

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

НУ «Запорізька політехніка»,

д. т. н., проф.

Вадим ШАЛОМЄЄВ



ВИТЯГ
з протоколу № 12

засідання кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання
конструкцій інженерно-фізичного факультету Національного університету
«Запорізька політехніка» (НУ «Запорізька політехніка»)
від «03» липня 2026 р.

ПРИСУТНІ:

Головуючий на засіданні - Капустян О.Є. – завідувач кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, к.т.н., доцент;

Секретар – **Аверченко І.П.**, ст. лаб. кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій.

11 співробітників кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій:

Бриков М.М. – професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, д-р техн. наук, професор;

Міщенко В. Г. – професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, д-р техн. наук, професор;

Попов С.М. – професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, д-р філос. наук, професор;

Нетребко В.В. – професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, д-р техн. наук, професор;

Бережний С.П. – доцент кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, канд. техн. наук, доцент;

Білоник І.М. – доцент кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, канд. техн. наук, доцент;

Лаптєва Г.М. – доцент кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, канд. техн. наук, доцент;

Лютова О.В. – доцент кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, канд. техн. наук, доцент;

Осіпов М.Ю. – доцент кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, канд. техн. наук, доцент;

Бажміна Е.А. – доцент кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, PhD, доцент;

Корнієнко О.Б. – старший викладач кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій;

І запрошений:

Куликовський Р.А. – проректор з науково-педагогічної роботи та питань перспектив розвитку університету, канд. техн. наук, доцент;

ПОРЯДОК ДЕННИЙ

Про попередній розгляд дисертації аспіранта кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Красносельського Кирила Віталійовича на тему: «Керування формоутворенням багатошарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» (науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент Р.А. Куликовський).

СЛУХАЛИ: Доповідь аспіранта Красносельського К.В. по завершенню дисертаційної роботи.

ПИТАННЯ: Під час обговорення учасники засідання поставили доповідачу 12 запитань.

Попов С.М.: Під час доповіді виникло питання щодо коректного визначення об'єкта і предмета дослідження. Для дисертаційної роботи принципово важливо, щоб об'єкт, предмет, мета, завдання, експериментальні дослідження, математичні моделі, висновки та положення наукової новизни були логічно пов'язані між собою. Прошу пояснити, що саме у роботі визначено як об'єкт і предмет дослідження?

Красносельський К.В.: Об'єктом дослідження є процес вільного просторового формоутворення багатошарових металевих структур методом електродугового адитивного виробництва WAAM. Предметом дослідження є закономірності впливу складу захисного газового середовища та кіберфізичних параметрів керування масопереносом на термогідродинаміку зварювальної ванни, енергетичний баланс і геометричну стабільність наплавлених стінок. Тобто робота спрямована не просто на дослідження зварювального процесу, а саме на керування формоутворенням багатошарових структур через поєднання газового середовища, енергетики дуги та режимів перенесення металу.

Попов С.М.: Є питання щодо методичної частини роботи. У дисертації використано багатофакторні математичні моделі. Поясніть, будь ласка, яким чином забезпечувалася достовірність отриманих моделей, які критерії були використані для перевірки їх адекватності, а також як оцінювалася похибка моделей.

Красносельський К.В.: Достовірність результатів забезпечувалася поєднанням експериментальної повторюваності, метрологічної оцінки похибок і статистичної перевірки побудованих моделей. У другому розділі роботи окремо розглянуто похибки прямих апаратних вимірювань, невизначеність непрямих розрахункових величин і статистичну інтерпретацію числових даних. Для мінімізації випадкових технологічних похибок кожна унікальна комбінація

параметрів «режим - газ» перевірялася на ідентичних зразках із подальшим аналізом макрошліфів.

Для предиктивних моделей у четвертому розділі застосовано кореляційно-статистичний аналіз, метод найменших квадратів, ANOVA-аналіз, F-критерій, коефіцієнт детермінації R^2 , RMSE та аналіз залишків. Наприклад, для безперервних режимів CMT-C модель ефективної ширини мала $R^2 = 0,959$, а модель висоти шару — $R^2 = 0,980$, що підтверджує їх високу статистичну значущість у межах дослідженого експериментального масиву. Для дискретних режимів CMT-D окремо оцінювалася топологічна модель, яка враховує кількість мікроциклів і істинний піковий струм.

Попов С.М.: Варто звернути увагу, що математичні моделі мають спиратися не лише на статистичну обробку експериментальних даних, а й на фізичне розуміння процесу. Якщо фізична природа процесу недостатньо пояснена, рівняння регресії не можуть бути самодостатнім доказом наукових результатів. Як у роботі враховано фізичний зміст отриманих залежностей?

