

## 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.**

Аддитивне виробництво на основі електродугового зварювання плавким електродом є універсальною та доступною технологією завдяки використанню стандартного масового обладнання і широкому розповсюдженні присадних матеріалів у вигляді дроту. Відомо, що зазначена технологія виділяється високою продуктивністю і гнучкістю дизайну. Однак низька деталізація та якість поверхонь вирощених деталей погіршують якість і експлуатаційні властивості деталей. Дисертаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича розкриває важливу проблему утворення непередбачуваних дефектів форми та геометрії вирощуваних деталей, викликану природою дугового процесу нанесення матеріалу, а також невідповідністю фактичних геометричних параметрів системи і її кінематичної моделі через знос інструменту і неточність позиціонування присадного дроту. Вирішення проблеми надлишкової нерівномірності поверхонь вирощуваних об'єктів є актуальною задачею, а підвищення точності вирощуваних деталей має основне значення для функціональних характеристик вирощених деталей, екологічності, об'єму пост-обробки, можливості вирощування складної геометрії, а також для привабливості впровадження цієї технології в різних галузях промисловості.

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

Новизна цієї роботи полягає в тому, що встановлено взаємозв'язок між нерівномірністю поверхонь вирощуваних об'єктів і напружено-деформованим станом присадного дроту, зносом контактного наконечника, а також динамічними процесами у ванні розплавленого металу. Ці фактори комплексно впливають на формування валиків із жароміцних сплавів при адитивному виробництві на основі електродугового зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів. Зокрема вперше встановлено і доведено, що знос контактної наконечника та відхилення присадного дроту від центральної точки

інструменту спричиняють нерівномірності поверхонь вирощуваних деталей. Вперше експериментально та розрахунковим шляхом визначено залежність нелінійної зміни інтенсивності зношування контактної наконечника від напружено-деформованого стану присадного дроту під час адитивного виробництва основи електродугового зварювання. Вперше розроблено регресійні моделі та моделі на основі нейронних мереж, що описують залежність величини відхилення присадного дроту від основних параметрів його контактної взаємодії з наконечником, враховуючи вплив напружено-деформованого стану дроту. Вперше розроблено та обґрунтовано методіку програмної компенсації відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту, згідно якої координати центральної точки інструменту в кінематичній моделі робота контролюються розробленими математичними моделями.

Положення наукової новизни повністю відповідають завданням, поставленим перед науковою роботою. Сформульовані автором висновки є обґрунтованими, що підтверджується верифікованими результатами чисельних та експериментальних досліджень, доброю збіжністю результатів скінчено-елементного моделювання з результатами прямих вимірювань. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в фахових наукових виданнях та пройшли апробацію на міжнародних конференціях з прикладної механіки, зварювання та споріднених процесів і технологій.

Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання щодо нормалізації нерівномірності бокових поверхонь вирощених деталей, зменшення загальної хвилястості і покращення контролю над формоутворенням валиків виконано в повному обсязі. Результати досліджень, якість їх виконання та узагальнення свідчать, що здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

Представлена дисертаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича за своїм змістом відповідає стандарту освіти зі спеціальності 131 Прикладна механіка галузі знань 13 Механічна інженерія та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Прикладна механіка. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Удосконалення зварювальних процесів та технологій зварювання різних сплавів».

Після аналізу представленого звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння можна стверджувати, що кваліфікаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича є результатом його власних наукових досліджень. У роботі відсутні ознаки

фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату, запозичень або несанкціонованого використання здобувачем результатів інших авторів. Використані дисертантом ідеї, результати та тексти інших авторів чітко відзначені відповідними посиланнями.

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

Дисертаційна робота написана українською мовою. Суть дисертаційної роботи подана послідовно та зрозуміло. Автором використано загальноживану термінологію наукового напрямку, що сприяє повному розумінню представлених результатів досліджень.

