

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.

Адитивне виробництво на основі електродугового зварювання плавким електродом забезпечує прискорення процесу виготовлення металевих виробів складної геометричної форми, підвищує екологічність та зменшує собівартість продукції за рахунок зменшення кількості відходів. Однак, застосування адитивних дугових технологій призводить до зменшення геометричної точності та якості поверхонь вирощених деталей, які зазвичай потребують додаткової механічної обробки. Вказані недоліки обмежують можливості використання адитивних дугових технологій, а тому потребують всебічного дослідження.

Дисертаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича розкриває важливу проблему утворення непередбачуваних дефектів геометричної форми вирощуваних деталей, яка викликана природою дугового процесу пошарового формування матеріалу, а також невідповідністю фактичних геометричних параметрів ЧПК системи переміщення пальника і її кінематичної моделі через знос інструменту та недостатню точність позиціонування присадного дроту. Наявні відхилення від бажаної форми, розмірів та орієнтації деталей впливають на їх функціональність, надійність та здатність взаємодіяти з іншими елементами конструкції. Відсутність системного підходу у вирішенні зазначеної проблеми призводить до необхідності збільшення припуску на подальшу обробку різанням, що певною мірою нівелює переваги адитивної технології. Традиційні методи боротьби зі зносом контактних наконечників шляхом використання більш зносостійких матеріалів втрачають актуальність через економічну складову розробки нових сплавів та виготовлення наконечників, а також через зменшення електропровідності при збільшенні твердості матеріалів, що може порушити стабільність дугових процесів зварювання.

Пошук шляхів підвищення стабільності та керованості положення присадного дроту відносно центральної точки інструменту робота є актуальною задачею, а підвищення точності вирощених деталей має суттєве значення для їх функціональних характеристик, екологічності, обсягу постобробки, можливості вирощування виробів складної геометричної форми, привабливості впровадження цієї технології в різних галузях промисловості.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у встановленні залежності нерівномірності поверхонь отриманих виробів від компонент напружено-деформованого стану присадного дроту, зносу контактного наконечника та від динамічних процесів у ванні розплавленого металу, що комплексно визначають формоутворення валиків із жароміцних сплавів при адитивному виробництві на основі електродугового зварювання плавким електродом в середовищі захисних газів. При цьому:

1. В роботі вперше доведений зв'язок зносу контактного наконечника і відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту з утворенням нерівномірності поверхонь пошарово сформованих деталей.
2. Автором вперше встановлена залежність нелінійної зміни інтенсивності зношування контактного наконечника в процесі формування виробу від компонент напружено-деформованого стану присадного дроту, які визначають умови контактної взаємодії наконечника з дротом. Виявлена закономірність зменшення інтенсивності зношування контактного наконечника зі збільшенням радіусу кривизни присадного дроту, що пояснюється зменшенням контактної сили при зменшенні пружної деформації дроту.
3. На основі експериментальних і розрахункових даних вперше розроблені адекватні математичні моделі залежності величини відхилення присадного дроту від основних параметрів контактної взаємодії дроту з наконечником, які описують комплексний вплив компонент напружено-деформованого стану дроту на його відхилення.
4. Дисертантом вперше запропонований вдосконалений метод імпульсного наплавлення матеріалу з метою покращення контрольованості формоутворення валиків із забезпеченням зменшення величини відхилень геометричної форми отриманих деталей шляхом обмеження часу існування ванни розплавленого металу, встановлені раціональні режими формування виробів, які дозволяють зменшити значення відхилення геометричної форми бокових поверхонь деталей на величину до 60 % та сприяють покращенню формоутворення поверхонь в три рази.
5. Вперше запропонована та розроблена методика компенсації відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту програмним шляхом, згідно якої координати центральної точки інструменту в кінематичній моделі робота змінюються динамічно, відповідно до розрахованих за нейронними моделями значеннями.

Наукова новизна отриманих результатів чітко сформульована та зрозуміло викладена, із розкриттям суті. Сформульовані автором положення наукової новизни є обґрунтованими і відповідають поставленим в ній завданням. Теоретичні закономірності та практичні

рекомендації підтверджені результатами чисельних експериментальних та розрахункових досліджень, доброю збіжністю результатів скінчено-елементного моделювання з результатами прямих вимірювань. Основні результати дисертаційної роботи 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 зменшення відхилення форми бокових поверхонь вирощених деталей та покращення контролю над формоутворенням валиків виконане в повному обсязі. При виконанні експериментальних та теоретичних досліджень здобувач продемонстрував наявність необхідних компетентностей та володіння методологією наукової діяльності повною мірою.

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

Представлена дисертаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича за своїм змістом повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 131 Прикладна механіка галузі знань 13 Механічна інженерія та предметній області, що визначена освітньо-науковою програмою підготовки докторів філософії з Прикладної механіки.