Красносельський К.В.: У роботі математичні моделі не розглядаються як формальна статистична апроксимація. Вони побудовані з урахуванням фізичної природи процесу WAAM. Зокрема, у моделях враховано кінематичний фактор масоподачі, тепловкладення, склад газового середовища, термокапілярні потоки Марангоні, контракцію дуги та особливості дискретного масопереносу в режимі CMT Cycle Step.

Наприклад, введення теоретичної площі поперечного перерізу дозволило відокремити кінематичний фактор — тобто кількість наплавленого металу — від термогідродинамічного фактора, пов'язаного з розтіканням металу під дією термокапілярних сил. Саме тому моделі мають фізико-статистичний характер і використовуються для опису встановлених технологічних закономірностей, а не лише для математичного підбору кривих.

Попов С.М.: Під час підготовки до захисту доцільно не перевантажувати доповідь другорядними деталями математичної обробки. Водночас необхідно бути готовим детально пояснити методику, критерії достовірності та межі застосування моделей у відповідях на запитання.

Красносельський К.В.: Дякую, зауваження приймається. У доповіді основну увагу буде зосереджено на фізико-технологічній сутності роботи: як склад захисного газу та параметри масопереносу впливають на формоутворення WAAM-структур. Деталі статистичної перевірки моделей будуть підготовлені для відповідей на запитання. Особливо буде наголошено, що моделі є коректними в межах досліджених матеріалів, газових сумішей, режимів CMT та CMT Cycle Step і не можуть автоматично переноситися на будь-які інші матеріали без додаткової верифікації.

Білоник І.М.: Як відомо положення наукової новизни потребують максимально конкретного формулювання. Не варто надмірно акцентувати на загальновідомих процесах окиснення як на таких, що досліджені вперше.

Доцільніше підкреслити новий підхід до використання захисного газового середовища як чинника керування формоутворенням у процесі WAAM. Чи це зроблено?

Красносельський К.В.: Так, сам це й враховано в роботі. У дисертації не стверджується, що самі процеси окиснення або вплив активних газових компонентів є новими. Новизна полягає в тому, що захисне газове середовище розглянуто не лише як засіб захисту металу, а як активний інструмент керування формоутворенням у процесі WAAM.

Це підтверджено експериментально: у роботі досліджено різні захисні середовища - від чистого аргону до сумішей з CO_2 - та встановлено їхній вплив на макрогеометрію валика, ширину, висоту, форм-фактор, хвилястість і енергоефективність процесу. Окремо показано, що для сталі типу MoNiVa найбільш раціональним є застосування режиму CMT Cycle Step у середовищі з 5–10 % CO_2 при лінійному тепловкладенні.

Тобто наукова новизна полягає не у констатації факту окиснення, а у встановленні закономірностей, за якими склад захисного газу може цілеспрямовано використовуватися для стабілізації формоутворення багаточислових WAAM-структур.

Бережний С.П.: Робота є цікавою, актуальною та має практичне значення, оскільки стосується нових підходів до формування виробів із застосуванням електродугового адитивного виробництва. Водночас просимо пояснити, наскільки отримані результати зокрема розроблені математичні моделі, наскільки вони є універсальними, чи можуть бути використані для інших матеріалів, зокрема для нержавіючих сталей або інших груп сталей.

Красносельський К.В.: Отримані результати не слід автоматично переносити на інші групи матеріалів. Основні експериментальні закономірності та технологічний оптимум у роботі встановлено для сталей типу MoNiVa, а також із використанням ER70S-6 як базового низьковуглецевого матеріалу для відокремлення загальних термогідродинамічних ефектів від специфічних реологічних бар'єрів, пов'язаних із молібденом і ванадієм.

Для нержавіючих сталей або інших систем легування механізми можуть бути подібними за загальною фізикою — вплив газу на дугу, ванну розплаву та термокапілярні потоки, — але конкретні кількісні моделі, оптимальні концентрації CO_2 і режими наплавлення потребують окремої експериментальної перевірки.

Бережний С.П.: Поясніть, будь ласка, чому у роботі обрано саме газові суміші з вмістом вуглекислого газу в межах 5–10 %. Чи можна повністю відмовитися від CO_2 і використовувати лише аргон?

Красносельський К.В.: Повністю відмовитися від CO_2 і використовувати лише аргон технологічно можливо, але для досліджених умов це не є оптимальним рішенням з погляду стабільності формоутворення.

Чистий аргон виконує функцію захисту зони наплавлення, однак він є практично інертним середовищем і не забезпечує необхідного впливу на поверхневі процеси у ванні розплаву. Для сталі типу MoNiVa, яка містить молібден

і ванадій, важливим є не лише захист металу, а й керування змочуванням, розтіканням розплаву, термокапілярними потоками та стабільністю формування валика.

