

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

ПАВЛЕНКО ДМИТРО ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.77:621.762:621.452.3

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ І УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ
ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНТЕНСИВНОЇ
ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Краматорськ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті "Запорізька політехніка" (м. Запоріжжя) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Овчинников Олександр Володимирович
Національний університет "Запорізька політехніка", завідувач кафедри обладнання та технології зварювального виробництва

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, ст. наук. співробітник
Баглик Геннадій Анатолійович, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України (м. Київ), заступник директора з наукової роботи

доктор технічних наук, професор
Марков Олег Євгенійович, Донбаська державна машинобудівна академія (м. Краматорськ), завідувач кафедри комп'ютеризованих дизайну і моделювання процесів і машин

доктор технічних наук, професор
Фролов Ярослав Вікторович, Національна металургійна академія України (м. Дніпро), завідувач кафедри обробки металів тиском ім. акад. А.П. Чекмарєва

Захист відбудеться «06» травня 2021 р. о 10-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус, ауд. 1319).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.

Автореферат розісланий «05» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 12.105.01



Ю.К. Добронос

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Технології заготівельного виробництва визначають вартість і якість заготовок, а, отже, і конкурентоспроможність кінцевої продукції. У зв'язку з тим розвиток процесів обробки металів тиском (ОМТ) для заготовок з порошкових матеріалів є одним з перспективних напрямів підвищення ефективності виробництва деталей газотурбінних двигунів (ГТД).

Особливо відчутна проблема зниження вартості і підвищення якості спостерігається для деталей з титанових сплавів, частка яких у сучасних ГТД може досягати 40...50%. Значна частка їх вартості пов'язана з існуючою технологією виробництва, в структурі витрат якої близько шістдесяти відсотків займають операції металургійного та деформаційного переділу. Будучи вкрай енерговитратними, ці процеси не тільки суттєво підвищують вартість деталей з титану, а й обмежують можливість отримання невеликих партій напівфабрикатів різних марок.

Відомою альтернативою металургійному переділу є технології порошкової металургії. Використання порошкових заготовок дозволяє знизити собівартість виробництва напівфабрикатів, однак не забезпечує рівня міцності, достатнього для виготовлення з них навантажених деталей ГТД. Це обмежує використання спечених заготовок. Застосування до них методів ОМТ, що широко використовуються для компактних сплавів, є проблемним завданням, яке потребує удосконалення процесів обробки тиском. Це пов'язано з головними недоліками заготовок з порошкових матеріалів – залишковою пористістю та ліквіаціями як легувальних елементів, так і газових домішок. Розв'язання важливої науково-прикладної проблеми підвищення якості заготовок з порошкових матеріалів обробкою тиском, дозволить усунути ці основні недоліки та розширити номенклатуру деталей ГТД з порошків.

Шляхи підвищення якості заготовок з порошкових матеріалів досліджувались провідними вітчизняними та закордонними вченими (Івасішин О.М., Скороход В.В., Баглюк Г.А., Валієв Р.З., Кіпарісов С.С., Terence G Langdon та іншими), але для складнолегованих титанових сплавів на сьогодні ця проблема в повній мірі не вирішена. Основними напрямками досліджень є удосконалення процесів порошкової металургії та застосування методів інтенсивної пластичної деформації (ІПД). Реалізуючи процеси усунення залишкової пористості, гомогенізації хімічного складу та формування субмікроструктурної (СМК) структури, що призводить до зміцнення, методи ІПД є перспективними для створення нових енергоефективних та екологічно дружніх технологій виробництва якісних заготовок з порошкових матеріалів.

Вирішення проблемних питань обробки тиском порошкових заготовок потребує проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень, удосконалення математичних моделей процесів обробки заготовок з порошкових матеріалів тиском та створення спеціального технологічного обладнання.

Зважаючи на викладене, можна стверджувати, що науково-технічна проблема підвищення якості заготовок з порошкових матеріалів методами ОМТ є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота відповідає основним напрямам Стратегії відродження вітчизняного авіабудування

на період до 2030 року, затвердженій 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.

Основні результати роботи отримані в рамках виконання проекту, фінансованого Міністерством освіти і науки України відповідно до рішення Ради національної безпеки та оборони України (лист від 30 січня 2015 р. №252/6-6-6-3), а також виконання держбюджетних тем, фінансованих МОН України: ДБ 03318 "Розробка та дослідження титанових сплавів у наноструктурованому стані для авіаційної техніки." (№ д/р 0108U000277, 2008-2009 рр.); ДБ 03310 "Розробка та дослідження технології виготовлення і ремонту деталей авіаційної техніки із наноструктурованих титанових сплавів" (№ д/р 0110U001144, 2010-2011 рр.); ДБ 01112 "Розробка та дослідження технології отримання і обробки титанових сплавів у наноструктурованому стані для авіаційної промисловості" (№ д/р 0112U002024, 2012-2013 рр.); ДБ 01115 "Розробка та дослідження ресурсозберігаючих технологій виготовлення відповідальних деталей авіаційних двигунів із титанових сплавів (№ д/р 0115U002239, 2015-2016 рр.). Низка результатів отримана при виконанні господарських договорів між НУ "Запорізька політехніка", АТ "Мотор Січ" і ДП "Івченко-Прогрес" та фінансованого академією наук України "Створення дослідної технології отримання багатофункціональних наноструктурних титанових сплавів" (№ д/р 0115U004261, 2017-2019 рр.).