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 розгляду звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння можна зробити висновок, що дисертаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича є результатом самостійних наукових досліджень здобувача. Робота не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату, запозичень або несанкціонованого використання здобувачем результатів інших авторів. Використані здобувачем ідеї, результати та тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота Молочкова Дениса Євгенійовича написана українською мовою. Наведені в дисертаційній роботі відомості та представлені дисертантом результати досліджень логічно розподілені на окремі розділи. Структура дисертаційної роботи забезпечує можливість чітко зрозуміти послідовність етапів виконання досліджень. Наведений графічний матеріал, представлений власними фотографіями і діаграмами у повній мірі відображає результати експериментальних і розрахункових досліджень. Сутність дисертаційної роботи представлена

послідовно з використанням загальноприйнятої технічної термінології, що сприяє повному розумінню наведених результатів досліджень.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку опрацьованої літератури і 6 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 230 сторінок, зокрема вона має 173 сторінки основного тексту, 67 рисунків, 18 таблиць, 6 додатків, перелік використаних літературних джерел із 176 бібліографічних найменувань.

У вступі наведене обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень, а також об'єкт і предмет дослідження, наведені відомості щодо методів досліджень, які застосовані здобувачем при виконанні роботи, сформульовані наукова новизна та практичне значення результатів дослідження, визначений особистий внесок здобувача, наведені відомості про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі визначена актуальність роботи, наведені результати аналізу особливостей та проблем, що пов'язані з обмеженнями використання адитивного виробництва на основі електродугового зварювання плавким електродом. Розкрита проблема утворення нерівномірності поверхонь при адитивному дуговому наплавленні. Виходячи з вимог до якості поверхонь виробів та подальшої пост-обробки автором визначені два підходи щодо застосування запропонованої технології. Зазначено, що нерівномірність поверхонь деталей та відхилення форми погіршують експлуатаційні та механічні властивості виробів, а для зменшення пост-обробки необхідно визначити причини утворення відхилень геометрії та розробити методи їх зменшення. Аналіз особливостей переносу матеріалу та теплової енергії в зону наплавлення при адитивному виробництві на основі електродугового зварювання дозволив автору висунути гіпотезу, що відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту є основною причиною утворення нетипової або надлишкової нерівномірності поверхонь і відхилення форми деталей. Автор припускає, що відхилення присадного дроту комплексно пов'язане з характеристиками його напружено-деформованого стану та умовами взаємодії дроту з контактним наконечником пальника.

На основі проведеного ретельного аналізу наявних результатів автором запропоновано компенсувати відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту шляхом механічного коригування. Зазначається, що механічне коригування положення присадного дроту може бути універсальним методом для покращення якості деталей, який дозволяє використовувати стандартне обладнання, зокрема комерційні контактні наконечники.

У другому розділі наведений опис застосованих стандартизованих та розроблених автором методик досліджень, характеристики обраних матеріалів і технологічного обладнання для реалізації досліджень. Для досягнення мети та вирішення поставлених у роботі завдань

запропонована методика досліджень, що включає вимірювання геометричних параметрів присадних дротів, контактних наконечників і вирощених зразків; визначення швидкості зношування наконечника, визначення пружних властивостей присадного дроту. Крім того, автором описана методика проведення аналізу контактної взаємодії присадного дроту з наконечником методом скінчених елементів, методику вимірювання величини контактної опору між присадним дротом і наконечником, методику визначення сили контактної взаємодії присадного дроту з наконечником, а також сформульовані критерії оцінки характеристик якості геометричної форми поверхонь сформованих об'єктів.

Третій розділ дисертації присвячений визначенню раціональних технологічних параметрів процесу адитивного наплавлення із застосуванням тепла електричної дуги з використанням плавкого електроду в середовищі захисних газів з метою покращення характеристик якості поверхонь деталей. Визначений діапазон раціональних швидкостей подачі дроту та швидкостей переміщення пальника, які забезпечують стабільне формування валиків, їх контрольовану геометричну форму при застосуванні стратегії однопрохідного наплавлення. Встановлено, що високі значення вказаних параметрів призводять до перегріву та стікання розплаву металу, а низька швидкість подачі дроту за великої швидкості переміщення пальника призводить до формування несучільних валиків.

Обрані раціональні параметри швидкості подачі дроту і переміщення пальника забезпечують відхилення форми деталі на $1,21 \pm 0,23$ мм через утворену нерівномірність поверхонь.

Для покращення контролю формування валиків і зменшення нерівномірності поверхонь автором запропонований вдосконалений метод імпульсного наплавлення, який передбачає періодичне переривання процесу подачі присадного дроту та теплової енергії для його плавлення. Шляхом переходу від постійного до тимчасового існування ванни розплавленого металу вдалося покращити контроль над її переміщенням та забезпечити зменшення відхилення геометричної форми поверхні до $0,47 \pm 0,08$ мм.