Додавання невеликої кількості CO_2 змінює активність захисного середовища. Це впливає на умови горіння дуги, характер теплового впливу на ванну розплаву та поверхневий натяг металу. У результаті змінюється характер течій у ванні розплаву, що безпосередньо впливає на ширину, висоту, хвилястість і стабільність наплавленого шару.

За результатами дослідження саме діапазон 5–10 % CO_2 виявився найбільш раціональним для сталі типу MoNiVa у режимі CMT Cycle Step. Такий вміст CO_2 є компромісним. Цього вмісту достатньо для керованого впливу на формоутворення, але недостатньо для надмірного окиснення розплаву та погіршення стабільності процесу.

Водночас збільшення вмісту CO_2 понад цей діапазон може мати негативний ефект, коли середовище стає надмірно активним, посилюється окиснення, змінюються умови теплового впливу дуги, а технологічне вікно стабільного формоутворення звужується. Тому в роботі обґрунтовано саме діапазон 5–10 % CO_2 як оптимальний не з позиції лише захисту металу, а з позиції керування макрогеометрією та стабільністю WAAM-процесу.

Капустян О.Є.: У роботі використовується поняття «енергетичний парадокс» у WAAM. Поясніть, будь ласка, які технологічні можливості або обмеження дає виявлений ефект, особливо під час вирощування масивних багатшарових об'єктів.

Красносельський К.В.: «Енергетичний парадокс WAAM» полягає в тому, що режими з найнижчим лінійним тепловкладенням не завжди є найбільш енергоефективними з погляду формування корисного об'єму металу. У роботі показано, що в активних газових середовищах відбувається звуження стовпа дуги, що призводить до більш локалізованого теплового впливу на ванну розплаву, на яку синергетичний контур джерела живлення реагує не лише зміною напруги, а й фактичним зниженням швидкості масоподачі дроту. У результаті зменшується обсяг наплавленого металу, а питома об'ємна енергоємність може зростати.

Технологічно це означає, що не можна оцінювати режим лише за лінійним тепловкладенням. Потрібно враховувати фактичну масоподачу, ефективну площу перерізу, стабільність стінки та питому об'ємну енергоємність. Особливо це важливо для масивних багатшарових структур, де помилковий вибір режиму може призвести до неефективного використання енергії, зниження продуктивності та погіршення геометричної стабільності.

Капустян О.Є.: У роботі згадується руйнування оксидних плівок на поверхні розплаву. Поясніть, будь ласка, чи потрібно руйнувати ці плівки лише на початку процесу, чи такий вплив має здійснюватися постійно під час наплавлення.

Красносельський К.В.: У випадку сталі типу MoNiVa проблема пов'язана з утворенням тугоплавких оксидних оболонок на основі молібдену та ванадію. Такі оксидні утворення можуть перешкоджати нормальній циркуляції металу у ванні

розплаву, погіршувати змочування та сприяти хвилястості або нестабільності формоутворення.

У роботі запропоновано механізм їх динамічного руйнування саме під час процесу наплавлення. У режимі CMT Cycle Step високоенергетичні сплески струму короткого замикання створюють імпульсний електродинамічний вплив на ванну розплаву. Це сприяє руйнуванню поверхневих оксидних оболонок і активізації внутрішньої циркуляції металу. Тобто мова йде не про разове руйнування на початку процесу, а про динамічний механізм стабілізації формоутворення впродовж наплавлення.

Капустян О.Є.: Чи досліджувалося у роботі, що саме відбувається зі зруйнованими оксидними включеннями надалі? Вони повністю розпадаються на елементи, залишаються у металі чи переходять в інший стан?

Красносельський К.В.: У межах цієї дисертаційної роботи спеціально не досліджувалося, що саме відбувається з оксидними включеннями після їх руйнування на рівні фазового складу або мікрохімічної еволюції. Тобто я не можу стверджувати, що вони повністю розпадаються на окремі елементи або повністю зникають із металу.

У роботі розглядалося інше питання: як наявність тугоплавких оксидних оболонок на основі молібдену та ванадію впливає на формоутворення, змочування, розтікання металу та стабільність валика. Основний висновок полягає в тому, що в режимі CMT Cycle Step високоенергетичні імпульси струму короткого замикання створюють електродинамічний вплив на ванну розплаву, який може руйнувати або диспергувати ці оксидні оболонки. Завдяки цьому активізується внутрішня циркуляція металу, покращується формування валика, зменшується хвилястість і не фіксується макropористість у досліджених перерізах. Саме цей технологічний ефект і був предметом дослідження.

