

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

**Молочкова Дениса Євгенійовича**

на тему «**Покращення керованості процесу формоутворення шарів металу при 3D-друці на основі електродугового зварювання**»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі знань **13 Механічна інженерія**

за спеціальністю **131 Прикладна механіка**

### **Актуальність теми дисертації**

В сучасному виробничому процесі акцент робиться на збільшення функціональності та тривалості служби компонентів машин, устаткування та інструменту, що часто досягається за рахунок використання новітніх матеріалів із вдосконаленими характеристиками. Такі матеріали, незважаючи на їх високі експлуатаційні властивості, мають і значну ціну, тому оптимальне використання матеріалів є пріоритетом у виробництві. Підвищення ефективності використання матеріалів досягається шляхом використання передових технологій адитивного виробництва, які дозволяють оптимізувати співвідношення кількості витраченого матеріалу до ваги готового виробу.

Використання адитивної технології на основі електродугового зварювання плавким електродом забезпечує високу ефективність 3D-друку, але якість вирощених деталей часто виявляється неприйнятною, оскільки відхилення форми таких деталей і геометрії їх поверхонь від номінальних параметрів значно погіршує точність розмірів та механічні характеристики, які повинні відповідати допускам, встановленим розробниками. Використання механічної пост-обробки різанням вирішує проблему якості поверхонь і геометричної точності, але видалення надлишкового матеріалу, доданого у припуск на обробку, а також використання ріжучих інструментів призводить до додаткових витрат матеріалів і збільшення часу виробництва. Характерна для методу WAAM хвилястість поверхонь негативно впливає як на міцність деталей і стійкість до тріщиноутворення, так і на процес різання, викликаючи ударне навантаження на інструмент. Нерівномірність поверхонь має бути врахована на етапі їх проєктування або виробництва. Прогнозування механічних характеристик вирощених компонентів ускладнюється нестабільною нерівномірністю бокових поверхонь в повздовжньому і поперечному до шарів напрямках, яка утворюється особливістю перенесення металу та формування валиків у процесі адитивного виробництва на основі електродугового зварювання плавким електродом.

Оптимізація процесу формоутворення валиків металу є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить забезпечити якісну геометрію поверхонь вирощуваних деталей, покращити ефективність використання матеріалів і скоротити об'єм пост-обробки.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни**

Наукова новизна роботи полягає у встановленні залежності нерівномірності поверхонь вирощуваних об'єктів від напружено-деформованого стану присадного дроту, зносу контактного наконечника і від динамічних процесів у ванні розплавленого металу, що комплексно впливають на процес формоутворення валиків із жароміцних сплавів при адитивному виробництві на основі електродугового зварювання плавким електродом в середовищі захисних газів. Це дозволило встановити раціональні режими вирощування деталей та забезпечити зменшення відхилення форми поверхні до 60%, підвищення стабільності її геометрії в три рази за рахунок контролю положення електроду відносно центральної точки. Крім того, вперше експериментально-розрахунковим шляхом доведено вплив напружено-деформованого стану присадного дроту на нелінійність швидкості зношування контактної наконечника в процесі адитивного виробництва на основі електродугового зварювання та отримано адекватні математичні моделі залежності величини відхилення присадного дроту від основних параметрів контактної взаємодії дроту з наконечником. Отримані моделі відображають комплексний вплив напружено-деформованого стану присадного дроту на величину його відхилення. Розроблено і обґрунтовано методику програмної компенсації відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту, згідно якої остання набуває змінного характеру, який керується розробленими нейронними моделями на основі експериментальних і статистичних даних.