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 наведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, сформульовано основні задачі дослідження, надано методи дослідження, виділено наукову новизну результатів дослідження і їх практичне значення, визначений особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі розкривається проблема обмеженості застосування технології адитивного виробництва на основі електродугового зварювання плавким електродом через нерівномірності поверхонь деталей, що потребують додаткової механічної пост-обробки. Це збільшує час виробництва та знижує ефективність використання матеріалів. Аналіз літературних джерел показує, що нерівномірності поверхонь також негативно впливають на механічні властивості деталей, але окрім збільшення товщини стінок і застосування механічної обробки різанням інших механізмів вирішення проблеми не пропонується. Збільшення товщини стінок для досягнення потрібних механічних властивостей призводить до підвищення маси деталей, що, в свою чергу, так само призводить до збільшення маси деталей і зниження ефективності використання матеріалів.

Автор висуває гіпотезу, що відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту є основною причиною утворення нетипової або надлишкової нерівномірності поверхонь і відхилення форми деталей. Припускається, що відхилення присадного дроту є комплексною проблемою, пов'язаною з напружено-деформованим станом дроту і умовами його взаємодії з контактним наконечником. Аргументується, що традиційні методи підвищення зносостійкості матеріалів наконечника не є оптимальними для досліджуваної технології, оскільки додаткове збільшення твердості матеріалу наконечника має зворотній зв'язок з електропровідністю матеріалу. Використання стандартних контактних

наконечників з оптимальним балансом електропровідності та зносостійкості є більш економічно доцільним.

Автором пропонується рішення проблеми відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту шляхом механічного коригування його положення відносно зварювального пальника. Зазначається, що механічне коригування положення присадного дроту є універсальним методом для покращення якості деталей. Таким чином, однією з найважливіших задач зазначено встановлення залежності між параметрами процесу та величиною відхилення дроту, що дозволить краще планувати технологічні зупинки виробництва.

В підсумку автор зазначає, що для покращення якості вирощених деталей і зменшення потреби в пост-обробці необхідно стабілізувати положення присадного дроту відносно центральної точки інструменту, а також дослідити швидкість зношування наконечників з використанням різних дротів для оптимізації періодичності їх заміни.

У другому розділі автор наводить загальну методика досліджень відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту, обґрунтовується вибір матеріалів. Детально описується методика вимірювань геометричних параметрів присадних дротів, контактних наконечників і вирощених зразків. Наведено методика проведення аналізу контактної взаємодії присадного дроту з наконечником методом скінчених елементів, який відіграє важливу роль в проведених дослідженнях. Також наведено методика вимірювання величини контактної опору між присадним дротом і наконечником, описано методика визначення сили контактної взаємодії присадного дроту з наконечником, сформульовано критерії оцінки якості геометрії поверхонь вирощуваних об'єктів.

У третьому розділі детально описано дослідження з оптимізації основних технологічних параметрів процесу адитивного виробництва на основі електродугового зварювання плавким електродом в середовищі захисних газів. На основі проведених факторних експериментів автором було визначено діапазон основних технологічних параметрів для забезпечення стабільності процесу вирощування, а також знайдено оптимальні комбінації параметрів для забезпечення прийнятної якості поверхонь вирощуваних об'єктів. Ключовою частиною третього розділу є розробка методу із застосування порційного нанесення матеріалу з перериваннями подачі присадного матеріалу і теплової енергії в зону наплавлення. Наплавлення з перериваннями дозволило зменшити тепловнесення і покращити контроль над ванною розплавленого металу. Запропонований автором метод забезпечив зменшення відхилення форми зразків на 60% і покращення стабільності нерівномірності поверхонь в 3 рази. Таким чином, перехід від постійної ванни розплавленого металу до тимчасової забезпечив покращення якості поверхонь.

Четвертий розділ дисертації присвячено дослідженню дефекту форми деталі, який утворюється через відхилення присадного дроту. Автором представлено результати дослідження впливу утворених нерівностей поверхонь деталей на їхні механічні властивості. Встановлено, що дефекти, які утворюються внаслідок зношування контактного наконечника під час вирощування тонкостінних деталей, мають критичний вплив на міцність і довговічність конструкції. На основі результатів чисельного моделювання автором встановлено залежність між шириною необробленої та обробленої стінки при еквівалентних напруженнях.