Щодо подальшої долі таких частинок, коректно сказати, що вони, ймовірно, можуть переходити у дрібнодисперсний стан, частково залишатися у металі у вигляді дрібних неметалевих включень або виноситися потоками розплаву до поверхні. Але для точного підтвердження цього потрібні окремі матеріалознавчі дослідження. У межах цієї роботи таких досліджень не проводилося, оскільки дисертація виконувалася за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», а її основний фокус — керування макрогеометрією та стабільністю формоутворення у WAAM, а не детальний аналіз фазового складу оксидних включень.

Бриков М.М.: У класичному зварюванні вплив захисних газів на процес формування шва вже достатньо добре відомий. Що саме є новим у Вашій роботі, якщо аналогічні процеси досліджувалися раніше для зварювання низьковуглецевих і високоміцних сталей?

Красносельський К.В.: Дійсно, вплив захисних газів у класичному зварюванні досліджено досить широко. Але пряме перенесення цих закономірностей на WAAM є вкрай обмеженим. У зварюванні геометрія ванни значною мірою задається кромками деталей, типом з'єднання, зазором і масивом основного металу. У WAAM кожен новий валик формується на попередньо

наплавленому шарі, а геометрія стінки утримується балансом капілярних, гравітаційних, термокапілярних і гідродинамічних сил.

Новизна роботи як раз й полягає в тому, що захисний газ розглядається як активний чинник керування формоутворенням саме в умовах вільного поширювання, а не лише як засіб захисту металу. У роботі показано, що склад газу впливає не тільки на стабільність дуги, але й на термогідродинаміку ванни, ефективну ширину, хвилястість, енергоємність і технологічне вікно WAAM.

Міщенко В.Г. Прошу уточнити, яка марка сталі або група сталей використовувалася в дослідженні, а також чи можна розглядати отримані результати як універсальні для всіх сталей такого типу.

Красносельський К.В.: Основна частина дослідження стосується високоміцних низьколегованих сталей типу MoNiVa, тобто складнолегованих систем Mn–Ni–Mo–V. Додатково використовувався дріт ER70S-6 як референсний низьковуглецевий матеріал для перевірки базових гідродинамічних закономірностей і відокремлення їх від специфічних ефектів, пов'язаних із Mo та V.

Слід розуміти, що отримані кількісні залежності не є універсальними для всіх сталей. Вони є достовірними для досліджених матеріалів, газових сумішей і режимів. Водночас запропонований підхід - тобто поєднання телеметрії процесу, аналізу макрогеометрії, газової активності та топологічного опису CMT Cycle Step - може бути використаний як методична основа для дослідження інших матеріалів.

ВИСТУПИЛИ:

Куликовський Р.А. - науковий керівник, кандидат технічних наук, доцент, який відзначив, що дисертаційна робота Красносельського Кирила Віталійовича «Керування формоутворенням багатошарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» виконана на належному науково-технічному рівні, є логічно побудованою, завершеною та має чітко виражене науково-практичне спрямування.

Науковий керівник зазначив, що актуальність роботи зумовлена необхідністю забезпечення стабільного формоутворення багатошарових структур із високоміцних низьколегованих сталей типу MoNiVa у процесах електродугового адитивного виробництва. Особливе значення має вирішення проблем, пов'язаних із керуванням макрогеометрією наплавлених шарів, стабільністю ванни розплаву, впливом захисного газового середовища, параметрами масопереносу та енергетичними умовами процесу WAAM.

Було підкреслено, що дисертація має комплексний характер і базується на поєднанні фізичного експерименту, аналізу телеметричних параметрів процесу, дослідження макрогеометрії наплавлених зразків, математичного моделювання та оптимізації технологічних параметрів. У роботі обґрунтовано використання захисного газового середовища не лише як засобу захисту розплавленого металу, а як активного технологічного чинника керування формоутворенням у процесі WAAM.

Науковий керівник відзначив наявність у роботі наукової новизни, яка полягає у встановленні закономірностей впливу складу захисного газового середовища та параметрів керованого масопереносу на термогідродинаміку ванни розплаву, енергетичний баланс, макрогеометрію та просторову стабільність наплавлених стінок. Окремо було зазначено результати щодо формалізації ролі захисного газового середовища як інструмента формоутворення, виявлення енергетичних особливостей процесу WAAM та обґрунтування ефективності дискретного режиму CMT Cycle Step для стабілізації формування структур зі сталей типу MoNiVa.

