

Рішення
разової спеціалізованої вченої ради
про присудження ступеня доктора філософії

Здобувач ступеня доктора філософії Кирил Красносельський, 1970 року народження, громадянин України, освіта вища: у 1992 році закінчив Запорізький машинобудівний інститут ім В.Я.Чубаря за спеціальністю «Обладнання і технологія зварювального виробництва», здобув кваліфікацію інженера-механіка

Разова спеціалізована вчена рада PhD 16750 Національного університету «Запорізька Політехніка» утворена відповідно до наказу Національного університету «Запорізька Політехніка» від 20 липня 2026 р, № 411-С

у складі:

голови разової спеціалізованої вченої ради

Дмитра Павленка, д-р техн. наук, професор, директор дослідницького центру передового досвіду синергії зв'язку, радіолокації та автономних систем Національного університету «Запорізька політехніка».

рецензентів:

Михайла Брикова, д-р техн. наук, професор, професора кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка»;

Євгена Вишнепольського, канд. техн. наук, доцент, доцента кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка».

опонентів:

Миколи Черв'якова, доктор техн. наук, с.н.с., завідувача відділу металургії і технології зварювання високолегованих сталей і сплавів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона (м. Київ);

Дениса Носова, канд. техн. наук, доцент, завідувача кафедри технології та устаткування зварювання Дніпровського державного технічного університету (м. Кам'янське).

на засіданні «10» вересня 2026 року прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 13 – Механічна інженерія на підставі публічного захисту дисертації «Керування формоутворенням багатошарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому

адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Дисертацію виконано у Національному університеті «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Запоріжжя.

Науковий керівник:

Руслан Куликовський, канд. техн. наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи та питань перспектив розвитку університету НУ «Запорізька політехніка»

Дисертацію подано у вигляді спеціально підготовленого рукопису, що містить нові науково обґрунтовані результати проведених Кирилом Красносельським досліджень, якими вирішено актуальну науково-прикладну задачу керування формоутворенням багат шарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом встановлення та використання закономірностей комплексного впливу захисного газового середовища, енергетичних параметрів дугового процесу і режимів керованого масопереносу на термогідродинаміку зварювальної ванни та макроеометрію наплавлених шарів. Результати мають суттєве значення для галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 131 – Прикладна механіка.

Дисертація оформлена згідно з вимогами, встановленими Міністерством освіти і науки України. Обсяг основного тексту дисертації та анотації відповідає освітньо-науковій програмі закладу відповідно до специфіки галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 131 – Прикладна механіка.

Вимоги пункту 6 «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 (зі змінами) дотримано.

Здобувач має 5 наукових публікацій за темою дисертації: 3 статті у наукових фахових виданнях України, 2 публікації – у матеріалах міжнародних наукових конференцій. Вимоги пунктів 8, 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 (зі змінами) дотримано.

Список праць, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Kulykovskiy R., Krasnoselsky K. Modeling of the influence of shielding gas composition on the geometry of the deposited layer in wire arc additive

manufacturing (WAAM). New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical

Engineering. 2026. No. 1. P. 68–78. DOI: 10.15588/1607-6885-2026-1-8.

2. Molochkov D., Krasnoselsky K. Shielding gas oxidation effects on geometry and energetics in wire arc deposition of high-strength steel. New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering. 2026. No. 2. P. 87–93. DOI: 10.15588/1607-6885-2026-2-10.

3. Красносельський К.В., Молочков Д.Є. Вплив вуглекислого газу на макроегеометрію та енергоефективність дрогового адитивного виробництва. Технічні науки та технології. 2026. № 2(44). С. 178–188. DOI: 10.25140/2411-5363-2026-2(44)-178-188.

Список праць, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Красносельський К. В., Куликовський Р. А., Молочков Д. Є. Вплив складу захисного газу на формування шару при СМТ-WAAM. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2026) : матеріали тез доповідей XVI Міжнародної науково-практичної конференції, м. Чернігів, 21–22 травня 2026 р. : у 3 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип. А. Л. Приступа [та ін.]. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2026. Т. 2. С. 104–105.

Молочков Д.Є., Красносельський К.В., Куликовський Р.А. Оптимізація процесу Wire Arc Additive Manufacturing шляхом динамічного керування складом захисного газу // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2025», випуск 9. – Херсон, Хмельницький: ХНТУ, 2025. – С. 182-184.