Достовірність отриманих результатів забезпечена використанням комплексу сучасних методів експериментального дослідження з високою надійністю та роздільною здатністю. Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання щодо нормалізації нерівномірності бокових поверхонь вирощених деталей, зменшення загальної хвилястості і покращення контролю над формоутворенням валиків виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

## **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Молочкова Дениса Євгенійовича повністю відповідає стандарту освіти зі спеціальності 131 Прикладна механіка галузі знань 13 Механічна інженерія та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Прикладна механіка. Здобувачем виконано інформаційний пошук методів розв'язання задач дослідження, проведено критичний аналіз джерел наукової літератури по визначеній тематиці, методик проведення експерименту і надано опис та аналіз результатів дослідження. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Удосконалення зварювальних процесів та технологій зварювання різних сплавів».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою. Стиль викладання матеріалу чіткий та зрозумілий з використанням загальноновживаної термінології наукового напрямку, робота добре структурована.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури і 6 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 230 сторінок, у тому числі основного тексту дисертації 173 сторінка, 67 рисунків, 18 таблиць, 6 додатків і список використаних джерел із 176 бібліографічних найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, описано методи дослідження, надана інформація про наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі проведено детальний аналіз літературних джерел з дослідження існуючих проблем за напрямом роботи. Зокрема автор відзначає, що обмежене використання технології адитивного виробництва на основі електродугового зварювання плавким електродом без пост-обробки обумовлено низькою якістю поверхонь і точністю вирощених

деталей. Визначено, що ключовим фактором для покращення якості є нормалізація нерівномірностей поверхонь, зокрема стабілізація положення присадного дроту відносно центральної точки інструменту. Автор висуває гіпотезу, що на відхилення дроту впливають його напружено-деформований стан та умови тертя з контактним наконечником. Таким чином передбачається, що дослідження швидкості зношування наконечників від властивостей присадного дроту дозволить оптимізувати процес і зменшити потребу в пост-обробці.

В другому розділі надано методика науково-експериментальних досліджень напружено-деформованого стану зварювального присадного дроту. Зокрема разом з вимірюванням геометричних параметрів і мікротвердості зразків присадного дроту автором пропонується методика визначення модулю пружності зразків присадного дроту методом триточкового згинання. Також виділяється розроблена автором методика вимірювання сили контактної взаємодії присадного дроту і наконечника з використанням промислового робота, як складової лабораторного устаткування. Запропонована методика експериментального дослідження величини відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту з плануванням факторних експериментів і використанням програмного пакету ANSYS Mechanical для моделювання проведених експериментів. Аналіз методом скінчених елементів відіграє важливу роль, як в дослідженні умов контактної взаємодії дроту з наконечником, так і в дослідженні експлуатаційних характеристик вирощених зразків. Додатково автором було визначено критерії оцінки якості поверхонь вирощених деталей на основі міжнародних стандартів з вимірювання і оцінки параметрів поверхонь.

У третьому розділі здобувачем представлено результати досліджень, спрямованих на пошук оптимальних технологічних параметрів процесу адитивного виробництва на основі електродугового зварювання плавким електродом для жароміцних сплавів, які забезпечують стабільність формоутворення валиків і мінімальну нерівномірність бокових поверхонь вирощуваних стінок. Експериментальними дослідженнями визначено діапазон швидкості подачі дроту і швидкості наплавлення, який забезпечує стабільне формоутворення валиків. З'ясовано, що високі значення обох параметрів призводять до перегріву і стікання металу, а швидкість наплавлення вище 60 см/хв викликає нестабільність геометрії і розриви валиків.

Автором визначено, що швидкість подачі дроту значно впливає на ширину валика, але менше на його висоту. Оптимальні комбінації швидкості подачі дроту і швидкості наплавлення забезпечують середнє відхилення форми поверхонь до 1,21 мм зі стандартним відхиленням 0,23 мм. Здобувачем розроблено метод зниження нерівномірності поверхонь за допомогою імпульсного нанесення матеріалу, що зменшує тепловнесення і покращує контроль над ванною розплавленого металу. Цей метод знижує похибку форми до  $0,47 \pm 0,08$

мм. Імпульсний метод покращує ефективність використання матеріалу, стабільність формоутворення і передбачуваність геометричних параметрів вирощуваних елементів.