Практичне значення роботи полягає у визначенні раціонального технологічного режиму електродугового адитивного вирощування сталей типу MoNiVa із застосуванням режиму CMT Cycle Step у захисному середовищі з вмістом 5–10 % CO₂, що забезпечує стабільне формоутворення структур, наближених до кінцевої форми, з високим коефіцієнтом корисної ширини та зменшенням припусків на подальшу механічну обробку. Важливим прикладним результатом також є розроблення предиктивних моделей і розрахункового алгоритму у вигляді Python-модуля, який може бути використаний як основа для інтеграції у САМ-системи під час проєктування технології WAAM.

Куликовський Р.А. наголосив, що здобувач продемонстрував належний рівень теоретичної підготовки, здатність до самостійного проведення експериментальних досліджень, аналізу складних технологічних процесів, побудови математичних моделей та інженерного узагальнення отриманих результатів. Висновки дисертації є обґрунтованими, відповідають поставленій меті та завданням дослідження, а виклад матеріалу є послідовним і таким, що відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць.

Науковий керівник зазначив, що дисертаційна робота Красносельського Кирила Віталійовича відповідає тематиці та науково-кваліфікаційним вимогам спеціальності 131 - Прикладна механіка, є завершеним самостійним дослідженням, містить наукову новизну, має теоретичне та практичне значення. Здобувач заслуговує на присудження ступеня доктора філософії, а дисертаційна робота може бути рекомендована до подальшого розгляду та публічного захисту в разовій спеціалізованій вченій раді.

Капустян О.Є. — завідувач кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, кандидат технічних наук, доцент, який зазначив, що безпосередньо здійснив її детальний аналіз дисертаційної роботи здобувача Красносельського Кирила Віталійовича.

Капустян О.Є. відзначив, що дисертаційна робота присвячена актуальній науково-практичній задачі - керуванню формоутворенням багатопарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання складу захисного газового середовища та параметрів масопереносу. На його думку, обрана тематика є своєчасною, оскільки технології WAAM мають значний потенціал для виготовлення великогабаритних металевих виробів, однак потребують обґрунтованих підходів до забезпечення стабільної геометрії, якості поверхні та повторюваності процесу.

Доповідач підкреслив, що робота має комплексний характер і поєднує експериментальні дослідження, аналіз технологічних параметрів процесу, оцінювання макрогеометрії наплавлених зразків, математичне моделювання та оптимізацію режимів. Окремо було відзначено, що здобувач не обмежився загальним описом впливу захисних газів, а розглянув захисне газове середовище як активний технологічний чинник керування формоутворенням у процесі WAAM.

Капустян О.Є. зазначив, що у дисертації наявна наукова новизна, яка полягає у встановленні закономірностей впливу складу захисного газового середовища та режимів керованого масопереносу на термогідродинаміку ванни розплаву, енергетичні характеристики процесу, макрогеометрію валика та стабільність формування багат шарових структур. Важливим результатом роботи є також обґрунтування доцільності застосування режиму CMT Cycle Step для сталей типу MoNiVa та визначення раціонального технологічного діапазону для забезпечення стабільного формоутворення.

Було зазначено, що практичне значення дисертації полягає у можливості використання отриманих результатів для обґрунтованого вибору складу захисного газового середовища, режимів наплавлення та параметрів траєкторії при електродуговому адитивному вирощуванні багат шарових структур. Окремо позитивно оцінено розроблення предиктивних моделей і розрахункового алгоритму, який може бути використаний як основа для подальшої інтеграції у САМ-системи.

Капустян О.Є. звернув увагу, що під час підготовки до захисту здобувачу доцільно чітко акцентувати саме прикладно-механічний зміст роботи: керування формоутворенням, макрогеометрією, стабільністю процесу та технологічними параметрами WAAM. Водночас висловлені під час обговорення зауваження мають переважно уточнювальний і редакційний характер та не знижують загального наукового рівня дисертаційної роботи.

За результатами аналізу Капустян О.Є. підтримав висновок про те, що дисертація Красносельського Кирила Віталійовича є завершеною самостійною науковою працею, відповідає спеціальності 131 — Прикладна механіка, містить наукову новизну, має практичне значення та може бути рекомендована до подальшого розгляду і публічного захисту в разовій спеціалізованій вченій раді.

УХВАЛИЛИ: Прийняти такий висновок щодо дисертаційної роботи здобувача К.В. Красносельського.

ВИСНОВОК

наукового семінару кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій інженерно-фізичного факультету НУ «Запорізька політехніка» про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації «Керування формоутворенням багат шарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» (науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент Р.А. Куликовський).» здобувача ступеня доктора філософії

Красносельського Кирила Віталійовича за спеціальністю 131 - Прикладна механіка (галузь знань 13 Механічна інженерія).

