

У спеціалізовану
вчену раду Д12.105.01 Донбаської
державної машинобудівної академії,
84313, м. Краматорськ,
вул. Академічна, 72

ВІДГУК

офіційного опонента

професора ФРОЛОВА ЯРОСЛАВА ВІКТОРОВИЧА

на дисертаційну роботу

ПАВЛЕНКА ДМИТРА ВІКТОРОВИЧА

«Розвиток наукових основ і удосконалення

процесів виготовлення деталей газотурбінних двигунів з порошкових матеріалів із застосуванням інтенсивної пластичної деформації»,

поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – «Процеси та машини обробки тиском»

1. Актуальність теми.

Головним завданням вітчизняного авіаційного двигунобудування є конкурентоспроможність на зовнішньому та внутрішньому ринках. Для цього необхідно впровадження нових ресурсозберігаючих технологій, у тому числі технологій виробництва деталей газотурбінних двигунів на авіаційних підприємствах України.

Витрати на виробництво деталей з жароміцних титанових і нікелевих сплавів, значною мірою визначаються технологією виробництва заготовок. Однією з них є технологія синтезу заготовок з порошкових матеріалів, яка забезпечує суттєве зниження їх вартості, особливо для титанових сплавів. Однак якість таких заготовок визначається ефективністю методів їх подальшої обробки для усунення залишкової пористості. Головним чином це методи обробки тиском. Спосіб обробки тиском забезпечує міцність, гомогенність хімічного складу, структуру, а також анізотропію властивостей отриманої заготовки.

Високі вимоги до якості виробів, а також нові способи пластичного деформування, наприклад, інтенсивне пластичне деформування (ІПД), індукують розвиток досліджень з розробки нових та удосконалення існуючих технологій обробки тиском. Метою таких технологій є виробництво заготовок, за своїм рівнем властивостей придатних для виготовлення високонавантажених деталей сучасних газотурбінних двигунів.

Поширення методів інтенсивної пластичної деформації для обробки металів і сплавів, викликане особливими умовами деформування і отримання певних фізичних та механічних властивостей, спонукає інтерес до них у виробників авіаційної техніки з точки зору їх використання для деформації порошкових матеріалів. Але обмеженість наявних наукових основ щодо їх застосування до порошкових заготовок породжує науково-прикладну проблему підвищення якості таких заготовок до рівня, який відповідає вимогам навантажених деталей авіацій-

Вх. № 240/05
20. 04 2021 р.
ДДМА

них двигунів. Саме вирішенню цієї актуальної проблеми і присвячено дисертаційну роботу Дмитра Павленка.

У зв'язку з вищезазначеним вважаю, що тема дисертаційної роботи, пов'язана з подальшим розвитком наукових основ та удосконаленням процесів обробки заготовок з порошкових матеріалів для підвищення їх якості, спрямована на вирішення актуальної наукової проблеми і має важливе науково-практичне та народногосподарське значення для економіки України.

2. Відповідність планам наукових досліджень.

Результати докторської дисертації Дмитра Павленка спрямовані на вирішення завдань, поставлених у Стратегії відродження вітчизняного авіабудування на період до 2030 року, затвердженій розпорядженням Кабінету Міністрів України № 851-р від 08.07.2020, та деяким стратегічним пріоритетним напрямом, визначеним статтею 4 Закону України № 3715-VI від 08.09.2011 «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні». Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР), передбачених планами Міністерства освіти і науки України на кафедрі технології авіаційних двигунів НУ «Запорізька політехніка» (№ держреєстрації 0108U000277, 0110U001144, 0112U002024, 0115U002239), а також в рамках чотирьох госпдоговірних науково-дослідних робіт з АТ «МОТОР СІЧ», у яких Дмитро Павленко брав участь як відповідальний виконавець. Як виконавець він приймав участь у НДР, фінансованій Національною академією наук України "Створення дослідної технології отримання багатофункціональних наноструктурних титанових сплавів" (№ держреєстрації 0115U004261).

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, та їх достовірність.

