

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Лемішки Ігоря Анатолійовича**

«Оптимізація параметрів мікроструктури і властивостей композиційних матеріалів на основі титанових сплавів для адитивних технологій»,  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство

**Актуальність теми дисертації.** Зниження матеріало- і трудомісткості продукції на етапах її виготовлення та експлуатації є одним з актуальних завдань сучасного матеріалознавства, яке може бути частково вирішеним за рахунок використання адитивних технологій та титанових сплавів, що забезпечують оптимальний комплекс фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, і є перспективною сировиною для реалізації цих технологій. Зниження собівартості виробів складної геометричної форми можна досягти за рахунок використання порошків несферичної форми методом водневої обробки.

Перспективною технологією отримання таких матеріалів є метод гідрування-дегідрування (повного або часткового). Ця енергозберігаюча технологія дозволяє підвищити властивості титанових сплавів та вирішувати проблеми зниження собівартості продукції.

Враховуючи вищевикладене, можна констатувати, що у дисертаційній роботі Лемішки Ігоря Анатолійовича розглянуто актуальну науково-технічну задачу, що полягає в оптимізації морфології поверхні, гранулометричного складу порошків титанових сплавів, механічних властивостей нарощуваних шарів на їх основі з метою застосування таких порошків для 3D друку.

Запропонована у роботі технологія дозволила отримати матеріали з підвищеними показниками мікромеханічних властивостей – мікротвердості, пластичності та границі плинності.

**Достовірність результатів і висновків, сформульованих у дисертації.** Результати дисертаційного дослідження Лемішки І.А. достатньо обґрунтовані і мають високий ступінь достовірності, оскільки дисертантом використано широкий спектр незалежних експериментальних методів досліджень: сучасні методи дослідження структури матеріалів (рентгенівський фазовий та гранулометричний аналізи, оптична та електронна мікроскопія), метод мікроінтенування для визначення мікромеханічних властивостей, методів нейронно-мережевого моделювання.

**Повнота викладу основних результатів роботи.** Найважливіші положення дисертації викладено у 13 публікаціях, з них: 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, яке включене до міжнародної наукометричної бази даних, 2 статті у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних, 2 статті у наукових фахових виданнях України; роботу апробовано на 8 наукових міжнародних конференцій. Зміст публікацій повністю відповідає змісту дисертації.

**Характеристика роботи.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Загальний



обсяг роботи становить 6,5 авторських аркушів, текст основної частини – 4,5 авторські аркуші, містить 51 рисунок, 9 таблиць, бібліографічний список із 180 найменувань.

**У вступі** автором обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, задачі, об'єкт і предмет дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, подано дані про публікації та апробацію результатів дослідження.

**У першому розділі** дисертаційної роботи автором проаналізовано історичні аспекти та сучасний стан розвитку адитивних технологій. Дисертант показав переваги та недоліки семи категорій адитивного виробництва і матеріалів, які використовують для цього – полімерів, кераміки та металевих сплавів. Особливу увагу акцентовано на питаннях, пов'язаних з керуванням морфологією, гранулометричним складом та механічними властивостями титанових сплавів, а також областями їх раціонального використання. Титанові порошки майже ідеальної сферичної форми високої чистоти із щільністю пакування 65% отримують методом відцентрового плазмового розпилення електроду, але собівартість такої сировини досить висока. Автором обґрунтовано використання технології гідрування-дегідрування для отримання титанових порошків несферичної форми, використання яких дозволяє зменшити пористість виробів та підвищити їх компактність.

Дисертантом проаналізовано літературні джерела, що стосуються застосування методів комп'ютерного моделювання для ідентифікації матеріалів за їх морфологією, структурою та властивостями.

На основі аналізу літератури автором сформульовано задачі дослідження.

**У другому розділі** дисертаційної роботи подано методики дослідження морфології поверхні, гранулометричного складу, фазового та елементного складу титанових сплавів до і після водневої обробки, а також методики отримання нарощуваних шарів. Для визначення мікромеханічних властивостей використано метод мікроіндентування із застосуванням інденторів з різними кутами між вертикальною віссю і бічною гранню піраміди.

**Третій розділ** дисертаційної роботи містить результати дослідження технології водневої обробки на гранулометричний склад та морфологію титанових порошків VT6 і VT20. Автором доведено, що наявність фази гідриду титану в структурі сприяє підвищенню дисперсності та гомогенізації за розмірами досліджуваних порошків. Показано, що з точки зору мінімальної полідисперсності оптимальним є сплав марки VT20, отриманий гідруванням та частковим дегідруванням.

Аналіз морфології поверхні порошку цього сплаву із сферичною будовою показав, що вона бездефектна, на відміну від сплаву марки VT6, який має дендритну будову поверхні, яка може мати негативні наслідки при використанні останнього в адитивних технологіях. Для несферичних частинок порошків характерні чашкоподібна або пластинчаста форми з



наближенням до сферичної, що дає можливість використовувати їх для 3D друку.

