

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Павленка Д.В.

«Розвиток наукових основ і удосконалення процесів виготовлення деталей газотурбінних двигунів з порошкових матеріалів із застосуванням інтенсивної пластичної деформації»,

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

Актуальність теми дисертації.

Розвиток сучасного промислового потенціалу провідних промислових країн не можливий без випереджаючого рівня росту ефективності ресурсозберігаючих технологій. Одним із напрямів розвитку останніх є широке застосування прогресивних методів пластичної обробки металів, зокрема – методів інтенсивної пластичної деформації. Реалізуючи особливі умови деформації, вони дозволяють, з одного боку, обробляти матеріали з низькою пластичністю, а з іншого боку – формувати в заготовках субмікрокристалічну структуру, що дозволяє підвищувати їх міцнісні властивості без суттєвого зниження пластичності. Особливо актуальним питання застосування методів інтенсивної пластичної деформації є для заготовок, отримуваних з порошкових матеріалів. Вже достатньо давно відомі такі переваги технологій порошкової металургії, як зниження собівартості виробництва за рахунок підвищення енергоефективності та можливість отримувати різномірні за хімічним складом сплави, що можуть бути реалізовані для виробництва деталей газотурбінних двигунів. Така можливість є результатом усунення деформаційною обробкою таких вад заготовок з порошкових матеріалів, як залишкова пористість, яка призводить до зниження міцності і пластичності, а отже, і суттєво обмежує їх використання, зокрема для виробництва газотурбінних двигунів.

Особливої актуальності розвиток наукових основ та процесів деформаційної обробки набуває для порошкових заготовок з титанових сплавів. Причин цьому є декілька. Перш за все, виробництво титанових заготовок з

порошкових матеріалів є набагато вигіднішим та екологічним у порівнянні з технологією металургійного переділу титану. По-друге, титанові сплави є стратегічними матеріалами, так як використовуються для виробництва газотурбінних двигунів та літальних апаратів різного призначення. По-третє – завдяки своїм властивостям як термічна та механічна обробка, так і обробка тиском титанових заготовок є складним завданням.

Своєчасність дослідження також підсилюється необхідністю розробки енергоефективної, імпортозамінної технології виробництва титанових напівфабрикатів для вітчизняної ракетно-космічної галузі. Вважаю, що застосований автором підхід, що базується на розвитку методів деформаційної обробки порошкових заготовок, є вірним напрямом, який дозволяє з відносно невеликими витратами ресурсів та часу реалізувати технологію отримання заготовок з титанових сплавів різних класів у промисловому масштабі.

Вищевідзначене обумовлює безсумнівну **актуальність** рецензованої роботи, присвяченої розв’язанню важливої науково-технічної проблеми підвищення якості заготовок з порошкових матеріалів обробкою тиском.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами.

Тема дисертаційної роботи відповідає основним напрямам Стратегії відродження вітчизняного авіабудування на період до 2030 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 851-р від 08.07.2020, та стратегічним пріоритетним напрямом на 2011-2021 роки (визначені статтею 4 Закону України № 3715-VI від 08.09.2011 «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні»), одним з яких є освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з’єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій. Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР), передбачених планами Міністерства освіти і науки України та виконаних на кафедрі технології авіаційних двигунів НУ «Запорізька політехніка» (№ держ. реєстрації 0108U000277, 0110U001144, 0112U002024, 0115U002239), а також в рамках спільних науково-дослідних робіт, проведених НУ «Запорізька політехніка» з провідними промисловими підприємствами України в галузі авіадвигунобудування (АТ «Мотор Січ» та ДП «Івченко-

Прогрес»), Донецьким фізико-технічним інститутом ім. А.Г. Галкіна (г. Київ) НАН України (№ держ. реєстрації 0115U004261) та Донбаською державною машинобудівною академією.

