отримано RMSE близько 0,17 мм, а для висоти шару — менше 0,08 мм.

Наукова новизна роботи полягає насамперед у розвитку уявлень про захисне газове середовище не тільки як засіб ізоляції розплавленого металу від атмосфери, але й як активний технологічний фактор керування термогідродинамікою зварювальної ванни та макрогеометрією наплавленого шару.

До основних наукових результатів, що мають ознаки новизни, слід віднести:

1. Формалізацію впливу складу захисної суміші Ar–CO₂ на просторове формоутворення багатошарових структур із високоміцної сталі типу MoNiVa та встановлення взаємозв'язку між окиснювальним потенціалом газового середовища, поведінкою ванни та геометричними характеристиками наплавленого металу.

2. Встановлення особливостей прояву масштабного ефекту при зміні активності захисного газового середовища для тонко- та товстостінного WAAM.

3. Виявлення особливостей адаптивної реакції синергетичного джерела живлення на зміну складу газу, що проявляється у зміні фактичної масоподачі та енергетичних параметрів процесу.

4. Встановлення переваг дискретно-імпульсного CMT Cycle Step для стабілізації формоутворення високоміцних складнолегованих сталей порівняно з безперервними CMT-режимами.

5. Розроблення багатфакторних математичних моделей прогнозування макрогеометрії та алгоритмічного підходу до визначення параметрів траєкторії інструменту.

Зазначені результати узгоджуються з сформульованими в дисертації положеннями наукової новизни та в сукупності формують логічно завершену систему результатів.

Практичне значення одержаних результатів

Практична спрямованість роботи є достатньо вираженою. На основі проведених досліджень для сталі типу MoNiVa автором визначено раціональну область параметрів дискретного процесу СМТ-D_H із використанням суміші Ar–CO₂. У дисертації як основний технологічний діапазон рекомендовано 5–10 % CO₂ при лінійному тепловкладенні 310–330 Дж/мм. За цих умов отримано стабільні показники макрогеометрії та зменшення необхідних припусків на механічну обробку.

Окрему практичну цінність має розроблення алгоритмічного ланцюга, що поєднує прогнозування ефективної ширини і висоти шару з визначенням інкременту підйому пальника по осі Z та кроку між сусідніми проходами. У роботі наведено реалізацію відповідного розрахункового ядра мовою Python як основу для подальшого використання при автоматизованому формуванні траєкторій WAAM.

Таким чином, практичні результати роботи можуть бути використані під час технологічної підготовки роботизованого електродугового адитивного виробництва та при подальшій розробці адаптивних систем керування процесом.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та логіки викладення

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 193 сторінки, з яких 164 сторінки основного тексту. Робота містить 40 рисунків, 13 таблиць та список із 93 використаних джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету й завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, наведено положення наукової новизни, практичне значення результатів і особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану електродугового адитивного виробництва та фізичних механізмів, що визначають формоутворення. Значну увагу приділено гідродинаміці зварювальної ванни, термокапілярній конвекції Марангоні, механізмам перенесення металу СМТ, специфіці застосування HSLA-сталей, поверхневим оксидним системам та сучасним засобам прогнозування і керування процесом. Аналіз літературних джерел логічно приводить автора до постановки наукового завдання — встановлення взаємозв'язку між газовим середовищем, енергетикою дуги, масопереносом та макрогеометрією шару.

У другому розділі наведено матеріали, обладнання та методики досліджень. Особливо позитивним є детальний опис роботизованого комплексу та спроба забезпечити відтворюваність теплових умов експерименту. Автор підтримував міжшарову температуру на рівні 85 ± 10 °C та застосовував активне

охолодження, що дозволило зменшити вплив неконтрольованого накопичення тепла. Розроблено методики цифрової обробки телеметрії та автоматизованого визначення макрогеометричних характеристик за макрошліфами.

Третій розділ є основною експериментальною частиною роботи. Послідовне порівняння низьковуглецевої сталі ER70S-6 та сталі MoNiVa дозволило автору показати відмінність реакції різних матеріалів на зміну окиснювального потенціалу середовища. Досліджено безперервні та дискретні режими СМТ, вплив концентрації CO₂ на ширину, площу перерізу, форм-фактор, хвилястість і енергетичні показники процесу. Суттєвим результатом цього розділу є демонстрація можливості стабілізації формоутворення сталі MoNiVa за допомогою дискретного СМТ Cycle Step.