**У четвертому розділі** з метою встановлення залежностей між гранулометричним складом, морфологією поверхні та мікромеханічними властивостями досліджено властивості нарощуваних шарів в системі «підкладка технічного титану VT1-0 – шар порошків сплаву VT20». Показано, що, пористість сплавів можна регулювати, змінюючи фракційний склад та геометрію вихідних порошків. Показано, що характер зміни мікротвердості сплаву VT20 для частинок порошку і сферичної, і несферичної форми має екстремальний характер. Максимальних значень досягнуто для фракції 160...200 мкм.

Автором доведено, що нарощувані шари на основі порошків сплаву марки VT20, отримані за розробленою технологією за механічними властивостями не поступаються своїм аналогам із сферичних порошків сплаву VT6.

**У п'ятому розділі** з використанням інструментарію штучного інтелекту на основі ймовірнісної нейронної мережі розроблено програму ідентифікації та класифікації порошків титанових сплавів, що дозволяє прогнозувати їх властивості. Дисертантом доведено, що точність розв'язання задач класифікації порівняно з відомими методами суттєво підвищено – від 3 до 34%. Розроблений метод класифікації на основі комбінованого використання алгоритму «Випадкового лісу» та полінома Колмогорова-Габора забезпечив високу точність результату розв'язання задачі класифікації – 96,88 %.

**Наукова новизна.** Основний науковий результат, отриманий в дисертаційному дослідженні Лемішки І.А. полягає в тому, що цілеспрямоване керування процесами структуроутворення, морфологією поверхні, гранулометричним складом та мікромеханічними властивостями титанових порошків несферичної форми, отриманих методом гідрування – часткового дегідрування, дозволяє використовувати їх в якості альтернативної сировини для адитивних технологій.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблення рекомендацій з модернізації технологічного процесу відновлення лопаток турбін авіаційних двигунів з використанням титанового порошку підтверджують практичну цінність дисертаційної роботи, спрямовану на зниження собівартості виробів, виготовлених за допомогою прогресивних адитивних технологій. Розроблений метод ідентифікації відповідності порошкових титанових сплавів на основі ймовірнісної нейронної мережі підвищує точність розв'язання задачі класифікації до 96,88 %.

#### **Зауваження до роботи:**

1. У розділах 3, 4, 5 (с.76-77, 85-86, 91-92, 97-99) дисертації автором подано інформацію, що стосується аналізу даних літератури, яку варто було б подати у першому розділі. У розділі 3 (с.76) автор знову повертається до обґрунтування актуальності роботи.

2. Опис технології гідратації і дегідратації, як відомих процесів (с.79), доцільно було б привести у розділі 2.



3. Назва п.3.1 «Вплив режимів гідрування-дегідрування на гранулометричні характеристики титанової губки» не точно відображає приведені результати дослідження, оскільки окрім впливу технології на гранулометричні характеристики, мова йде також про її вплив на фазовий склад та морфологію порошків.

4. Автор стверджує, що «керування режимами процесу гідрування і дегідрування регулює кількісне співвідношення фаз  $\alpha$ -Ti і  $TiH_{2+x}$ » (с.81), однак у роботі не має інформації про їх режими.

5. При використанні методу мікроіндентування дисертант застосовував 8 пірамід з різними кутами між віссю і бічною гранню – від 45 до 85°, але доцільність їх використання, на мою думку, не достатньо обгрунтована і пов'язана із значними матеріальними затратами. Не зрозуміло, чому для визначення мікротвердості автор не скористався стандартним індентором.

6. В розділі 4 продубльовано інформацію щодо мікромеханічних властивостей – в табл. 4.1 і на рис.4.3, в табл. 4.3 і на рис.4.4.

7. Автор обмежується констатацією певних фактів, не аналізуючи причин та механізмів того чи іншого явища, наприклад:

- Чим зумовлена найменша ступінь полідисперсності 2,2% титанових порошків при застосуванні технології гідрування – часткове дегідрування?

- Чому порошки титанового сплаву марки VT20 характеризуються більш рівномірним розподілом частинок (6,4-9,1 %) за фракціями у порівнянні з порошками марки VT6 (12,8-15,6 %)?

Але слід підкреслити, що зроблені зауваження не знижують цінності досягнутих результатів і наукового рівня дисертаційної роботи. Характеризуючи дисертаційну роботу в цілому, слід зазначити, що вона є логічно завершеним науковим дослідженням.

**Відповідність дисертації встановленим вимогам.** Вважаю, що дисертаційна робота Лемішки Ігоря Анатолійовича «Оптимізація параметрів мікроструктури і властивостей композиційних матеріалів на основі титанових сплавів для адитивних технологій» є актуальною, має наукову новизну та практичну цінність, відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

**Офіційний опонент:**

кандидат технічних наук, доцент,  
заступник завідувача кафедри будівельної механіки  
Тернопільського національного технічного  
університету імені Івана Пулюя  
Підпис Крамар Г.М. засвідчую:  
Проректор з наукової роботи ТНТУ ім.І.Пулюя  
д.т.н., проф.



Г.М. Крамар

Р.М.Рогатинський