Четвертий розділ дисертації присвячений поглибленому аналізу специфічного дефекту геометричної форми, який утворюється в наслідок відхилення просторового положення присадного дроту. Автором представлені результати досліджень щодо впливу величини нерівномірності геометричної форми поверхні на механічні властивості виробів. Показано, що утворені від зносу контактної наконечника під час вирощування тонкостінних деталей дефекти мають суттєвий вплив на характеристики міцності виробів. Результати моделювання методом скінчених елементів дозволили встановити взаємозв'язок між шириною необробленої та обробленої стінок при еквівалентних рівнях напружень.

У розділі досліджене явище відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту. Натурний експеримент свідчить, що основною причиною відхилення дроту є знос контактного наконечника. Аналізуючи умови контактної взаємодії дроту з наконечником, а також відомі теорії зношування при ковзанні, автор приходить до висновку, що нелінійність швидкості зношування визначається змінними умовами контакту. Встановлено, що на навантаження в зоні контакту впливає напружено-деформований стан присадного дроту. Шляхом комп'ютерного моделювання встановлено, що зношування контактного наконечника зменшує напруження вигину дроту. Це зменшує нормальні навантаження і, як наслідок, знижує швидкість зношування контактного наконечника. Отримані автором результати та сформульовані висновки підтверджуються лабораторними експериментами.

На основі отриманих даних автором визначена функціональну залежність між інтенсивністю зношування контактного наконечника і довжиною присадного дроту, силою контактної взаємодії та твердістю присадних дротів. Ретельні розрахунково-експериментальні дослідження щодо відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту підтверджують висунуту гіпотезу, що знос контактного наконечника залежить від напружено-деформованого стану дроту. Для підвищення точності прогнозування величини відхилення та полегшення практичного застосування отриманих результатів автор розробив комплекс нейронних моделей. Ці моделі встановлюють взаємозв'язок між параметрами присадного дроту, зносом наконечника та відхиленням дроту від центральної точки інструменту.

У п'ятому розділі представлені результати практичної реалізації розроблених моделей. Запропонований алгоритм коригування відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту використовує стандартні функції контролерів промислових маніпуляторів з ЧПК, що робить його універсальним і простим у реалізації. Ефективність розробленого алгоритму підтверджена лабораторними і промисловими випробуваннями.

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 дисертаційної роботи висвітлені у 7 наукових публікаціях здобувача, зокрема в 4 статтях у наукових виданнях, що включені до переліку наукових фахових видань України, з яких 1 стаття у періодичному науковому виданні, яке індексується у міжнародних наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus. Результати дисертації пройшли апробацію на 3 міжнародних наукових фахових конференціях з прикладної механіки, зварювання та споріднених процесів.

При підготовці дисертації автор 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 і повністю висвітлені у його наукових публікаціях.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В підрозділі 4.1 автором проведені дослідження впливу дефекту форми деталі, утвореного через відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту на експлуатаційні властивості виробу. Автор проводить комп'ютерне моделювання випробувань на розтяг та стиск методом скінчених елементів. Однак, результати практичного експерименту з механічних випробувань не наведені. Бажано детальніше обґрунтувати адекватність отриманих результатів моделювання.
2. В підрозділі 3.2 автором запропонований вдосконалений метод імпульсного наплавлення матеріалу з періодичними перериваннями подачі присадного матеріалу і теплової енергії в утворену ванну розплавленого металу. Автор зазначає, що обмеження часу перебування матеріалу в розплавленому стані дозволяє підвищити контрольованість та стабільність ванни розплаву. Для повноти проведеного дослідження бажано встановити залежність між часом кристалізації розплаву зварювальної ванни та основними технологічними параметрами вдосконаленого процесу наплавлення.
3. Наведений в розділі 5 приклад практичного застосування розробленого методу компенсації відхилення присадного дроту від центральної точки інструменту при вирощуванні сопла двигуна ракети-носія із жароміцного сплаву 718 демонструє значне покращення ефективності використання матеріалу, але бажано розрахунковим шляхом підтвердити наявність та величину економічного ефекту від впровадження запропонованої технології.

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

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, 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, вона не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, а сукупність її теоретичних та практичних результатів розв'язує наукове

завдання, яке має вагомe значення для галузі знань Механічна інженерія. Дисертаційна робота за своєю актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, які наведені 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 заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри зварювального виробництва
Національного технічного університету України
"Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського",
доктор технічних наук, професор



Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

Підпис офіційного опонента завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доктора технічних наук, професора Віктора Вячеславовича Квасницького засвідчую:

