

ВІДГУК

на дисертаційну роботу

ЗАВГОРОДНЬОГО ОЛЕКСАНДРА ВАСИЛЬОВИЧА

за темою: «Вдосконалення обладнання та технології плазмового ротаційного розпилення для виготовлення металевих порошків адитивного призначення»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка

Актуальність теми дисертаційної роботи

Адитивні технології стрімко розвиваються в авіа-, медичній та машинобудівній галузях завдяки здатності виготовляти вироби складної форми з високою точністю, без потреби в дорогих інструментах та тривалих процесах механічної обробки. Особливо перспективними є технології пошарового плавлення методом селективного лазерного плавлення (SLM), які дозволяють значно скоротити терміни та витрати на виробництво, особливо при роботі з дорогими матеріалами, такими як нікелеві та титанові сплави.

Основною проблемою впровадження цих технологій в Україні є дефіцит доступних вітчизняних порошків необхідної якості. Імпортні матеріали коштовні, мають обмежену номенклатуру та нестабільні поставки. Тому актуальним завданням є створення власних технологій отримання сферичних порошків заданої фракції та хімічної чистоти. Серед сучасних методів перспективною є ротаційна, яка забезпечує отримання якісних порошків з мінімальними дефектами. Проте виникає потреба в удосконаленні обладнання і адаптації режимів розпилення до різних сплавів. Для промислового застосування необхідне комплексне дослідження всього технологічного ланцюга – від синтезу порошку до готового виробу.

Розробка ефективних рішень у сфері вітчизняного виробництва порошкових матеріалів дозволить не лише знизити залежність від імпорту, а й створити умови для повноцінного впровадження адитивних технологій у ключових галузях промисловості України. Це сприятиме зміцненню технологічного суверенітету держави та розвитку наукоємного виробництва.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукові результати, представлені в дисертаційній роботі, є обґрунтованими, експериментально підтвердженими та характеризуються високим рівнем достовірності. Проведені дослідження спираються на сучасні методи аналізу, статистичну обробку результатів і апробацію отриманих залежностей у реальних

умовах. Висновки та положення дисертації логічно впливають із експериментальних даних, що отримані в ході вивчення впливу параметрів ротаційного плазмового розпилення на формування порошків зі сплавів Inconel 718, ВЖ98 і Ti-6Al-4V.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у подальшому розвитку уявлень про вплив швидкості обертання витратного електрода на розмірний склад порошків, а також у вдосконаленні конструкції системи обертання в обладнанні PREP. Вперше встановлені регресійні залежності між складом плазмоутворюючих газів та фракційним складом порошків за умов надвисоких швидкостей обертання (до 30 тис. хв^{-1}), що дозволяє цілеспрямовано керувати параметрами процесу отримання порошків із заданими характеристиками.

Окреме наукове значення має вперше обґрунтований вплив фракційного складу порошків на вибір адитивної технології: лазерного 3D-друку, мікроплазмового чи електронно-променевого наплавлення. Отримані результати забезпечують підвищення якості виготовлених виробів, зменшення витрат матеріалу та дозволяють адаптувати процес розпилення до конкретних вимог виробництва.

Таким чином, дисертація містить науково нові й достовірні результати, що мають істотне практичне значення для розвитку вітчизняного виробництва порошкових матеріалів для адитивних технологій.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність, та отримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Завгороднього О.В. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 131 Прикладна механіка та напрямкам досліджень відповідно до галузі знань 13 – Механічна інженерія.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у даний науковий напрям.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Завгороднього Олександра Васильовича 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. Суть дисертаційної роботи подана послідовно і зрозуміло. Автором використано загальноновживану термінологію наукового напрямку, що сприяє повному розумінню представлених результатів досліджень.

Дисертація складається зі вступу, п'ятьох розділів, загальних висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 154 сторінки.

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, чітко сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, окреслено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Також визначено особистий внесок здобувача, подано відомості про апробацію результатів, наукові публікації, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** визначено пріоритетні напрямки розвитку адитивних технологій, що є найбільш перспективними для впровадження в умовах сучасного вітчизняного виробництва, з урахуванням світового досвіду. Сформульовано ключові вимоги до металевих порошків для адитивного застосування: сферична форма частинок, розмір до 100 мкм, відсутність неметалевих включень і газонасиченого шару. Зазначено, що для отримання таких порошків необхідно забезпечити високий рівень чистоти інертного газового середовища. Проведено порівняльний аналіз існуючих технологій і типів обладнання для виробництва сферичних металевих порошків, з урахуванням їх ефективності, якості продукції та можливостей масштабування. Обґрунтовано необхідність модернізації обладнання для ротаційного плазмового розпилення з метою підвищення якості порошків, призначених для виготовлення відповідальних деталей авіаційних двигунів адитивними методами.

У **другому розділі** розроблено структурно-логічну схему досліджень, спрямованих на вдосконалення обладнання для ротаційного плазмового розпилення та створення технології отримання металевих сферичних порошків. Визначено методики та підібрано матеріали для комплексної оцінки якості порошків і виробів, виготовлених з них за допомогою різних адитивних технологій.

