РЕЦЕНЗІЯ

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 галузі знань 13 Механічна інженерія

за спеціальністю 131 Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації.

В сучасний період ведеться пошук шляхів кардинального підвищення властивостей авіаційних матеріалів. Рішенням цієї проблеми може стати впровадження інноваційних технологій виготовлення деталей шляхом адитивного вирощування із застосуванням металевих порошків. Адитивні технології упродовж десятиліть широко застосовують в провідних країнах світу, в тому числі, і в авіаційному двигунобудуванні. При цьому закордонні підприємства є розробниками обладнання та технології виготовлення металевих порошків певних сплавів, що мають надвисоку вартість і не завжди відповідають вимогам вітчизняного виробництва, де застосовуються інші марки матеріалів. Для налагодження адитивного виробництва в Україні необхідні власні розробки обладнання з виготовлення металевого порошку, визначення технологічних режимів для тих сплавів, що використовуються у вітчизняній техніці, потрібна їх апробація з використанням різних технологіях адитивного вирощування, які вже застосовуються в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, на АТ «Мотор Січ», ГП «Івченко-Прогрес», ТОВ «Адитивні лазерні технології». Ці підприємства потребують дисперсних порошків із жароміцних нікелевих і титанових сплавів. Вирішенню цих науково-практичних задач присвячена дана дисертаційна робота, тема якої є актуальним науковим напрямком.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Новизна представленої роботи полягає в подальшому розвитку залежностей 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. Вперше встановлені регресійні 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. 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.

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 ґалузі 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. Зміст досліджень охоплює повний цикл вивчення процесу виготовлення сферичних порошків із різних авіаційних сплавів та адитивного виготовлення деталей із них. Аналіз проведений від аналізу базового обладнання та його технологічних можливостей та оптимізації параметрів технологічного процесу ротаційного плазмового розпилення до вивчення впливу параметрів адитивних технологій (лазерний, мікроплазмовий, електронно-променевий 3D-друк) на якість виробів, виготовлених такими технологіями із застосуванням досліджених порошків. 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 в сфері впровадження технологій виготовлення деталей із застосуванням адитивних технологій.

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 машинописного тексту складає 154 сторінки машинописного тексту. Робота містить 45 рисунків, 26 таблиць, 12 формул та перелік посилань зі 127 найменувань.

У вступі наведена загальна характеристика роботи, 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** роботи наведені результати аналітичного огляду сучасних уявлень про процеси виготовлення сферичних металевих порошків для адитивних технологічних процесів виготовлення деталей, сформовані основні вимоги до таких порошків. Зроблений огляд різновидів технологічного обладнання для виготовлення сферичних металевих порошків, виділені пріоритетні напрямки для вдосконалення обладнання ротаційного плазмового розпилення. На основі проведеного аналізу сформовано мету та завдання роботи.

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

У **третьому розділі** наведені результати аналітичного огляду існуючої технології та обладнання для виявлення шляхів їх модернізації. В результаті виділено ряд ключових напрямків для реалізації нових технічних рішень. Також здобувач досить ретельно розглянув механізми утворення порошків при відцентровому розпиленні, які залежать від технологічних параметрів процесу. Для збільшення виходу дрібної фракції порошків (менше 100 мкм) та підвищення продуктивності установки запропоновані два шляхи: 1) за рахунок підбору оптимального складу суміші плазмоутворюючих газів (аргон + гелій) і підвищення потужності плазми; 2) збільшення швидкості обертання заготовки, для чого необхідна розробка нового, більш потужного електроприводу і вузла фіксації заготовки, що розкручується, притискним роликом і супутні конструктивні зміни. Розроблені і впроваджені у виробництво конструктивні зміни вузлів та механізмів обладнання для ротаційного плазмового розпилення – установки УЦР-4, що дозволили отримувати порошки із необхідними параметрами якості.

У **четвертому розділі** наведені результати визначення впливу технологічних параметрів плазмового ротаційного розпилення на середній розмір частинок порошків зі сплавів Inconel 718, ВЖ98, Ti-6Al-4V. В результаті статистичного аналізу даних дослідних розпилень порошків із кожного сплаву встановлені рівняння залежності впливу швидкості обертання витратного електроду та вмісту гелію в плазмоутворюючій газовій суміші з аргоном на середній розмір частинок порошку. Показані результати визначення якості сферичних порошків із досліджених сплавів, що виготовлені згідно оптимізованим технологічним режимам на модернізованому

обладнанні УЦР-4. Встановлено, що якість отриманих порошків повністю відповідала критеріям адитивних технологій.

У **п'ятому розділі** наведені результати впровадження сферичних порошків зі сплавів Inconel 718, ВЖ98, Ti-6Al-4V, виготовлених на модернізованому обладнанні для ротаційного плазмового розпилення (розділ 3) згідно оптимізованим технологічним режимам (розділ 4), у виготовлення деталей авіадвигунобудування. При цьому для кожного різновиду адитивних технологій (лазерний, мікроплазмовий та електронно-променевий) розглянутий вплив розміру використаних порошків, їх текучості та насипної щільності на технологічні параметри процесу 3D-друку, визначено найбільш раціональні параметри, що забезпечували високу якість готових деталей. Акти впровадження наведені у додатках Б-Д.

Наукові результати дисертації висвітлені у 13 наукових публікаціях здобувача, 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, включеному на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, та 9 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В розділі 1 на стор. 59 вказано, що «Для визначення вольт-амперних характеристик плазмотрону …. провели дослідні процеси розпилення …», але досліди, виконані в дисертаційній роботі, стосувались впливу швидкості обертання витратного електроду та співвідношення плазмоутворюючих газів.
2. В розділі 2 (рис. 2.1) у структурно-логічну схему дослідження не включена методика визначення вмісту газів (аргон, гелій) у плазмоутворюючій газовій суміші. На стор.61 вказувалось про визначення сферичності порошків за допомогою спеціального програмного забезпечення, а в дослідницьких розділах (розділи 4, 5) не представлені результати визначення цього параметру.
3. В розділі 3, стор.84, 87 вказується про те, що розроблено новий вузол і технічна документація, але в додатках відсутні відповідні кресленики.
4. В розділі 4, стор. 106 – не вистачає замірів мікротвердості по поверхні частинок порошку для підтвердження однорідності їх хімічного складу та структури.
5. В розділі 5, стор.116 (табл. 5.2) хімічний склад відповідає нормам сплаву ЭИ718, що є аналогом сплаву Inconel 718, з деякими відмінностями, тому можна додатково вказати норми для сплаву Inconel 718.

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 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:
проректор з науково-педагогічної роботи та
міжнародної діяльності
Національного університету
«Запорізька політехніка»
доктор техн. наук, професор Валерій НАУМИК

Підпис
ЗАСВІДЧУЮ
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"