Актуальність роботи. На сучасному етапі розвитку прикладної механіки та автоматизованого машинобудування спостерігається стрімкий перехід адитивних технологій від етапу лабораторного прототипування до повноцінного промислового виготовлення функціональних виробів. Серед існуючих методів особливе місце посідає технологія електродугового адитивного виробництва (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM), яка належить до класу процесів прямого підведення енергії. Використання WAAM дозволяє створювати великогабаритні металеві конструкції складної геометричної форми з високою об'ємною швидкістю наплавлення та мінімальними матеріальними витратами. Останнім часом сфера застосування цього методу суттєво розширюється завдяки залученню високомізнних низьколегованих (HSLA) сталей, зокрема складнолегованих систем типу Mn-Ni-Mo-V (тип MoNiVa). Впровадження таких матеріалів відкриває широкі перспективи для цифрового виробництва відповідальних тривимірних компонентів, здатних надійно працювати в умовах екстремальних експлуатаційних навантажень у важкому машинобудуванні, транспортній та енергетичній галузях. Проте промислова реалізація пошарового 3D-друку при вирощуванні великих тривимірних конструкцій із зазначених сталей має свої специфічні термогідродинамічні та реологічні особливості. Головною з них є підвищена кінематична в'язкість розплаву в порівнянні з традиційними низьковуглецевими конструкційними матеріалами. В умовах вільного 3 просторового формоутворення, коли геометрія вирощуваного тіла не обмежується твердими стінками зварювальних фасок, а утримується виключно балансом капілярних і гравітаційних сил, висока в'язкість рідкої фази суттєво погіршує здатність металу до вільного латерального розтікання та знижує ефективність змочування попередньо наплавлених поверхонь. Це призводить до виникнення нестаціонарних коливань та просторового блукання ванни розплавленого металу під дією дугового розряду. Як наслідок, у масиві вирощуваного об'єкта можуть утворюватися небезпечні внутрішні дефекти, такі як локальні міжшарові несплавлення та приховані площинні порожнини. Крім того, реологічні особливості високов'язкої рідкої фази суттєво посилюють розвиток зовнішніх геометричних дефектів наплавлення. Це виявляється у значному зростанні показників поздовжньої та вертикальної хвилястості бічних поверхонь, появи неконтрольованих виплесків рідкого металу, а також у стіканні валика під дією сили тяжіння, що є особливо критичним при переході до складних просторових або похилих стратегій вирощування. Зазначений комплекс негативних явищ не лише погіршує якість поверхні та вимагає великих припусків на подальшу механічну обробку, але й створює пряму загрозу порушенню загальної стабільності формування шарів та призводить до раптового колапсу вирощуваної деталі безпосередньо під час друку. Таким чином, виникає гостра науково-технічна потреба у подоланні зазначених реологічних бар'єрів та розробці предиктивних моделей і методів автоматизованого кіберфізичного й хіміко-термодинамічного керування, здатних стабілізувати рух ванни розплаву та забезпечити формоутворення, наближене до кінцевої форми. В результаті виконання дисертаційної роботи було вирішено актуальну науково-прикладну

задачу розробки методології кіберфізичного та термодинамічного керування макрогеометрією WAAM-структур, що забезпечує стабільне формоутворення з наближеною до кінцевої форми геометрією із суттєвим скороченням обсягу матеріаломістких натурних випробувань.

Мета роботи – встановлення науково обґрунтованих фізико технологічних закономірностей сумісного впливу активного захисного середовища та енергетики дугового розряду на реологію ванни розплаву, а також розробка на їхній основі комплексної інженерної методики кіберфізичного керування просторовим формоутворенням багат шарових стінок при електродуговому адитивному вирощуванні високоміхних низьколегованих сталей.

Об'єкт дослідження – процес вільного просторового формоутворення багат шарових металевих структур методом електродугового адитивного виробництва (WAAM).

Предмет дослідження – закономірності впливу складу захисного газового середовища та кіберфізичних параметрів управління масопереносом на термогідродинаміку зварювальної ванни, енергетичний баланс та геометричну стабільність наплавлених стінок.

Для досягнення вказаної мети в роботі поставлено такі завдання:

1. Розробити узагальнений фізико-математичний підхід та напівемпіричну модель для формалізації термогідродинамічної ролі захисного газу як самостійного інструменту впливу на геометрію наплавлення, ввівши нові інтегральні критерії: термофізичний індекс газу та індекс газової активності.

2. Встановити експериментальним шляхом закономірності впливу широкого градієнта концентрації вуглекислого газу в аргоні на макрогеометрію багат шарових стінок для еталонної та складнолегованої (MoNiVa) сталей з метою виявлення масштабного ефекту теплової інерції та визначення реологічних обмежень, викликаних формуванням тугоплавких оксидних плівок.