У четвертому розділі виконано статистичне узагальнення експериментальних результатів, побудовано регресійні моделі для різних стратегій масопереносу, здійснено їх валідацію та багатокритеріальну оптимізацію. Для дискретних режимів запропоновано топологічну модель, яка враховує просторову щільність мікроциклів, енергетичні характеристики та концентрацію CO₂. Результатом оптимізації стало визначення області допустимих технологічних параметрів та створення прототипу алгоритму розрахунку параметрів траєкторії.

Загальні висновки відповідають структурі проведених досліджень, відображають основні результати роботи та в цілому узгоджуються з поставленими завданнями.

Повнота оприлюднення та апробації результатів

За темою дисертації опубліковано 5 наукових праць, серед яких 3 статті у наукових фахових виданнях України та 2 тези доповідей на міжнародних наукових конференціях. Основні результати роботи доповідалися на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» у 2026 році та Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2025».

За змістом представлених публікацій основні наукові результати, що становлять предмет захисту, знайшли належне відображення у працях здобувача.

Особистий внесок здобувача та академічна доброчесність

З наведених у дисертації відомостей видно, що здобувач особисто брав участь у плануванні експерименту, проведенні роботизованого наплавлення, реєстрації та обробці телеметричних даних, цифровому аналізі макрогеометрії, побудові регресійних моделей, статистичному аналізі та розробленні програмного алгоритму.

Структура роботи, система посилань та викладення результатів не дають підстав для зауважень щодо коректності використання результатів інших дослідників. Дисертація має послідовну структуру, достатній обсяг власного експериментального матеріалу та містить результати, отримані в ході цілісного дослідницького циклу.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, вважаю необхідним висловити такі зауваження та дискусійні положення.

1. Запропоновані автором термофізичний індекс газу GTI та індекс газової активності GAI є цікавим способом формалізації впливу захисного середовища, однак їх кількісна ідентифікація у роботі розкрита не повністю.

У математичній моделі використовуються коефіцієнт чутливості (c_g), параметр інтенсивності переходу (χ) та критичне значення (GAI_{cr}), тоді як для типових газових середовищ у таблиці 3.1 індекси переважно характеризуються якісними рівнями — «низький», «помірний», «підвищений» тощо. У зв'язку з цим бажано уточнити, яким способом мають визначатися числові значення цих параметрів для нової газової суміші та чи можуть GTI і GAI на нинішньому етапі використовуватися як розрахункові критерії, а не лише як зручна фізична концепція опису процесу.

2. У роботі поняття «лінійне тепловкладення» фактично використовується для електричної енергії дуги без урахування ефективного ККД передачі теплоти у виріб.

Автор прямо зазначає, що коефіцієнт ефективності дугового нагрівання при експериментальному розрахунку не вводився, оскільки всі режими порівнювалися на одному обладнанні. Для внутрішнього порівняння це є зрозумілим припущенням. Водночас саме склад захисного газу в роботі змінюється у дуже широких межах — від аргону до CO_2 , тобто змінюються теплофізичні властивості плазми та умови теплопередачі. Тому при інтерпретації результатів бажано чіткіше розмежувати електричну погонну енергію дуги та фактичне тепловкладення у метал, а також пояснити, наскільки можливі зміни ефективності теплопередачі впливають на зроблені термодинамічні висновки.

3. Експериментальна методика передбачає активне усунення ефекту накопичення тепла шляхом охолодження кожного шару до міжшарової температури 85 ± 10 °C.

Це рішення підвищує відтворюваність експерименту та дозволяє коректніше ізолювати вплив досліджуваних факторів. Водночас у реальному багатошаровому WAAM температурний стан деталі змінюється з ростом її висоти, а накопичення тепла є одним із суттєвих факторів формоутворення. Тому доцільно уточнити, наскільки визначене технологічне вікно 5–10 % CO_2 та 310–330 Дж/мм зберігатиметься при інших міжшарових температурах або при природному тепловому накопиченні у великогабаритному виробі.

4. Поняття «кіберфізичне керування», яке широко використовується у дисертації, потребує більш чіткого розмежування між моніторингом, прогнозуванням та замкненим керуванням.

Замкнений контур, безпосередньо реалізований в експериментальній установці, належить насамперед до внутрішньої системи керування джерела Fronius TPS 500i, яке адаптує електричні параметри процесу. Телеметрія цього контуру надалі реєструється та аналізується автором. Розроблений у дисертації алгоритм прогнозує макрогеометрію та формує параметри майбутньої траєкторії, але з представленого опису не випливає, що виміряна геометрія поточного шару автоматично використовується для зміни положення пальника, складу газу або інших керуючих параметрів у реальному часі. Було б доцільно на захисті чітко

визначити, яка частина запропонованої системи є кіберфізичним моніторингом та прогнозуванням, а яка — власне замкненим адаптивним керуванням WAAM-процесом.

5. Межі багатокритеріального оптимуму істотно залежать від прийнятих автором граничних значень цільових функцій.

Для визначення допустимої області встановлено обмеження ($CV \leq 2,0\%$) та ($VED \leq 2,95$) кДж/см³. У тексті пояснено загальну доцільність мінімізації цих показників, однак кількісне обґрунтування саме зазначених граничних величин викладено недостатньо детально. Оскільки саме перетин цих обмежень формує рекомендоване технологічне вікно, було б корисно провести або принаймні обговорити аналіз його чутливості: як зміняться межі 5–10 % CO₂ і 310–330 Дж/мм, наприклад, при допустимому CV 1,5 % або 2,5 %.

6. Використання коефіцієнта варіації ширини ($CV = \sigma/\mu \cdot 100\%$) як одного з основних показників хвилястості має певне методичне обмеження.

Цей показник нормує абсолютне відхилення ширини на її середнє значення. Оскільки середня ширина валика сама суттєво змінюється зі складом газу та режимом наплавлення, однакова абсолютна амплітуда геометричних відхилень для двох режимів може давати різні значення CV. Слід позитивно відзначити, що в окремих частинах роботи автор паралельно аналізує (σ_W). Проте при формуванні оптимізаційного критерію доцільно було б обґрунтувати вибір саме відносного CV або використовувати його спільно з абсолютною характеристикою хвилястості.

7. У викладенні результатів багатокритеріальної оптимізації наявна числова неузгодженість, яку необхідно пояснити.

На стор. 171 при визначенні оптимального технологічного вікна зазначено діапазон лінійного тепловкладення 310–330 Дж/мм, але вже в наступному підсумковому реченні йдеться про дискретний режим потужністю близько 280 Дж/мм. Оскільки рекомендований рівень тепловкладення є одним із головних практичних результатів дисертації, ці значення необхідно узгодити та вказати, яке з них слід вважати остаточно рекомендованим.

Наведені зауваження мають переважно дискусійний та уточнювальний характер. Вони визначають можливі напрями подальшого розвитку проведених досліджень і не змінюють загальної позитивної оцінки отриманих наукових результатів.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота Красносельського Кирила Віталійовича «Керування формоутворенням багатшарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання встановлення закономірностей керування макрогеометрією та просторовою стабільністю багатшарових структур із високоміцних низьколегованих сталей шляхом комплексного регулювання газового середовища, енергетичних параметрів та характеру масопереносу.

Робота характеризується достатнім обсягом експериментальних досліджень, застосуванням сучасного роботизованого зварювального

обладнання, методів цифрової реєстрації та обробки даних, статистичного моделювання і програмних засобів прогнозування. Одержані результати мають наукову новизну та практичне значення для подальшого розвитку технологій електродугового адитивного виробництва.

За своєю актуальністю, змістом, обсягом виконаних досліджень, рівнем наукової новизни, обґрунтованістю висновків та практичним значенням дисертаційна робота відповідає вимогам чинного Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а також Вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40.

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

Офіційний опонент:

д.т.н., с.н.с., завідувач відділу металургії і технології зварювання високолегованих сталей і сплавів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України

Микола ЧЕРВ'ЯКОВ

Підпис д.т.н., с.н.с., завідувача відділу металургії і технології зварювання високолегованих сталей і сплавів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України М.О. Черв'якова засвідчую:

Т.в.о. вченого секретаря
Інституту електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України, к.т.н.
(посада уповноваженої особи)



Павло ТКАЧ

(підпис, Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)