Високий ступінь достовірності та обґрунтованості наукових результатів роботи визначається використанням базових фундаментальних залежностей теорій порошкової металургії та обробки металів тиском. Рівень обґрунтованості результатів забезпечується тим, що розроблені моделі та пояснення явищ базуються на теорії пластичної деформації матеріалів та сучасному рівні публікацій відповідних галузях. Достовірність отриманих результатів забезпечена використанням переважно стандартизованих методів дослідження і статистичної обробки отриманих даних, сучасної вимірювальної апаратури, а також підтверджена експериментально в лабораторних умовах та в умовах виробництва. Крім того, достовірність та обґрунтованість підтверджується всебічною та багаторазовою апробацією дисертації на міжнародних конференціях, наявністю рецензованих міжнародних публікацій в рейтингових виданнях, впровадженням у виробництво результатів досліджень та виготовленням натурального зразка лопатки компресора. Достовірність результатів розрахунку на міцність та економічного ефекту забезпечується підтвердженням їх коректності виробниками газотурбінних двигунів.

4. Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше запропоновано новий підхід до виготовлення титанових заготовок з порошкових матеріалів, основою якого є інтенсивна пластична деформація гвинтовою екструзією і який не містить металургійного переділу титану, що дозволило підвищити енергоефективність виробництва та отримувати заготовки високої якості. Новий підхід базується на ефектах інтенсивної пластичної деформації: ущільненні порошкових матеріалів, гомогенізації хімічного складу та подрібненні структурних складових.

2. Вперше встановлено закономірності формування структури, механічних та фізичних властивостей спечених титанових сплавів при деформації гвинтовою екструзією, які враховують еволюцію порового простору заготовок, що дозволило обґрунтувати мінімальну кількість циклів деформації для формування субмікроструктурної структури заготовок, що забезпечує рівень їх властивостей, достатній для виготовлення деталей ГТД.

3. Вперше для спечених титанових сплавів теоретично обґрунтовано, що під час гвинтової екструзії в них виникає латентна деформація у вигляді мультимасштабних вихрових рухів; суть новизни полягає в тому, що утворення вихорів на різних масштабних рівнях заготовки додатково пов'язується з наявністю пор, що, на відміну від відомих теорій, дозволило пояснити ефекти деформації центральної зони спечених заготовок та гомогенізацію хімічного складу.

4. Отримали подальший розвиток уявлення про вплив режимів пресування гвинтовою екструзією та параметрів інструменту на якість заготовок з порошкових матеріалів, які, на відміну від відомих, полягають у тому, що деформування виконують з рівнем протитиску не меншому за одну третину від тиску пресування із забезпеченням пластичного відновлення первинного перерізу заготовки за рахунок збільшення довжини калібрувального паска матриці, що дозволило виключити руйнування виробу та забезпечило можливість багатоциклової обробки.

5. Отримала подальший розвиток модель газонасичення напівфабрикатів титанових сплавів з порошкових матеріалів при деформуванні, яка, на відміну від відомих, враховує їх насичення киснем та азотом з порового простору на етапі інтенсивної пластичної деформації, що дозволило встановити граничний рівень газових домішок в напівфабрикатах після деформації гвинтовою екструзією.

5. Практична цінність роботи.

У роботі отримані основні практичні результати:

- новий спосіб виготовлення напівфабрикатів титанових сплавів для деталей з порошкових матеріалів із застосуванням інтенсивної пластичної деформації;
- новий спосіб багатоетапного пресування спечених заготовок пластичним середовищем (фальш-заготовкою), що дозволяє отримувати практично безпористі напівфабрикати з титанових сплавів і формувати в них СМК структуру;

- механічні та фізичні властивості титанових сплавів з порошкових матеріалів в СМК стані;
- залежності запасу міцності та вірогідності руйнування лопаток газотурбінних двигунів від будови порового простору, що дозволяють регламентувати рівень залишкової пористості заготовок;
- рекомендації щодо застосування технологій виготовлення напівфабрикатів титанових сплавів з порошкових матеріалів для лопаток ротора та статора компресорів малорозмірних газотурбінних двигунів на основі міцнісного аналізу;
- конструкція штампа для пресування спечених заготовок з протитиском та технологічного оснащення для реалізації способу гвинтової екструзії, що дозволяють обробляти високоміцнісні сплави.
- рекомендації щодо конструкції гвинтової матриці та режимів інтенсивної пластичної деформації спечених заготовок гвинтовою екструзією.