3. Дослідити кіберфізичні характеристики процесу на основі високочастотного логування внутрішньої телеметрії джерела живлення для кількісної фіксації явищ адаптивного дроселювання та форсування масоподачі, а також розкриття механізму високоенергетичного пробиття оксидних плівок у дискретно-імпульсному режимі CMT Cycle Step.

4. Побудувати предиктивні багат факторні поліноміальні моделі макрогеометрії (висоти шару та ширини валика) із врахуванням перехресних членів взаємодії енергетики дуги та складу газу, та виконати багатокритеріальну оптимізацію простору допустимих рішень для визначення раціонального технологічного вікна параметрів.

5. Створити та валідувати комплексну інженерну методику і кіберфізичний алгоритм автоматизованого проєктування технології WAAM у вигляді автономного програмного модуля для інтеграції у сучасні САМ-системи, що гарантує бездефектне формування цільової 3D-структури.

Методи дослідження. включали теоретичний аналіз термогідродинаміки ванни розплаву та термокапілярних течій Марангоні; експериментальне електродугове адитивне наплавлення сталей типу MoNiVa у середовищах Ar/CO₂

із використанням режимів CMT та CMT Cycle Step; високочастотну реєстрацію телеметричних параметрів процесу; макроструктурний аналіз поперечних перерізів наплавлених зразків із застосуванням комп'ютерного зору; статистичну обробку експериментальних даних, кореляційно-регресійний аналіз, побудову предиктивних поліноміальних моделей, багатокритеріальну оптимізацію методом поверхонь відгуку та програмну реалізацію розрахункового алгоритму у вигляді Python-модуля для подальшої інтеграції у САМ-системи.

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження:

1. Уперше для умов електродугового адитивного вирощування багат шарових структур із високоміцних низьколегованих сталей типу MoNiVa формалізовано роль захисного газового середовища як активного технологічного чинника керування формоутворенням. Встановлено, що зміна вмісту CO_2 у сумішах Ar/CO_2 впливає на окиснювальний потенціал дугового середовища, термокапілярні течії у ванні розплаву та макрогеометричні параметри наплавленого шару.

2. Уточнено закономірності прояву масштабного ефекту газової активності в умовах тонкостінного WAAM. Показано, що за низького тепловкладення підвищення активності газового середовища може обмежувати конвективний перерозподіл металу та спричиняти зменшення площі поперечного перерізу наплавленого шару.

3. Уперше в межах досліджених режимів CMT-WAAM для сталей типу MoNiVa зафіксовано та математично описано ефект, визначений у роботі як «енергетичний парадокс WAAM», коли режими з нижчим лінійним тепловкладенням можуть формувати вищу питому об'ємну енергоємність через зміну фактичної масоподачі та умов горіння дуги.

4. Обґрунтовано механізм підвищення стабільності формоутворення наплавленого шару зі сталей типу MoNiVa шляхом застосування дискретно-імпульсного режиму CMT Cycle Step. Показано, що імпульсний характер масопереносу та короткочасні піки струму створюють локальний електродинамічний вплив на ванну розплаву, сприяють зменшенню негативного впливу тугоплавких оксидних плівок на основі молібдену і ванадію та забезпечують стабілізацію макрогеометрії наплавленої стінки.

5. Набули подальшого розвитку методи прогнозування макрогеометрії WAAM-структур шляхом побудови багатофакторних предиктивних моделей, які враховують взаємодію складу захисного газового середовища, енергетичних параметрів процесу та режиму керованого масопереносу.

Практичне значення одержаних результатів полягає у визначенні раціонального технологічного режиму для електродугового адитивного вирощування сталей типу MoNiVa, а саме застосування дискретного режиму CMT Cycle Step CMT-D_H у захисному середовищі з вмістом 5–10 % CO_2 при лінійному тепловкладенні 310–330 Дж/мм.

Встановлено, що таке поєднання технологічних параметрів забезпечує стабільне формоутворення багат шарових структур, наближених до кінцевої форми, з коефіцієнтом корисної ширини понад 95 %, відсутністю зафіксованої

макропористості у досліджених перерізах, зменшенням хвилястості бічних поверхонь та скороченням припусків на подальшу механічну обробку.

На основі отриманих експериментальних даних розроблено та валідовано предиктивні математичні моделі, які дозволяють прогнозувати основні макрогеометричні параметри наплавленого шару залежно від складу захисного газового середовища та параметрів режиму наплавлення. На базі цих моделей створено автономний розрахунковий алгоритм у вигляді Python-модуля, який може бути використаний як технологічна основа для інтеграції у САМ-системи.