У **третьому розділі** показано удосконалення технологічного обладнання для ротаційного плазмового розпилення порошків, що забезпечило підвищення швидкості обертання заготовки та зменшення зношування елементів при роботі в умовах високих навантажень. Модернізація включала зміну кінематичної схеми приводу та конструктивне доопрацювання вузла фіксації заготовки за допомогою притискного ролика. Було впроваджено шпindelне кріплення та встановлено нові підшипники з додатковим змащенням, що запобігає їх перегріванню. Додатково реалізовано незалежну систему циркуляційного охолодження камери розпилення інертним газом, окрему від плазмотрону. На основі проведених змін розроблено оновлену конструкторську документацію (включно з кресленнями модифікованих вузлів установки УЦР-4) та виготовлено відповідні нові елементи обладнання.

У **четвертому розділі** методами активного експерименту отримано регресійні залежності впливу швидкості обертання електроду та вмісту гелію в газовій суміші на

фракційний склад порошків зі сплавів Inconel 718, ВЖ98 і Ti-6Al-4V, що дозволяє прогнозувати розмір частинок і збільшувати вихід цільової фракції при ротаційному плазмовому розпиленні. Розроблено вдосконалену технологію розпилення, яка поєднує підвищену плазмову потужність (завдяки оптимальному введенню гелію) зі збільшенням швидкості обертання заготовки. Визначено режими отримання порошків необхідного розміру для 3D-друку. Порошки відповідали вимогам до адитивних матеріалів за формою, хімічним складом, відсутністю пор і неметалевих включень.

У п'ятому розділі на основі досліджень встановлено оптимальні фракційні склади сферичних порошків для різних адитивних технологій 3D-друку. Для лазерного друку найкращі результати досягаються при використанні порошку з розміром частинок 20–50 мкм, насипною щільністю 2,9 г/см³ та текучістю 12,2 с. Для мікроплазмового вирощування ефективною є фракція 100–120 мкм ($\rho = 4,0$ г/см³, $\chi = 15,0$ с), а для електронно-променевого формування – порошки розміром 45–105 мкм ($\rho = 3,1$ г/см³, $\chi = 14,0$ с). Застосування порошків із такими параметрами забезпечує стабільне формування виробів без дефектів на поверхні та в макроструктурі. При цьому механічні властивості отриманих деталей відповідають вимогам, які висуваються до виробів, виготовлених традиційними методами — литтям або деформацією.

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 висвітлені у 13 наукових публікаціях, серед яких три статті – у наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus, серед яких 1 стаття у виданні, віднесеному до другого квартилю (Q2) і 2 статті у виданнях, віднесених до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports; одна стаття – у науковому виданні, що входить до переліку наукових фахових видань України, та 9 тез доповідей із міжнародних наукових конференцій.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Основні недоліки та зауваження по дисертаційній роботі полягають в наступному:

1. В анотації автором зазначено, що їм запропоновано проводити розпилення заготовки в середовищі аргону з додаванням гелію. В Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України по такому принципу (спосіб PREP) досить тривалий час працює установка ВГУ-2М.

2. В п.1 наукової новизни (ст. 4) вказано, що отримано максимальну кількість дрібнодисперсного порошку (30...100 мкм), однак не зрозуміло яка це кількість по відношенню до інших отриманих фракцій.

3. В анотації англійською мовою є помилки при перекладі з української: назва Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, одиниці вимірювання «хв⁻¹», спосіб PREP та інші.

4. Автором роботи зазначені суттєві недоліки такого способу отримання порошків, як газова атомізація (ст. 45). На сьогоднішній день такі європейські компанії як IRT (Франція) чи Amazamet (Польща) досить успішно виготовляють якісні сферичні порошки цим способом для світової індустрії.

5. Опис обладнання «УЦР» міститься як наприкінці першого, так і напочатку другого розділів.

6. Підрозділ 3.1 містить переважно оглядову інформацію, яку бажано було б віднести до Розділу 1, який присвячений цьому.

7. В таблиці 4.12 вказано, що вміст кисню и вихідному прутку із сплаву Ti-6Al-4V становить 0,3 % ваг., а в порошку, який виготовлений з нього він становить 0,21 % ваг. Не пояснено завдяки чому вміст кисню знизився.

8. Серед використаних методик (Розділ 2) вказано, що визначався вміст азоту та кисню в частинках порошку. Однак, кількість азоту в порошках не представлений в Розділі 4.

9. По тексту роботи є дрібні зауваження. Наприклад, підпис до рисунку 1.4 рознесений на дві сторінки (27 та 28), на ст. 55 міститься лише одне слово.

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 Завгороднього Олександра Васильовича на тему «Вдосконалення обладнання та технології плазмового ротаційного розпилення для виготовлення металевих порошків адитивного призначення» виконана на високому науковому 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 ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Завгородній Олександр Васильович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Офіційний опонент:

старший науковий співробітник
відділу металургії та зварювання
титанових сплавів

Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України,
к.т.н., старший дослідник

Сергій ШВАБ

М.П.

« 30 » липня 2025 року

Т.в.о. ученого
секретаря
к.т.н.



Павло ТКАЧ