6. Повнота викладення результатів в опублікованих працях.

Основні матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 63 роботах, в тому числі: 21 стаття – у фахових виданнях України, 13 статей – у міжнародних наукових журналах, 13 статей – у наукових журналах, внесених до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 15 статей опубліковано без співавторів, 24 роботи – в матеріалах конференцій. На нові технічні рішення отримано 4 патенти України на корисну модель. Також матеріали опубліковано в 1 навчальному посібнику. Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Проведено апробацію та обговорення результатів досліджень на більш ніж 20-ти конференціях та семінарах.

7. Оцінка змісту дисертації, її завершеність в цілому.

Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, що містить основні результати, списку літератури і додатків. Загальний обсяг роботи складає 373 сторінки, в тому числі 290 сторінок основного тексту, 110 рисунків та 40 таблиць, список використаних джерел з 294 найменувань та 2-х додатків.

У **вступі** сформована проблема дослідження, обґрунтована її актуальність, визначена мета роботи і коло вирішених завдань, вказана її практична цінність і наукова новизна. Розглянуті питання предмету і методів ведення досліджень.

Перший розділ присвячений аналізу стану питання щодо процесів обробки тиском порошкових матеріалів та виробництва титанових напівфабрикатів для заготовок деталей газотурбінних двигунів.

Тут проведено аналіз відомих технологій виробництва заготовок та способів їх обробки з метою підвищення якості. Аналіз базується на розкритті суперечливих питань системи «якість виробів – витрати на виробництво». Для цього автор дає критичну оцінку публікаціям провідних вітчизняних та закордонних вчених з питань виробництва та споживання титанових сплавів, технологій виробництва спечених титанових напівфабрикатів і забезпечення їх якості, обробки

заготовок з порошкових матеріалів тиском, фізичних властивостей сплавів у субмікрокристалічному стані. Також у цьому розділі проаналізовані результати досліджень впливу ІПД на технологічну пластичність матеріалів; розглянуто особливості технологічного оснащення та обладнання для гвинтової екструзії порошкових матеріалів, технологічні аспекти застосування процесів інтенсивної пластичної деформації для виробництва деталей з порошкових матеріалів. На підставі дослідження літератури встановлено основні напрямки вирішення проблеми підвищення якості порошкових заготовок до рівня, який відповідає вимогам навантажених деталей авіаційних двигунів.

У **другому розділі** розглянуті питання щодо методологічного забезпечення досліджень, зокрема методики отримання та оцінки якості спечених заготовок з порошкових матеріалів, їх деформаційної обробки методами ІПД – ізостатичним пресуванням та гідроекструзією. Описані використані стандартні, відповідно до державних та галузевих стандартів, й оригінальні методики дослідження:

якості заготовок, зокрема пористості, структури, розподілу легувальних елементів; міцності та ударної в'язкості; втоми; здатності до зміцнення; кристалографічної текстури і рентгенодифрактометричного аналізу. Описано застосовані методики математичного моделювання та розглянуто питання технології отримання заготовок деталей з порошкових матеріалів для ГТД і альтернативних схем отримання деформованих напівфабрикатів з таких матеріалів.

Третій розділ присвячений розвитку наукових основ виробництва титанових сплавів з порошкових матеріалів. Досліджено вплив параметрів порошку титану на якість спечених заготовок, ущільнення заготовок під час спікання, газонасичення титанових напівфабрикатів, виробництво титанових сплавів типу VT8 з порошкових матеріалів. Виконано оцінювання впливу пористості матеріалу на міцність лопаток ГТД.

Таким чином, у третьому розділі отримали подальший розвиток наукові основи процесів синтезу титанових сплавів з порошкових матеріалів.

Четвертий розділ дисертації присвячено розвитку наукових основ і удосконаленню процесів обробки спечених титанових сплавів тиском, зокрема методами інтенсивної пластичної деформації. Розглянуто особливості обробки тиском порошкових заготовок, виконано оцінювання ефективності методів обробки тиском заготовок з порошкових матеріалів: гідроекструзією, гарячим ізостатичним пресуванням, крученням під високим тиском, гвинтовою екструзією. Обґрунтовано обробку гвинтовою екструзією як найбільш раціональним способом ІПД, у зв'язку з чим у цьому розділі автором розглянуто основні ефекти деформації титанових заготовок гвинтовою екструзією та їх наслідки.