Практична цінність такого модуля полягає в автоматизованому визначенні базових параметрів траєкторії вирощування, зокрема кроку зсуву інструменту та інкременту підйому по осі Z. Це дає змогу формалізувати вибір технологічних параметрів, зменшити залежність результату від суб'єктивного досвіду оператора, скоротити кількість пробних наплавлень і підвищити відтворюваність процесу проєктування WAAM-структур.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, результати досліджень, висновки та рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, отримані особисто здобувачем. Самостійно сформульовано мету та завдання дослідження, виконано огляд і аналіз вітчизняних та закордонних наукових джерел щодо процесів електродугового адитивного виробництва (WAAM) та реологічних особливостей формоутворення просторових конструкцій із високоміцних сталей. Здобувачем розроблено план експериментальних досліджень, здійснено роботизоване наплавлення дослідних зразків із низьковуглецевої та складнолегованої (MoNiVa) сталей у різних режимах за умов широкого градієнта захисних газових середовищ, проведено реєстрацію телеметрії процесу та цифрову обробку геометричних параметрів на основі розроблених алгоритмів комп'ютерного зору. Особисто побудовано багатофакторні поліноміальні регресійні моделі другого порядку, виконано статистичний та кореляційний аналіз сумісного впливу складу захисного газу (концентрації CO₂) та лінійного тепловкладення дуги на ширину, висоту, форм-фактор валика, показники бічної хвилястості та питому об'ємну енергоємність наплавлення. Здобувачем реалізовано процедуру багатокритеріальної оптимізації простору допустимих рішень із використанням методології поверхонь відгуку та методу накладання контурів для визначення раціонального технологічного вікна параметрів. На основі отриманих результатів сформульовано комплексну інженерну методику, кіберфізичний алгоритм та функціональний програмний Python-модуль для автоматизованого проєктування траєкторій інструменту в САМ-системах з метою забезпечення покращеної макрогеометрії виробів.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (КЗЯТПС – 2026), м. Чернігів, 21–22 травня 2026 р., та Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2025», м. Херсон – м. Хмельницький, 2025 р. За результатами апробації опубліковано тези доповідей у матеріалах зазначених конференцій.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 3 наукових працях:

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 макрогеометрію та енергоефективність дрового адитивного виробництва. *Технічні науки та технології*. 2026. № 2(44). С. 178–188. DOI: 10.25140/2411-5363-2026-2(44)-178-188.

УХВАЛИЛИ: з урахуванням зазначеного, на засіданні кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій НУ «Запорізька політехніка», визнати, що дисертація Красносельського Кирила Віталійовича «Керування формоутворенням багатошарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, у якій розв'язано актуальну науково-практичну задачу забезпечення керованого та стабільного формоутворення багатошарових структур із високоміцних низьколегованих сталей, отриманих методом електродугового адитивного виробництва. Дисертація містить наукову новизну, має теоретичне і практичне значення

У 3 наукових публікаціях відображені основні результати дисертації, з них 3 статті у наукових фахових виданнях України.

Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44).

З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Красносельського Кирила Віталійовича дисертація «Керування формоутворенням багатошарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

Присутні на засіданні кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорозька політехніка» подають вченій раді закладу пропозицію, щодо кандидатур до складу разової ради для розгляду та захисту дисертаційної роботи Красносельського Кирила Віталійовича у такому складі:

Павленко Дмитро Вікторович, д.т.н., професор, директор дослідницького центру передового досвіду синергії зв'язку, радіолокації та автономних систем НУ «Запорізька політехніка» - **голова ради**;

Черв'яков Микола Олегович, д.т.н., завідувач відділу металургії і технології зварювання високолегованих сталей і сплавів № 019 Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України – **опонент**;

Носов Денис Геннадійович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри технології та устаткування зварювання Дніпровського державного технічного університету – **опонент**;

Бриков Михайло Миколайович, д.т.н., професор, професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій – **рецензент**;

Вишнепольський Євген Валерійович, к.т.н., доцент, доцент кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка» – **рецензент**.

Результати голосування: за рекомендацію голосування дисертації Красносельського Кирила Віталійовича на тему: «Керування формоутворенням багат шарових структур із високоміцних низьколегованих сталей при електродуговому адитивному виробництві шляхом регулювання захисного газового середовища» до захисту - 12, проти - 0, утримались - 0.

Головуючий на засіданні,
завідувач кафедри
інтегрованих технологій зварювання та
моделювання конструкцій
кандидат технічних наук, доцент

Олексій КАПУСТЯН

Секретар,
ст. лаб. кафедри
інтегрованих технологій зварювання та
моделювання конструкцій

Ірина АВЕРЧЕНКО