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

Висунуті у дисертації наукові положення та отримані висновки є достатньо обґрунтованими, оскільки основні результати теоретичної частини роботи ґрунтовані на застосуванні теорій провідних вітчизняних та закордонних вчених, які автор розвинув з точки зору обробки некомпактних матеріалів, та не суперечать їм. Достовірність результатів роботи забезпечена коректністю постановки задач і застосуванням методів лабораторного експерименту з використанням сучасного дослідницького устаткування та стандартних методів випробувань. Вона підтверджується також зіставленням отриманих результатів з відомими аналітичними та експериментальними даними, а також відповідністю результатам експериментальних досліджень, проведених із застосуванням статистико-математичної обробки даних.

Достовірність основних положень і методик підтверджена прикладами промислового використання та апробації технологічних методик і результатів розробок, що засвідчені фахівцями провідного підприємства з виробництва газотурбінних двигунів – АТ «Мотор Січ».

Також достовірність отриманих результатів та їх коректність забезпечуються публікацією основних частин роботи в рецензованих наукових журналах та апробацією на науково-практичних конференціях різних рівнів.

Наукова новизна отриманих результатів

Оцінюючи найважливіші здобутки дисертаційного дослідження, варто вказати на наступні основні результати, що мають вагому наукову новизну:

1. Вперше запропоновано та обґрунтовано новий підхід до виготовлення титанових заготовок з порошкових матеріалів, основою якого є інтенсивна пластична деформація гвинтовою екструзією, 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 субмікрокристалічної структури заготовок, що забезпечує рівень їх властивостей, достатній для виготовлення деталей ГТД.

3. Вперше для спечених титанових сплавів теоретично обґрунтовано виникнення латентної деформації у вигляді мультимасштабних вихрових рухів. При цьому 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. Визначено, що для забезпечення їх якості деформування необхідно виконувати з рівнем протитиску не менш ніж однієї третини від тиску пресування із забезпеченням пластичного відновлення первинного перерізу заготовки за рахунок збільшення довжини калібрувального паска матриці.

5. Отримала подальший розвиток модель газонасичення напівфабрикатів титанових сплавів з порошкових матеріалів при деформуванні, яка 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.

Практична цінність роботи. Практичну цінність результатів дослідження становлять наступні розробки:

– спосіб виготовлення напівфабрикатів титанових сплавів для деталей газотурбінних двигунів з порошкових матеріалів;

- спосіб пресування спечених заготовок пластичним середовищем, що дозволяє отримувати безпористі напівфабрикати і формувати в них СМК структуру;
- закономірності зміни розмірів титанових заготовок з порошкових матеріалів під час спіканні;
- залежності запасу міцності та імовірності руйнування лопаток ГТД від будови порового простору;
- механічні та фізичні характеристики титанових сплавів з порошкових матеріалів після гвинтової екструзії;
- конструкція штампа для пресування спечених заготовок з протитиском та технологічного оснащення для реалізації гвинтової екструзії;
- рекомендації щодо режимів гвинтової екструзії титанових заготовок з порошкових матеріалів;
- рекомендації щодо застосування технологій виготовлення напівфабрикатів титанових сплавів з порошкових матеріалів для лопаток газотурбінних двигунів.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність в цілому.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 373 сторінки, в тому числі 290 сторінок основного тексту, 110 рисунків та 40 таблиць, список використаних джерел з 294 найменувань та 2 додатка, що містять і список опублікованих праць за темою дисертації і перелік науково-технічних конференцій.

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми та показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами. Сформульовано мету та задачі, що вирішені, окреслено об'єкт, предмет та методи досліджень. Відображена наукова новизна, практична цінність, апробація та публікації отриманих результатів з зазначенням особистого внеску здобувача.

У **першому розділі** проведено аналіз стану питання в галузі технологій виробництва титанових напівфабрикатів, виробництва заготовок з порошкових матеріалів, методів обробки їх тиском, обладнання та оснащення для їх

реалізації. Встановлено досягнення і основні проблеми технології виробництва деталей. Показано, що основною проблемою підвищення якості заготовок з порошкових матеріалів шляхом їх обробки тиском є їх низька пластичність, що потребує розвитку наукових основ та удосконалення процесів деформації. Найбільш раціональним методом деформаційної обробки, що дозволяють усунути основні вади порошкових заготовок, є інтенсивна пластична деформація. Обґрунтовано ефективність розвитку технологій виробництва деталей газотурбінних двигунів з титанових сплавів із застосуванням методів обробки тиском. Визначено перелік основних завдань, які повинні бути вирішені для розв'язання сформульованої науково-технічної проблеми.

