

В І Д Г У К

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

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Для налагодження адитивного виробництва в Україні необхідні власні розробки обладнання з виготовлення металевих порошків, визначення технологічних режимів для тих сплавів, що використовуються у вітчизняній техніці, потрібна їх апробація з використанням різних технологій їх адитивного вирощування, які вже застосовуються в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, на АТ «Мотор Січ», ГП «Івченко-Прогрес». Для цих підприємств існує необхідність у сферичних порошках із жароміцних нікелевих і титанових сплавів. 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 імпорتنих 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

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Удосконалені 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 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.

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 дотримання 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. На першому етапі дисертаційної роботи досліджений процес ротаційного плазмового розпилення (PREP)

для отримання сферичних металевих порошків та виготовлення деталей із застосуванням цих порошків адитивними технологіями. Для цього виконано аналіз технологічних особливостей наявного обладнання для ротаційного плазмового розпилення – устаткування «УЦР-4», визначені шляхи для його подальшого удосконалення. Другим етапом роботи стали конструктивні розробки, що базувались на розрахунках 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 зв'язок із потребами сучасного авіадвигунобудування, оскільки оновлене обладнання дозволяє українському підприємству виготовляти металеві порошки для адитивних способів виробництва деталей авіадвигунів нових поколінь.

За результатами розгляду звітів 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 академічною українською мовою. Суть дисертаційної роботи подано послідовно і зрозуміло. Автором використано загальновживану термінологію наукового напрямку, що сприяє повному розумінню представлених результатів досліджень.

Дисертація складається зі вступу, п'ятих розділів, загальних висновків, переліку посилань і восьми додатків.

У **вступі** показана актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, визначено наукову новизну результатів дослідження і їх практичне значення, визначений особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** розглянуті основні технології виробництва сферичних металевих порошків та обладнання для їх виготовлення. Обґрунтовано вибір найбільш ефективної технології та обладнання для її реалізації – ротаційне плазмове розпилення. Засновуючись на вимогах адитивних технологій до металевих порошків, виділені шляхи для конструктивного доопрацювання і вдосконалення 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. Автором розроблено кінематичну схему устаткування УЦР-4 з врахуванням нових параметрів модернізованого обладнання. В цьому розділі значна увага приділена розгляду механізмів утворення порошків в результаті PREP, які залежать від технологічних параметрів процесу. Виконана промислова апробація конструктивних змін та розрахунків, що дозволили підвищити швидкість обертання витратного електроду до $30\,000\text{ хв}^{-1}$. Окрім цього, обґрунтована доцільність введення до плазмоутворюючого газу (аргону) в певному співвідношенні гелію, проведені дослідні розпилення на модернізованому обладнанні із застосуванням нових технологічних параметрів.

У **четвертому розділі** проведена оптимізація технологічних параметрів ротаційного плазмowego розпилення із визначенням середнього розміру частинок досліджених порошків (із жароміцних нікелевих сплавів Inconel 718, ВЖ98 та титанового сплаву Ti-6Al-4V). В результаті дослідних розпилень порошків отримані 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 40...100 мкм і відповідали вимогам адитивних технологій.

У **п'ятому розділі** наведені результати впровадження сферичних порошків із нікелевих жароміцних сплавів Inconel 718, ВЖ98 та титанового сплаву ВТ6 (Ti-6Al-4V), на українських підприємствах – АТ «Мотор Січ», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, ДП «Івченко Прогрес», ТОВ «Адитивні лазерні технології». Зазначені вище порошки використовувались для 3D-друку деталей газотурбінного двигуна за адитивними технологіями лазерного, електронно-променевого і мікроплазмового вирощування. При цьому також визначено вплив технологічних параметрів використаних адитивних технологій та технологічних параметрів порошків (текучість, насипна щільність порошків та розмір їх частинок) на якість виготовлених деталей. В якості прикладу в роботі надані результати використання порошків власного виробництва для виготовлення деталі паливної системи авіадвигуна – завихрювача зі сплаву Inconel 718 та кільцевих деталей зі сплавів ВЖ98 та титанового сплаву типу ВТ6.

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 міжнародних наукових конференцій.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В розділі 1 на стор. 55 зазначалось про відсутність на поверхні частинок порошку структурнозміненого або газонасиченого шару, в той час як в дослідницьких розділах 3, 4, 5 роботи відсутні результати контролю цього параметру.

2. В розділі 2 не представлені відомості про використані програми для побудови креслень нових чи змінених вузлів дослідженого обладнання, про методику побудови

гістограм розподілу розмірів частинок порошку при тому, що гістограми для порошків із кожного дослідженого сплаву побудовані і представлені у розділі 5. Також до 2-го розділу (методики) слід було перенести відомості про обладнання для адитивного вирощування деталей ГТД (лазерний 3D-принтер, устаткування для електронно-променевого та мікроплазмового пошарового друку виробів).

3. В розділі 3 на стор. 76 вказувалось про важливість контролю рівня вібрацій: «...чим менший рівень вібрацій витратного електроду, що обертається із високими швидкостями, тим вужче інтервал розмірів частинок порошку і вище вихід кондиційної фракції.», а також на стор. 87 зазначено, що «конструктивні зміни дозволили здійснювати... плазмове розпилення ... з мінімальними вібраціями». Тобто здобувач характеризує рівень вібрацій тільки на якісному рівні, не наводить кількісних характеристик та порівняння із показниками до та після модернізації обладнання.

4. Розділ 4: в якості параметрів для оптимізації, окрім середнього розміру частинок порошку у розпиленій партії (d_{50}) доцільно було б обрати ще такі важливі показники, як вихід кондиційного порошку (%), коефіцієнт сферичності порошку, які дисертант періодично згадує впродовж всієї роботи.

5. Розділ 5: на рис. 5.1a (стор. 117) наведено фото порошку, розміри якого згідно масштабної лінійки значно перевищують заявлені 40 мкм, що застосовувались для 3D-друку завихрювача зі сплаву Inconel 718.

Вище 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. Вище наведене дозволяє стверджувати, що дисертаційна робота **Завгороднього Олександра Васильовича на тему «Вдосконалення обладнання та технології плазмового ротаційного розпилення для виготовлення металевих порошків адитивного призначення»**, що представлена на здобуття ступеня доктора філософії, виконана на високому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності є закінченим науковим дослідженням, має практичну цінність та впровадження, а сукупність її теоретичних та практичних результатів має

істотне значення для галузі 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** заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Офіційний опонент:

доктор техн. наук, професор,
провідний науковий співробітник
Інституту енергетичних машин і
систем ім. А.М. Підгорного НАН України

Олена СТРЕЛЬНІКОВА