

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. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень показана можливість та ефективність технології гвинтової екструзії поруватих заготовок з порошків титанових сплавів для ущільнення матеріалу заготовки при помітно нижчих значеннях тиску, ніж у випадку методу одноосьового пресування. Встановлено, що ефективність процесу ГЕ як методу ущільнення некомпактних матеріалів обумовлена інтенсифікацією деформації зсувом під тиском. Обґрунтовано принципи вибору необхідного для ефективного ущільнення заготовки значення зусилля протитиску.

2. Вперше встановлено закономірності формування субмікрокристалічної структури заготовок, механічних та фізичних властивостей спечених титанових сплавів, та особливості еволюції порового простору заготовок при деформації методом гвинтової екструзії.

3. За результатами оцінки залежності запасу міцності лопаток від величини лінійного розміру пор для різних значень фрактальної розмірності порового простору спечених титанових сплавів, обумовлених параметрами якості застосовуваного порошку титану й легувальних елементів, а також режимів компактування й консолідації, встановлені граничні допустимі значення поруватості титанових сплавів, при яких забезпечується необхідний рівень надійності лопаток.

4. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено наявність в процесі гвинтової екструзії поруватих заготовок деформації у вигляді множинних самоподібних вихорів за механізмом «дискретний зсув + поворот», які викликають інтенсивне перемішування й масоперенос як на рівні, порівнянному з розміром перерізу заготовок, так і на рівні, порівнянному з розміром зерен. Показано, що такий інтенсивний масоперенос прискорює взаємну дифузію частинок порошкової суміші, сприяє протіканню механохімічного синтезу складнолегованих сплавів, призводить до усунення ліквідаційних неоднорідностей, хімічної й структурної гомогенізації

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 проектування.

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.

В той же час, необхідно відзначити і деякі **недоліки** рецензованої роботи, а саме:

1. Аналізуючи сучасний стан досліджень та технологій виробництва деталей з порошкових матеріалів на основі сплавів титану в першому розділі дисертації, автор не звернув увагу на один з найбільш перспективних сучасних напрямків розвитку порошкової металургії титану, що базується на використанні гідриду титану в якості основного компоненту вихідної порошкової шихти.

2. Оцінюючи технологічні можливості та перспективи використання для отримання високоякісних заготовок з порошку титану різних методів обробки тиском, дисертант робить висновок, що “... низька пластичність, розвиненість порового простору та висока активність спечених титанових заготовок ... не дозволяє застосовувати традиційні такі методи ОМТ як гаряче кування й штампування” (стр. 283). Даний висновок, однак, суперечить результатам широко відомих і широко цитованих в свій час публікацій та вкрай успішного практичного застосування технології гарячого штампування поруватих заготовок з порошків титану, виконаних в запорізькій науковій школі під керівництвом проф. В.А. Павлова, та результатам робіт останніх років науковців ІІМ НАН України.

3. Приводячі у другому розділі дисертації значення температурно-силових параметрів спікання та деформування порошкових заготовок, автор вказує, що “Спікання виконувалося у вакуумній печі ... в інтервалі температур ... 1220...1400 °С” (стр. 85), а для реалізації гвинтової екструзії “Заготовки попередньо нагрівали ... до температури від 400°С до 620°С в залежності від сплаву, що піддавали деформації” (стр. 93). При цьому “Матрицю нагрівали за допомогою

печі опору і у процесі деформації підтримували її температуру (яку???) на остійному рівні” (стр. 93). Однак, представляючи та аналізуючи в подальшому (в розділах 3 та 4) результати досліджень, дисертант в жодному випадку не конкретизує температуру спікання та гарячого деформування, що позбавляє можливості оцінити якість та достовірність наведених результатів. Крім того, на стр. 208 автор вказує, що деформацію при гвинтовій екструзії здійснювали при кімнатній температурі, що, вочевидь, не відповідає дійсності.

4. При проведенні експериментів з кручення під високим тиском в процесі експерименту застосовувалися величини тиску на рівні 5 ГПа (стр. 94). Однак, автор не наводить інформацію щодо конструкції оснащення та матеріалу, з якого виготовлений деформуючий інструмент (з урахуванням того, що така величина тиску суттєво перевищує значення границі плинності для переважної більшості інструментальних матеріалів, що застосовуються для виготовлення інструменту).

5. Для оцінки величини деформації зразка при його деформуванні крученням під високим тиском автор використовує залежність (2.6) (стр. 95):

$$\gamma = \frac{\ln(h_1)}{\ln(h_0)}$$

яка, однак, є помилковою. Логарифмічна деформація визначається як логарифм відношення величин h_1 та h_0 , а не відношення їх логарифмів.

6. За результатами досліджень впливу гвинтової екструзії на характеристики ударної в'язкості (табл.4.6), автор наводить дещо алогічні дані, згідно яких найвищою ударною в'язкістю відзначаються литі та спечені заготовки, а найменші значення відповідають деформованому матеріалу. Крім того, судячи з даних табл. 4.4, литі та деформовані заготовки після гвинтової екструзії характеризуються зменшенням густини (тобто - відбувається розпушування матеріалу). Однак, пояснення відмічених ефектів, яке приводить дисертант на стр. 223, на мій погляд, не виглядають досить переконливими.

7. На рис. 3.27 наведена залежність імовірності неруйнування лопаток компресора ГТД від пористості й запасу міцності. На жаль, автор не наводить методик, за якою визначали величину імовірності неруйнування лопаток. Крім того, величини імовірності неруйнування лопаток на рівні лише 0,7-0,85 навіть при нульовій поруватості матеріалу викликає питання щодо можливості та доцільності використання такого матеріалу у вузлах авіаційної техніки.

8. З урахуванням основних положень паспорту спеціальності, за якою захищається дисертаційна робота (05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском) в роботі, на мій погляд, вкрай мало уваги приділено питанням дослідження напружено-деформованого стану заготовок в процесі їх деформаційної обробки. Натомість, досить значну увагу автор приділив результатам дослідження процесів формування кристалографічної текстури (підрозділ 4.3.3 дисертації) та вивченню теплофізичних властивостей отриманих сплавів

титану в різних структурних станах (підрозділ 4.3.4), які вочевидь і мають самостійну наукову цінність, але не повною мірою відповідають паспорту спеціальності.

9. Загальним зауваженням, що відноситься як практичного до всього тексту дисертації загалом, так і до висновків по розділам зокрема, є, на мій погляд, вкрай висока багатослівність, яка часто не адекватна аналогічному рівню інформативності наведених матеріалів (що відображає наявність конкретних кількісних та якісних показників). Особливо відчутно це проявляється, зокрема, щодо підрозділів 3.3; 4.1; 4.2; 4.3 та розд. 5 дисертаційної роботи.

Наведені вище зауваження, втім, не впливають на загальну позитивну оцінку наукових та практичних результатів, отриманих в дисертаційній роботі.

На підставі вищенаведеного 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 відповідає пп. 9, 10 і 12 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. (з відповідними змінами й доповненнями); її зміст в цілому 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 директора ІІМ НАН України
з наукової роботи, д.т.н., проф.



Г.А. Баглюк