Четвертий розділ присвячено висвітленню результатів досліджень впливу нерівностей поверхні вирощених деталей на їхні механічні властивості, а також відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту. Здобувач описує, що заміна зношеного контактного наконечника на новий створює дефекти геометрії, які змінюють розподіл напружень у зразках, що спричиняє збільшення максимальних напружень та зниження механічних властивостей. Утворені нерівності поверхні збільшують концентрацію напружень, що сприяє утворенню тріщин і прискорює руйнування деталей при циклічному навантаженні. Визначена залежність між шириною стінки та напруженнями дозволяє враховувати вплив нерівностей на міцність і довговічність конструкцій на етапі проектування.

Автор визначає, що значну частину відхилень присадного дроту викликає знос контактного наконечника та напружено-деформований стан дроту. Шляхом проведення натурних експериментів автором виміряно швидкість зношування контактних наконечників при використанні присадних дротів із жароміцних і низьковуглецевих нелегованих сталей. Визначено, що нелінійність швидкості зношування контактного наконечника визначається непостійними умовами контакту між дротом і наконечником. Результати комп'ютерного моделювання і натурних експериментів підтвердили залежність між напружено-деформованим станом дроту, зносом контактного наконечника і відхиленням дроту від центральної точки інструменту. Для передбачення величини відхилення присадного дроту та її компенсації були розроблені математичні моделі на основі нейронних мереж, які описують зв'язок параметрів присадного дроту зі зносом наконечника та відхиленням дроту.

У п'ятому розділі описується алгоритм коригування відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту. Розроблений алгоритм використовує стандартні функції контролера промислового робота, що робить його універсальним і простим у впровадженні. Автор демонструє практичне застосування розробки, підтверджуючи її ефективність в лабораторних і промислових умовах. Впровадження компенсації відхилення дроту забезпечило стабільне і передбачуване положення присадного дроту з відхиленням до  $\pm 0,2$  мм по координаті X і  $\pm 0,12$  мм по координаті Y протягом використання 1000 метрів дроту.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. №40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

## **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації повністю висвітлені у 7 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у фахових виданнях України, з яких 1 стаття у виданні, яке включене до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS; 3 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях. Публікації здобувача мають достовірну наукову базу та є результатом самостійних досліджень. Наукові положення та висновки дисертації, що виносяться на захист, належать здобувачу. В усіх наукових публікаціях дотримано принципи академічної доброчесності, всі запозичені результати інших авторів мають відповідні посилання. Наукові результати досліджень, які описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

## **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

1. У роботі було б доцільно навести класифікацію факторів, які визначають позиційну точність робототехнічного обладнання, що використовується при адитивному виробництві на основі електродугового зварювання плавким електродом.
2. В дисертації показники якості вирощених деталей поділяються на показники відхилення форми і показники ефективності використання матеріалу. Вважаю, що додаткову увагу можна було б приділити показникам технологічності вирощених заготовок, які безпосередньо пов'язані з ефективністю використання матеріалу.
3. Бажано навести більше конкретики при порівняльній оцінці виміряних відхилень форми вирощених зразків, наприклад, із застосуванням стандартів, які регулюють геометричні допуски, такі як ISO 1101, або стандарт ISO 2768-2 "General tolerances - Part 2: Geometrical tolerances for features without individual tolerance indications", який містить таблиці з рекомендованими допусками на відхилення форми та розташування для різних класів точності

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

## **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Молочкова Дениса Євгенійовича на тему «Покращення керованості процесу формоутворення шарів

металу при 3D-друці на основі електродугового зварювання» виконана на високому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для Механічної інженерії. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

За актуальністю, новизною та об'ємом одержаних результатів, їх практичним значенням дисертаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича відповідає всім вимогам, що ставляться до дисертації на здобуття ступеня доктора філософії, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

**Рецензент:**

завідувач кафедри технології машинобудування  
Національного університету «Запорізька політехніка»,  
кандидат технічних наук, доцент



Сергій ДЯДЯ



Підпис Сергія Дяді

Засвідчую:

Начальник відділу кадрів

Мішу / Ліза Михайлівна