Р Е Ц Е Н З І Я

на дисертаційну роботу

ЗАВГОРОДНЬОГО ОЛЕКСАНДРА ВАСИЛЬОВИЧА

на тему: **«Вдосконалення обладнання та технології плазмового ротаційного розпилення для виготовлення металевих порошків адитивного призначення»,**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в ґалузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

У вітчизняній промисловості впровадження адитивних технологій зіткнулося з низкою проблем, пов'язаних, насамперед, із вихідними порошками. Висока вартість застосовуваної сировини, якою є сферичні порошки зарубіжного виробництва, труднощі їх стабільних поставок і обмежена номенклатура сплавів, серед яких є тільки іноземні марки, є головним стримуючим фактором. Тому важливим завданням є заміна існуючих високовартісних імпортних порошкових матеріалів вітчизняними. Для вирішення цієї проблеми необхідно обрати найбільш ефективну технологію виготовлення сферичних металевих порошків, розробити технології та провести удосконалення існуючого обладнання з метою отримання порошкових матеріалів із різних сплавів. Вирішенню цих науково-практичних задач присвячена дана дисертаційна робота, тема якої є актуальним науковим напрямком.

2. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Новизна наукових результатів дисертаційної роботи сформульована наступними положеннями:

1. Отримали подальший розвиток залежності впливу технологічного параметру ротаційного плазмового розпилення (швидкість обертання витратного електроду) на розмір порошків із жароміцних нікелевих сплавів Inconel 718, ВЖ98 та титанового сплаву Ti-6Al-4V. Удосконалено кінематичну схему системи обертання витратного електроду в обладнанні для ротаційного плазмового розпилення (PREP). Отримано максимальну кількість (d_{50}) дрібнодисперсного (30…100 мкм) металевого порошку для виготовлення деталей ГТД адитивними технологіями.

2. Вперше встановлені залежності впливу складу плазмоутворюючих газів (аргон, гелій) в умовах надвисоких швидкостей обертання розпилюваної заготовки (20-30 тис. $хв^{-1}$) на фракційний склад виготовлених металевих порошків зі сплавів Inconel 718, ВЖ98 та Ti-6Al-4V за технологією PREP. Встановлено оптимальні технологічні режими для виготовлення сферичних порошків дисперсністю 30…60 мкм.

3. Розвинуте наукове обґрунтування впливу фракційних складів розроблених порошків на технологічні характеристики адитивних методів виробництва (лазерний 3D-друк, мікроплазмове та електронно-променеве пошарове наплавлення). Встановлено оптимальні режими розпилення для одержання в дослідних і

виробничих умовах металевих порошків різного призначення: для лазерного 3D-друку – 20…50 мкм; для мікроплазмового пошарового наплавлення – 100…120 мкм; для електронно-променевого вирощування виробів – 45…105 мкм.

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

Дисертаційна робота Завгороднього Олександра Васильовича за своїм змістом відповідає стандарту освіти зі спеціальності 131 Прикладна механіка галузі знань 13 Механічна інженерія в предметній області, що визначена освітньо-науковою програмою підготовки докторів філософії з Прикладної механіки. Дисертаційна робота базується на поєднанні експериментальних досліджень та виробничої апробації запропонованих підходів. Змістом роботи на першому етапі було вивчення процесу ротаційного плазмового розпилення (PREP) для отримання сферичних металевих порошків та виготовлення деталей із застосуванням цих порошків адитивними технологіями. При цьому виконано аналіз можливостей існуючого обладнання для реалізації PREP – обладнання «УЦР-4» та виділені напрямки для його подальшої модернізації. Другим етапом роботи стала реалізація конструктивних змін вказаного обладнання, що спирались на розрахунки системи обертання витратного електроду – мультиплікатора приводу даного механізму. Завдяки удосконаленню обладнання підвищена продуктивність устаткування для отримання сферичних металевих порошків, якість яких задовольняла потреби адитивних технологій (лазерний 3D-друк, електронно-променеве та мікроплазмове вирощування деталей). Дисертаційна робота виконана на високому науково-технічному рівні, характеризується системним підходом, глибоким аналізом та комплексністю вирішення поставлених завдань. Робота є завершеною науковою працею, в якій розв'язано актуальну проблему, пов'язану із модернізацією обладнання для одержання металевих порошків за технологією PREP. Дисертаційна робота має безпосередній зв'язок із потребами сучасного авіадвигунобудування, оскільки модернізоване обладнання дозволяє отримувати порошки для адитивних способів виробництва деталей ГТД.

За результатами розгляду звіти подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння можна зробити висновок, що дисертаційна робота Завгороднього Олександра Васильовича є результатом самостійних наукових досліджень здобувача. Робота не містить елементів фальсифікації, компіляції або несанкціонованого використання здобувачем результатів інших авторів. Використані здобувачем ідеї, результати та текст інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

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

Дисертація складається зі вступу, п'ятьох розділів, загальних висновків, списку літератури і восьми додатків. Загальний обсяг друкованої праці складає 154 сторінки машинописного тексту. Робота містить 45 рисунків, 26 таблиць, 12 формул та перелік посилань зі 127 найменувань.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет 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** наведені результати літературного огляду обладнання та процесів, що дозволяють отримати металеві сферичні порошки для адитивних способів виробництва деталей. Обґрунтовано обрано найбільш ефективну технологію та обладнання для її реалізації – ротаційне плазмове розпилення. Засновуючись на вимогах адитивних технологій до металевих порошків, виділені напрямки по вдосконаленню обраного обладнання. На основі проведеного аналізу визначена мета та завдання дисертаційної роботи.