У **другому розділі** описано комплекс стандартних та оригінальних методик, використання яких у дисертаційній роботі є необхідним та достатнім для вирішення поставленої науково-практичної проблеми. Розглянуто особливості використання методів виробництва заготовок з легованих титанових сплавів для подальшої обробки тиском, а також методів обробки тиском – гідроекструзії, гарячого ізостатичного пресування, кручення під високим тиском та гвинтової екструзії. Описані використані стандартні методи досліджень якості зразків, визначення механічних та фізичних властивостей, хімічного складу, структури тощо. Наведено опис нестандартних методик дослідження, зокрема випробування на втому, а також методів моделювання напружено-деформованого стану лопаток компресора. Приведені результати оцінювання ефективності виробництва заготовок деталей із використанням методів інтенсивної пластичної деформації.

Третій розділ дисертації присвячений дослідженню процесів виробництва заготовок з порошкових матеріалів для наступної обробки тиском. Досліджено якість вихідних порошків, механічні властивості, структуру, хімічний та фазовий склад спечених заготовок, що дозволило автору зробити висновок про можливість їх застосування для виробництва деталей газотурбінних двигунів, зокрема лопаток компресора, але за умови усунення залишкової пористості та зміцнення шляхом використання деформаційної обробки. На підставі удосконаленої моделі, що дозволяє враховувати

забруднення титанових заготовок з порошкових матеріалів основними газовими домішками – киснем та азотом – під час інтенсивної пластичної деформації, обґрунтовано, що використання серійних порошків титану забезпечує такий їх граничний вміст, який відповідає нормативній документації на титанові сплави.

Четвертий розділ присвячений розвитку наукових основ обробки заготовок з порошкових матеріалів тиском. Досліджено особливості обробки заготовок різними способами інтенсивної пластичної деформації та їх властивості. Зроблено висновок про ефективність використання гвинтової екструзії. Досліджено структуру, механічні та теплофізичні властивості зразків після гвинтової екструзії, особливості формування кристалографічної текстури та здатність до подальшої обробки тиском. На підставі результатів математичного моделювання встановлено основні вимоги до реалізації процесу гвинтової екструзії заготовок з порошкових матеріалів та обґрунтовано підвищення рівня технологічної пластичності заготовок із субмікрокристалічною структурою. На основі експериментальних досліджень обґрунтовано стадійність ущільнення і зміцнення заготовок та еволюцію порового простору. Виконано моделювання напружено-деформованого стану лопаток ротора та статора компресора малорозмірного газотурбінного двигуна для безпілотного літального апарату, на підставі чого зроблено висновок про можливість застосування порошкових заготовок після деформаційної обробки. Обчислено економічний та екологічний ефекти від застосування процесів обробки тиском.

П'ятий розділ присвячений дослідженню та розробці технологічного оснащення для реалізації інтенсивної пластичної деформації спечених титанових заготовок тиском шляхом гвинтової екструзії. Розглянуто основні компоненти дослідно-промислової установки для реалізації удосконаленого процесу деформації заготовок з порошкових матеріалів гвинтовою екструзією: технологічне оснащення, штамп та технологію деформування з протитиском та пресове обладнання для реалізації процесу. На підставі результатів дослідження встановлені вимоги до обладнання та рекомендації щодо його проєктування.

Висновки належним чином відображають основні результати

дисертаційної роботи.

У **додатках** наведено список основних публікацій автора та акти промислового впровадження результатів роботи на АТ «Мотор Січ», ДП «Івченко-Прогрес» та НУ «Запорізька політехніка».

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Основні результати та висновки дисертаційної роботи в повному обсязі висвітлено 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. Результати роботи також отримали ґрунтовну апробацію на цілому ряді міжнародних науково-технічних конференцій та семінарів. Основні результати роботи повною мірою висвітлені в публікаціях автора та не суперечать їм.

