ВІДГУК

офіційного опонента 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.

Адитивні технології, в тому числі ті, що засновані на електродуговому зварюванні плавким електродом в середовищі захисних газів, пропонують переваги зменшення споживання матеріалів і скорочення часу виробництва окремих деталей або невеликих партій. Однак одним із недоліків пошарового виробництва є нерівність поверхонь, які воно створює. З відкритих джерел відомо, що для фрезерування або адитивного виробництва з використанням порошків типовою є шорсткість поверхні від 0,63…2,5 мкм і 16…18 мкм, відповідно, а адитивне виробництво з використанням дугових джерел тепла забезпечує значно більше відхилення 0,5…1,0 мм. Точність позиціонування дроту під час наплавлення має вирішальне значення для досягнення точних результатів. Однак коливання присадного дроту, викликані його викривленням і зносом контактного наконечника, сприяють підвищенню хвилястості поверхні надрукованих деталей і можуть викликати дефекти в їх геометрії. Незважаючи на відносно низьку якість поверхні, необроблені деталі WAAM мають потенціал для використання в широкому спектрі галузей промисловості. Зменшення кількості необхідної фінішної обробки надрукованих деталей позитивно вплине на час виробництва та пов'язані з цим витрати на механічну обробку.

В дисертаційній роботі Молочкова Дениса Євгенійовича вирішується актуальне науково-практичне завдання нормалізації нерівномірності бокових поверхонь вирощених деталей, зменшення відхилень форми і покращення контролю над формоутворенням валиків, що в комплексі має покращити ефективність використання матеріалів, зменшити потребу в надлишковій постобробці та покращити експлуатаційні властивості необроблених деталей. Дослідження впливу напружено-деформованого стану присадного дроту на його відхилення і знос контактного наконечника є нагальною задачею, що має науковий та практичний інтерес забезпечення стабільності та автоматизації процесів вирощування.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше встановлено та підтверджено взаємозв'язок між зносом контактного наконечника, відхиленням присадного дроту від центральної точки інструменту та утворенням нерівностей поверхні деталей, виготовлених методом адитивного виробництва на основі електродугового зварювання плавким електродом (WAAM – Wire and Arc Additive Manufaturing).
2. Вперше за допомогою експериментальних і розрахункових методів визначено нелінійний зв'язок між інтенсивністю зношування контактних наконечників при WAAM і напружено-деформованим станом присадного дроту, динамічні зміни якого диктують умови контактної взаємодії між наконечником і дротом. Виявлено закономірність зменшення швидкості зношування контактного наконечника зі збільшенням радіусу кривизни присадного дроту, що пояснюється зменшенням контактного зусилля при меншій пружній деформації.
3. За результатами проведених досліджень вперше розроблено математичні моделі, що описують зв'язок між величиною відхилення присадного дроту та основними параметрами контактної взаємодії між дротом і наконечником. Ці моделі ілюструють комплексний вплив напружено-деформованого стану дроту на його відхилення.
4. Вперше отримано теоретичні та практичні рішення для покращення керованості процесу формоутворення валків, які дозволяють зменшити відхилення форми бічних поверхонь при WAAM за рахунок обмеження тривалості існування постійної ванни розплавленого металу. В результаті відхилення форми бічних поверхонь було зменшено на 60%, а стабільність вирощеної геометрії підвищено втричі.
5. Вперше розроблено методику програмної компенсації відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту для WAAM на основі GMAW, згідно з якою координати центральної точки інструменту контролюються нейронними моделями, створеними на основі експериментальних і статистичних даних.

Сформульовані положення наукової новизни відображають результати особистого внеску дисертанта у масив досліджень у обраному напрямку. Належна обґрунтованість та достовірність результатів забезпечена достатньою кількістю практичних та теоретичних дослідів, використанням різноманітних методичних прийомів аналізу поставлених проблем, достатньою джерельною базою та апробацією отриманих результатів.

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

За своїм змістом дисертаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича відповідає Стандарту вищої 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».

За результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння можна стверджувати, що кваліфікаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича є результатом самостійних наукових досліджень здобувача. Робота не містить ознак фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату, запозичень або несанкціонованого використання здобувачем результатів інших авторів. Використані дисертантом ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело. Робота Молочкова Дениса Євгенійовича відповідає принципам академічної доброчесності.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою. Текст роботи відзначається послідовністю та логічністю викладення матеріалу. Кожен розділ має чітку структуру, яка допомагає легко орієнтуватися у змісті дослідження. Стиль мовлення є науковим, що відповідає вимогам до дисертаційних робіт. Автор використовує загальноприйняту термінологію наукового напрямку, що полегшує розуміння тексту спеціалістами у відповідній галузі. Мова дисертації вирізняється точністю та однозначністю. Опис методів, процесів та результатів подано чітко та зрозуміло. Це стосується як теоретичних частин, так і практичних висновків, де автор деталізує математичні моделі, технологічні процеси та їх складові.

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 дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі, об'єкт і предмет дослідження, описано основні 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, що присвячений огляду проблематики відхилень форми вирощених деталей, визначена актуальність роботи, наведені результати особливостей та проблем, що супроводжують використання вирощених деталей

без пост-обробки різанням. Розглянуті причини утворення відхилень форми вирощуваних деталей та існуючі методи їх усунення. На основі проведеного огляду дисертантом сформульовано мету та задачі досліджень.

У другому розділі наведено загальну методику дослідження відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту, яка складається з обґрунтування вибору матеріалів, опису методики вимірювання геометричних параметрів зразків присадних дротів, контактних наконечників і вирощених зразків. Для визначення впливу нерівномірності поверхонь на експлуатаційні властивості вирощених деталей наведено методику моделювання механічних випробувань зразків методом скінчених елементів. Той самий метод запропоновано для аналізу контактної взаємодії присадного дроту з наконечником. Для забезпечення точності моделювання детально описано методику вимірювання модуля пружності присадних дротів. Також наведено методику вимірювання величини контактного опору між присадним дротом і наконечником, розроблено устаткування і описано методику експериментального визначення сили контактної взаємодії присадного дроту з наконечником, сформульовано критерії оцінки якості геометрії поверхонь вирощуваних об'єктів.

У третьому розділі показано результати дослідження з оптимізації основних технологічних параметрів процесу WAAM. Автором сплановано та реалізовано ряд факторних експериментів, в результаті яких визначено діапазон швидкості подачі дроту і швидкості наплавлення, в якому забезпечується стабільність процесу вирощування і прийнятна якість поверхонь вирощуваних об'єктів. Статистичний аналіз проведених експериментів показав, що відхилення форми бокових поверхонь майже не залежить від основних параметрів вирощування, тому було зроблено висновок, що основною причиною їх утворення є природа дугового процесу зварювання. З метою покращення якості та зменшення вказаних відхилень та нерівномірності поверхонь було розроблено вдосконалений метод порційного нанесення матеріалу з перериваннями подачі присадного матеріалу і теплової енергії в зону наплавлення. Імпульсне наплавлення з періодичними повними перериваннями дозволило зменшити тепловнесення і покращити контроль над формою ванни розплавленого металу. Запропонований автором перехід від постійної ванни розплавленого металу до тимчасової забезпечив зменшення відхилення форми зразків на 60% і покращення стабільності нерівномірності поверхонь в 3 рази.

У четвертому розділі представлені результати дослідження дефекту форми деталі, утвореного внаслідок відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту. Встановлено, що утворені дефекти зсуву геометрії, особливо при вирощуванні тонкостінних деталей, мають критичний вплив на міцність і довговічність конструкції. Необроблені зразки мають вищий ризик руйнування або пластичної деформації при навантаженні, близькому до розрахованої

безпечної межі. На основі аналізу отриманих результатів була визначена еквівалентна ширина стінки, яка описує товщину стінки обробленого зразка, який має такий самий рівень напружень, як і друкований необроблений зразок при заданих навантаженнях.