У **другому розділі** здобувач виклав методики проведення досліджень, відомості про обладнання та статистичну обробку експериментальних даних.

У **третьому розділі** здобувач визначив вузли та деталі, що підлягатимуть конструктивним змінам, виконаний розрахунок кінематичної схеми обладнання УЦР-4 з врахуванням нових параметрів модернізованого обладнання. Виконане промислове впровадження всіх конструктивних змін та розрахунків, що дозволили підвищити швидкість обертання витратного електроду до 30 000 хв$^{-1}$. Окрім цього, обґрунтована доцільність введення до плазмоутворюючого газу (аргон) в певному співвідношенні гелію, проведені дослідні розпилення на модернізованому обладнанні із застосуванням нових технологічних параметрів. Слід зазначити, що в роботі значна увага приділена розгляду механізмів утворення порошків при відцентровому розпиленні, які залежать від технологічних параметрів процесу.

У **четвертому розділі** наведені результати оптимізації технологічних параметрів плазмового ротаційного розпилення та середнього розміру частинок порошків із сплавів, що обрані для досліджень – це жароміцні нікелеві сплави Inconel 718, ВЖ98 та авіаційний титановий сплав Ti-6Al-4V. В результаті дослідних розпилень порошків встановлені рівняння залежності впливу швидкості обертання витратного електроду та вмісту гелію в плазмоутворюючій газовій суміші з аргоном на середній розмір частинок порошку. Для кожного сплаву визначені оптимальні технологічні параметри, що забезпечували одержання порошків високої якості із розмірами, що не перевищували 100 мкм і відповідали вимогам адитивних технологій. Визначенню якості порошків, виготовлених за оптимізованими режимами, присвячений окремий підрозділ даної роботи.

У **п'ятому розділі** наведені результати апробації та впровадження сферичних порошків із нікелевих жароміцних сплавів Inconel 718, ВЖ98 та титанового сплаву ВТ6 (Ti-6Al-4V), провідними українським підприємствами – АТ «Мотор Січ», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, ДП «Івченко Прогрес». Вказані порошки

використовувались для 3D-друку деталей газотурбінного двигуна за адитивними технологіями лазерного, електронно-променевого і мікроплазмового вирощування. При цьому також визначено раціональні значення текучість, насипна щільність порошків та розмір їх частинок, що забезпечували високу якість виробів, вирощених кожною із розглянутих адитивних технологій.

Наукові результати дисертації висвітлені у 13 наукових публікаціях, серед яких три статті – у наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus, з 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.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Загальним зауваженням по всій роботі є необхідність притримуватися єдиної термінології стостовно найменування досліджених металевих порошків, оскільки здобувач в окремих випадках називає ці порошки «гранулами», в інших – «частинками», «частками», «порошинками». Це ж зауваження стосується розмірів досліджених порошків, котрі якісно характеризуються дисертантом як: «наддрібні», «ультрадисперсні», «дрібної фракції», «дрібнодисперсні», «малого діаметру».

Зауваження по розділам дисертаційної роботи:

1. У розділі 3 на стор. 74 вказано, що «Більш жорсткі вимоги висувають до заготовки, що розпилюється», але не зазначено, які саме вимоги, яким способом повинен бути виплавлений зливок для витратного електроду, чи потрібна механічна обробка поверхні, якого класу чистоти необхідна поверхня витратного електроду тощо.

2. У розділі 4 графічні залежності на рис. 4.1-4.3 являють собою площину без екстремумів. Тому вони є малофункціональними з практичної точки зору для представників виробників порошків або тих хто використовує ці порошки для друку на 3D-принтерах. Доцільно було б нанести на ці площини криві, що обмежують зони з оптимальними режимами розпилення, що дозволяли б отримати заданий розмір фракції порошку для досліджених сплавів. Таким чином, результати досліджень дозволи б визначати параметри розпилення порошків для виробництва деталей широкого призначення різними методами 3D-друку.

3. Розділ Список використаних джерел складається зі 127 найменувань, з них менше 16 % – посилання на україномовні джерела інші – на закордонні. Таким чином приділено більше уваги закордонним розробкам в даному напрямку, а не вітчизняним. Що применшує вклад вітчизняних вчених в даному напряму досліджень, наприклад, Ю. Ф. Тернового який займався виробництвом порошків в м. Запоріжжя на УкрНДІ спецсталей та сплавів протягом 35 років зробив за цією тематикою.

Вище 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 Завгороднього Олександра Васильовича на тему «Вдосконалення обладнання та технології плазмового ротаційного розпилення для виготовлення металевих порошків адитивного призначення» виконана на високому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, а сукупність її теоретичних та практичних результатів має істотне значення для ґалузі знань 13 Механічна інженерія. 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 при присудження доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

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

Рецензент:
доктор техн. наук, професор кафедри
машин і технології ливарного виробництва
Національного університету
«Запорізька політехніка» Сергій ВОДЕННІКОВ

Підпис
ЗАСВІДЧУЮ
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"