Як і будь-яка ґрунтовна наукова робота, яка розв’язує важливу науково-технічну проблему та вирішує низку завдань, робота, що рецензується, має **недоліки**, а саме:

1. Однією із важливих умов, необхідних для деформації заготовок з порошкових матеріалів, автор, на мій погляд, абсолютно точно теоретично обґрунтував наявність та експериментально визначив мінімально потрібний рівень протитиску, прикладеного до переднього торця заготовки. Однак, цьому важливому питанню в роботі не приділяється належної уваги порівняно з, наприклад, питанням дослідження теплофізичних властивостей або текстуроутворення. Дослідження з моделювання деформації порошкових заготовок з різним рівнем протитиску відображені в статтях автора (публікації 6 та 10), однак дослідження щодо чисельного моделювання достатньо обмежено представлено в дисертації. Результати дослідження щодо цього питання окремо наведені в різних розділах роботи (розділ 2 п. 2.2.1, розділ 4 п. 4.2.4 та розділ 5 п. 5.1). Вважаю доцільним було б створення окремого завдання щодо визначення впливу рівня протитиску та більш повне висвітлення результатів моделювання та експериментальних досліджень в окремому пункті роботи.

2. На мою думку, слушним завданням дисертаційної роботи було б використання реологічної моделі поведінки некомпактних матеріалів з ідентифікацією її параметрів для досліджених сплавів залежно від режимів компактування та спікання. Це дозволило б автору на підставі чисельного моделювання отримати не оціночні значення режимів виготовлення заготовок з порошкових матеріалів, а оптимальні значення з точки зору енергоефективності процесів їх подальшої обробки тиском.

3. 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, зокрема насичення деформації, але, на мій погляд, для практичного використання її потрібно було б пов'язати зі ступенем деформації.

4. Модель утворення деформаційної пористості, яку автор використовує для оцінювання ступеня деформації заготовок в різних станах при обробці тиском та різанням (розділ 4, п. 4.3.5.), базується на граничних значеннях параметрів та, на мою думку, описує процес лише на якісному рівні. При цьому автор не наводить будь-яких залежностей цих параметрів від марки сплаву, ступеня його деформації, температури, але вказує на конкретні допустимі величини ступеня деформації Мізеса заготовок при обробці тиском або різанням.

5. Звертає на себе увагу іноді невдале використання термінології: «сила» – замість «зусилля», а також термінів «щільність», «густина», «удавана щільність», «відносна щільність», «пікнометрична щільність». У деяких випадках це ускладнює розуміння процесів, що описуються.

6. Інформація, подана в першому розділі, достатньо повно та всебічно висвітлює стан проблеми виробництва деталей з порошкових матеріалів для газотурбінних двигунів, ґрунтуючись на великій кількості публікацій, у тому числі у журналах, які входять до світових наукометричних баз. Але вважаю, що автору слід було приділити більшу увагу огляду особливостей методів

інтенсивної пластичної деформації та конструкцій оснащення для деформаційної обробки порошкових заготовок.

Наведені зауваження, втім, не впливають на загальну позитивну оцінку наукових та практичних результатів дисертаційної роботи.

На підставі вищенаведеного безумовно можна стверджувати, що дисертаційна робота Павленка Д.В. є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена важлива науково-технічна проблема підвищення якості заготовок з порошкових матеріалів на шляхом удосконалення процесів обробки інтенсивною пластичною деформацією.

Автореферат повною мірою відображає зміст та основні положення дисертації, а робота загалом за своїм обсягом, актуальністю, науковим рівнем, новизною, а також достовірністю і практичною цінністю отриманих результатів повністю відповідає всім вимогам “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р.; її зміст відповідає паспорту спеціальності 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском, а її автор – Павленко Дмитро Вікторович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за відповідною спеціальністю.

Офіційний опонент,

заступник д.т.н. НАН України

наукової д.т.н.

с.н.с.



Г.А. Баглюк