Центральним для четвертого розділу є дослідження явища відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту. Вказане відхилення було розділене автором на початкове і основне, що викликане зносом контактного наконечника. На основі аналізу умов контактної взаємодії дроту з наконечником і загальновідомих теорій ковзного зношування було встановлено, що нелінійність швидкості зношування визначається непостійними умовами контакту, а саме навантаженням в зоні контакту, яке забезпечується напружено-деформованим станом присадного дроту. Комп'ютерне моделювання взаємодії дроту з пальником і наконечником показало, що зі зношуванням контактного наконечника згинаючі напруження в дроті зменшуються, що призводить до зменшення нормального навантаження, а отже, до зменшення швидкості зносу контактного наконечника. Результати моделювання повністю збігаються з лабораторним експериментом. Накопичені дані величини відхилення присадного дроту, разом з відомим радіусом кривизни, виміряним модулем пружності та іншими параметрами послугували комбінованою вибіркою даних, на основі якої автором було встановлено функціональну залежність величини зносу контактного наконечника від довжини використаного дроту, сили контактної взаємодії і твердості присадних дротів. Таким чином було підтверджено гіпотезу про зв'язок зношування контактного наконечника з напружено-деформованим станом дроту.

У п'ятому розділі запропоновано алгоритм коригування відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту. Автором пропонується вимірювати довжину використаного дроту з кожним окремим контактним наконечником і розраховувати величину відхилення дроту за раніше розробленими моделями. Розраховані значення слугують для корегування координат положення центральної точки інструменту в кінематичній моделі робота. Ефективність роботи запропонованого алгоритму було 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. Наявність публікації у виданні, індексованому у наукометричній базі даних Scopus, гарантує належне рецензування роботи та дотримання принципів

академічної доброчесності. Крім того, результати дисертації пройшли апробацію на 3 міжнародних наукових фахових конференціях з прикладної механіки, зварювання та споріднених процесів.

Публікації здобувача мають достовірну наукову базу та є результатом самостійних досліджень. Наукові положення та висновки дисертації, що виносяться на захист, належать здобувачу і повністю висвітлені у наукових публікаціях.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В розділі 4 підіймається питання впливу напружено-деформованого стану присадного дроту на його відхилення від прямого положення, контактну взаємодію зі зварювальним наконечником, а також на процес зношування останнього. Однак безпосередньо напружено-деформований стан дроту описано недостатньо. Потрібно визначити вид напружено-деформованого стану, дослідити мікроструктуру дроту в площині, що співпадає з напрямком його вигину.
2. Автор вводить обмеження, яке зазначає, що мікроструктура всіх досліджуваних зразків є однаковою, а об'єктом дослідження є нерівномірності поверхонь вирощених об'єктів. В той же час запропонований метод імпульсного нанесення матеріалу з повним обриванням дуги може забезпечувати не тільки кращу якість поверхонь, а і зовсім інший температурний цикл, що, в свою чергу, може призводити до утворення мікроструктури відмінної від звичайного циклу нанесення матеріалу. Тож для доповнення розділу 3 варто дослідити температурний цикл вдосконаленого методу, порівняти його з початковим методом наплавлення і провести аналіз утвореної мікроструктури, що може бути особливо цікаво при використанні жароміцних сплавів.
3. Для повнішої і більш наглядної оцінки точності необхідно впровадити довірчі інтервали на діаграмах з графічним представленням знайдених регресійних моделей, зокрема на рисунках 4.8, 4.11, 4.12, 4.15, 4.19…4.21.
4. При використанні методу скінчених елементів потрібно зробити більш детальний опис параметрів аналізу, які можуть визначальними для повторюваності моделювання. У роботі не зазначено тип елементів сітки, а також детально не описані граничні умови.

Не дивлячись на наявність деяких зауважень, вони 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.

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, яке має істотне значення для механічної інженерії. Представлена дисертаційна робота за своєю актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною 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.

Офіційний опонент:
доцент кафедри машинобудівних
технологій та інженерії
Дніпровського державного
технічного університету,
кандидат технічних наук, доцент Денис НОСОВ

Підпис доцента
Носова Дениса Геннадійовича засвідчую
Начальник відділу кадрів Дніпровського
державного технічного університету Ірина ЛЄСОВА