У **п'ятому розділі** проведені дослідження щодо удосконалення технологічного оснащення, обладнання та технології гвинтової екструзії. Розглянуто конструктивні аспекти проектування та експлуатації оснащення; питання щодо удосконалення дослідно-промислової установки для гвинтової екструзії та процесу деформації заготовок з порошкових матеріалів та модернізації пресового обладнання для реалізації процесу гвинтової екструзії. Описано основні ефекти від впровадження удосконаленого процесу ІПД, зокрема економічний та екологічний ефекти.

Наприкінці кожного розділу роботи наведено висновки до розділу, а наприкінці роботи наведено загальні **висновки**, в яких відмічені основні результати досліджень з обґрунтуванням рекомендацій з їх практичного використання.

Список використаних джерел складається з 294 джерел, є інформативним та достатньо повно охоплює предметну галузь, відображає опрацювання здобувачем значної кількості сучасних іноземних джерел. Більша частина посилань зроблена на статті дослідників, опублікованих у провідних журналах та матеріалах конференцій.

У **додатки** винесені відомості про впровадження результатів роботи та перелік основних публікацій здобувача.

Загалом викладення отриманих наукових і практичних результатів є послідовним, логічним та обґрунтованим, експериментальна частина не суперечить теоретичній, а дисертаційне дослідження має завершений характер. Вміст автореферату достатньо повно розкриває основні положення дисертації та відповідає вимогам до оформлення. Результати досліджень повною мірою відображені в публікаціях автора.

8. Зауваження по змісту і оформленню дисертації.

1. Під час аналізу якості деформованих методами ПІД порошкових матеріалів бажано було б більше уваги приділити наслідкам нерівномірності деформації, наприклад порівнянню центральних та периферійних шарів матеріалу з точки зору прийнятих в роботі критеріїв оцінки якості.

2. В роботі автор оперує поняттями субмікрокристалічна (СМК) структура та бімодальна структура. Бажано біло б побачити дискусію про те, яка з фаз відповідальна за початок руйнування зразків і за яких умов.

3. На мою думку застосовний автором термін «латентна деформація» не є точним. У даному випадку радше пластична течія може відбуватися у додаткових напрямках, поява яких обумовлена нерівномірною щільністю матеріалу.

4. Описана автором у четвертому розділі (п. 4.3.2, рис. 4.37) закономірність ущільнення та зміцнення заготовок з порошкового матеріалу під час обробки гвинтовою екструзією подається у загальному вигляді, без прив'язки до режимів обробки. Це дозволило автору пояснити ряд ефектів але, на мій погляд, для практичного використання її потрібно було б пов'язати зі ступенем деформації, або іншим кількісним критерієм її оцінки.

5. Точність розробленої математичної моделі виникнення деформаційної пористості під час обробки матеріалів (п. 4.3.5) підтверджена автором за непрямыми ознаками.

Висновок. На підставі аналізу дисертаційної роботи Дмитра Павленка «Розвиток наукових основ і удосконалення процесів виготовлення деталей газотурбінних двигунів з порошкових матеріалів із застосуванням інтенсивної пластичної деформації» і опублікованих за темою роботи наукових робіт автора вважаю, що в дисертації з достатньою повнотою обґрунтовано і вирішено актуальну науково-технічну проблему підвищення якості заготовок з порошкових матеріалів

обробкою тиском. Матеріали дисертації викладено логічно і послідовно, стиль викладу чіткий і зрозумілий. Зміст автореферату повністю відповідає тексту дисертації, а основні наукові положення, які в них містяться, є ідентичними.

За своєю актуальністю, ступенем достовірності та обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, новизною, практичним значенням, повнотою викладу дисертаційна робота відповідає вимогам до докторських дисертацій.

Зважаючи на відповідність дисертації вимогам положень «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, вважаю, що її автор Павленко Дмитро Вікторович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри
Обробки Металів Тиском
Національної металургійної
академії України,
д. т. н., проф.

Ярослав ФРОЛОВ

Підпис Ярослава ФРОЛОВА

ЗАСВІДЧУЮ,

Начальник відділу кадрів
Національної
Металургійної Академії України



Володимир ШИФРІН