За критеріями «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 (зі змінами) наукові результати висвітлені у 5 публікаціях здобувача. Статті відповідають темі дисертації, обґрунтовують отримані наукові результати відповідно до мети, поставлених завдань та висновків. Усі 3 статті опубліковані в різних випусках наукових видань; мають активний індикатор DOI. Використання самоплагіату не виявлено.

У дискусії взяли участь голова і члени разової спеціалізованої вченої ради та висловили зауваження:

Дмитро ПАВЛЕНКО – голова, доктор технічних наук, професор, директор дослідницького центру передового досвіду синергії зв'язку, радіолокації та автономних систем Національного університету «Запорізька політехніка».

Дисертаційна робота Кирила КРАСНОСЕЛЬСЬКОГО є цілісним, логічно побудованим і завершеним науковим дослідженням. Автором на належному науковому рівні розкрито актуальну для сучасного адитивного виробництва

проблему стабільного формоутворення багатошарових структур із високоміцних низьколегованих сталей. Особливо слід відзначити комплексний підхід до дослідження впливу складу захисного газового середовища, енергетичних параметрів дугового процесу та режимів керованого масопереносу на термогідродинаміку зварювальної ванни і макрогеометрію наплавлених шарів. Отримані результати мають як наукову новизну, так і практичну цінність, зокрема для підвищення стабільності та прогнозованості процесів WAAM і подальшої інтеграції розроблених рішень у автоматизовані системи технологічного проектування. Висловлені в ході розгляду зауваження не знижують загальної позитивної оцінки роботи та можуть бути враховані автором у подальших дослідженнях.

Михайло Бриков – рецензент, д-р техн. наук, професор, професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій НУ «Запорізька політехніка».

Описуючи методологію експерименту, автор зазначає, що для контролю міжшарової температури використовувався інфрачервоний пірометр із жорстко зафіксованим коефіцієнтом теплової емісії на рівні 0,85. Проте зміна концентрації CO_2 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.

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.

При розробці термokinематичних і топологічних моделей у четвертому розділі автор використовує швидкість подачі дроту та концентрацію захисного газу як змінні фактори, досягаючи високої точності прогнозування макрогеометрії в межах дослідженого простору. Водночас кинематична швидкість переміщення пальника 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.

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.

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.

Євген Вишнепольський – рецензент, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування НУ «Запорізька політехніка».

Основний акцент у дослідженнях зроблено на макрогеометричних параметрах, енергетиці дуги та макропористості наплавлених валиків. Для більш комплексного обґрунтування переваг імпульсного режиму CMT 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.

Під час багатокритеріальної оптимізації процесу автор обґрунтовано використовує критерії геометричної точності та ефективності використання матеріалу. З огляду на промислову орієнтованість розробленого програмного модуля, практична цінність роботи зросла б, 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).

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.

Микола Черв'яков – опонент, доктор техн. наук, с.н.с., завідувач відділу металургії і технології зварювання високолегованих сталей і сплавів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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, багатопрхідних 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.

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 «виращування» відповідно до конкретного контексту. Формулювання «гарантує», «повністю виключає», «фундаментальний» доцільно застосовувати

лише у випадках, коли відповідні твердження безпосередньо підтверджені обсягом проведених досліджень.

Денис Носов — опонент, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри технології та устаткування зварювання Дніпровського державного технічного університету.

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, параметр інтенсивності переходу 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.

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.

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.

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 макроеометрію та формує параметри майбутньої траєкторії, але з

представленого опису не впливає, 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.

Межі багатокритеріального оптимуму істотно залежать від прийнятих автором граничних значень цільових функцій. Для визначення допустимої області встановлено певні обмеження. 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 % CO_2 і 310–330 Дж/мм, наприклад, при допустимому CV 1,5 % або 2,5 %.

6. Використання коефіцієнта варіації ширини 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 коефіцієнта варіації ширини. 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..

Результати відкритого голосування:

«За» – 5 членів ради,

«Проти» – 0 членів ради.

На підставі результатів відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада PhD 16750 присуджує Кирилу Красносельському ступінь доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Відеозапис трансляції захисту дисертації додається.

Голова разової спеціалізованої
вченої ради PhD 16750

Дмитро ПАВЛЕНКО