Крім того, в четвертому розділі автором проведено дослідження відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту. Шляхом виробничого натурального експерименту було встановлено, що найбільш значна складова загального відхилення дроту утворюється через знос контактний наконечник. Проведений автором аналіз умов контактної взаємодії дроту з наконечником і загальновідомих теорій ковзного зношування дозволив встановити, що нелінійність швидкості зношування визначається непостійними умовами контакту. Було визначено, що навантаження в зоні контакту забезпечується напружено-деформованим станом присадного дроту. Методом комп'ютерного моделювання встановлено, що зі збільшенням зносу контактний наконечник згинаючі напруження в дроті зменшуються, що призводить до зменшення нормального навантаження, а отже, до зменшення швидкості зносу контактний наконечник. Автор підтверджує результати моделювання лабораторним експериментом. На основі експериментальних даних і результатів комп'ютерного моделювання автором визначено функціональну залежність величини зносу контактний наконечник від довжини використаного дроту, сили контактної взаємодії і твердості присадних дротів.

Виконані комплексні розрахунково-експериментальні дослідження відхилення присадного дроту від ТСП підтвердили гіпотезу про зв'язок зношування контактний наконечник з напружено-деформованим станом дроту. З метою подальшої практичної реалізації отриманих результатів і покращення точності передбачення величини відхилення здобувачем було розроблено комплекс нейронних моделей, які описують зв'язок параметрів присадного дроту зі зносом наконечника і відхиленням дроту від центральної точки інструменту.

У п'ятому розділі пропонується алгоритм коригування відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту з використанням стандартних функцій контролера промислового робота, що робить його універсальним і простим у реалізації. Ефективність розробленого алгоритму була підтверджена в лабораторних і промислових умовах.

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. Також результати дисертації пройшли апробацію на 3 міжнародних наукових фахових конференціях з прикладної механіки, зварювання та споріднених процесів.

При підготовці дисертації автор неухильно дотримувався принципів академічної доброчесності. Публікації здобувача мають достовірну наукову базу та є результатом самостійних досліджень. Наукові положення та висновки дисертації, що виносяться на захист, належать здобувачу. Наукові результати досліджень, які описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

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

1. Робота має деякі описки, зокрема на сторінці 29 «Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та 1 додатку. Загальний обсяг дисертації становить 230 сторінок, у тому числі основного тексту дисертації 173 сторінка, 67 рисунків, 18 таблиць, 6 додатків...».
2. В підрозділі 3.2 автором було запропоновано модифікований метод імпульсного нанесення матеріалу з повним переривання процесу горіння дуги. Основними критеріями оцінки якості вирощених об'єктів було обрано величину відхилення форми деталі та ефективність використання матеріалу. В контексті запропонованого методу було б корисним підняти питання енергоефективності і продуктивності процесу вирощування, провести аналіз потужності (електричної енергії), використаної для вирощування однакового об'єму матеріалу традиційним і новим методами.
3. В дослідженнях, описаних в розділі 4, здобувачем не зазначено, чи було враховано температурні деформації при виготовленні, та, що найважливіше, при вимірюванні вирощених зразків.

Однак, наведені зауваження не є визначальними та не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів роботи, не впливають на позитивну оцінку представленої дисертаційної роботи.

### Висновок про дисертаційну роботу.

Вище наведене дозволяє стверджувати, що представлена 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, а сукупність її теоретичних та практичних результатів розв'язує важливе наукове завдання, яке має суттєве значення для галуз знань Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка. За своєю актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною представлена дисертаційна робота повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.п. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Здобувач Молочков Денис Євгенійович у повній мірі заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

### Рецензент:

старший викладач кафедри машин і технології ливарного виробництва  
Національного університету  
«Запорізька політехніка»,  
доктор філософії

Михайло ГНАТЕНКО

Підпис Михайла Гнатенка

Засвідчую:

Начальник відділу кадрів

Г.60

Олена Радченко