Мета та завдання дослідження. Мета роботи – підвищення ефективності процесів виробництва та якості заготовок деталей газотурбінних двигунів з порошкових матеріалів шляхом розвитку наукових основ і удосконалення процесів отримання деформованих титанових напівфабрикатів із застосуванням інтенсивної пластичної деформації, а також удосконалення технологічного обладнання.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені такі актуальні **задачі**:

- аналіз проблем, суперечностей і тенденцій в області розвитку процесів порошкової металургії титану, способів ППД та технологічного обладнання для їх реалізації і визначення напрямів їх удосконалення;
- дослідження якості заготовок з порошкових матеріалів;
- оцінка гранично допустимого рівня залишкової пористості заготовок лопаток компресору ГТД та розміру пор, обґрунтування найбільш раціональної схеми технологічного процесу виробництва напівфабрикатів;
- визначення раціонального способу деформаційної обробки об'ємних спечених заготовок з титанових сплавів, дослідження якості титанових напівфабрикатів після ППД;
- дослідження латентної деформації заготовок під час гвинтової екструзії (ГЕ);
- встановлення закономірностей текстуро- та структуроутворення в напівфабрикатах після ГЕ;

- оцінка технологічної пластичності титанових сплавів з урахуванням особливостей їх структурного стану при різних видах обробки та здатності до деформаційного зміцнення;

- оцінка міцнісної надійності лопаток компресора газотурбінного двигуна, виготовлених з порошкових матеріалів із застосуванням ІПД;

- удосконалення процесів і технологічного оснащення для інтенсивної пластичної деформації спечених заготовок;

- визначення основних ефектів від впровадження процесу виготовлення напівфабрикатів з порошкових матеріалів для деталей ГТД із застосуванням ІПД.

Об'єкт дослідження. Процеси інтенсивної пластичної деформації титанових заготовок з порошкових матеріалів.

Предмет дослідження. Закономірності ущільнення, гомогенізації та структуроутворення під час інтенсивної пластичної деформації порошкових матеріалів та її вплив на властивості напівфабрикатів.

Методи дослідження. Вивчення хімічного складу спектральним аналізом; оптична та електронна мікроскопія з якісним і кількісним мікроаналізом фаз; рентгеноструктурний аналіз; експериментальні дослідження процесів ІПД; вивчення мікротвердості, пористості, механічних і фізичних властивостей; фізичне моделювання; метод скінченних елементів та математичної статистики, регресійний та кореляційний аналізи, метод експертних оцінок.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукову новизну дисертаційної роботи складають наступні її основні положення:

1. *Вперше* запропоновано та науково-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 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 менш ніж однієї третини 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.

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

- новий спосіб виготовлення напівфабрикатів титанових сплавів для деталей газотурбінних двигунів з порошкових матеріалів із застосуванням ПД, що дозволяє знизити витрати на виробництво і сприяє розширенню номенклатури виробів. Новизна способу пресування підтверджена патентом України;

- новий спосіб багатоетапного пресування спечених заготовок пластичним середовищем (фальш-заготовкою), що дозволяє отримувати безпористі напівфабрикати і формувати в них СМК структуру. Новизна способу пресування підтверджена патентом України;

- залежності запасу міцності та імовірності руйнування лопаток ГТД від будови порового простору, що дозволяють регламентувати рівень залишкової пористості заготовок;

- механічні та фізичні характеристики титанових сплавів з порошкових матеріалів після гвинтової екструзії, що дозволяють визначати запас міцності лопаток;

- конструкція штампа для пресування спечених заготовок з протитиском та технологічного оснащення для реалізації гвинтової екструзії, що дозволяють обробляти високоміцні титанові сплави в напівавтоматичному циклі;

- рекомендації щодо застосування технологій виготовлення напівфабрикатів титанових сплавів з порошкових матеріалів для лопаток ротора та статора компресорів малорозмірних ГТД на основі міцнісного аналізу, що дозволяють знизити витрати на їх виробництво.

Результати досліджень впроваджені та використовуються при проектуванні технологічних процесів виготовлення лопаток малорозмірних ГТД на АТ "Мотор Січ" (м. Запоріжжя) та ДП «Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя). Очікуваний економічний ефект від впровадження, підтверджений актом впровадження на АТ "Мотор Січ" і отриманий за рахунок зниження собівартості виробництва титанових напівфабрикатів, із розрахунку споживання на 1 т склав 4,918 млн. грн.

Окремі положення дисертації використовуються на кафедрі авіаційних двигунів НУ "Запорізька політехніка" в рамках викладання ряду спеціальних дисциплін, а також при виконанні науково-дослідних робіт, курсових та дипломних проектів студентами спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати автором отримані самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, автору належить розробка ідеології досліджень; постановка наукових задач; розробка

основних теоретичних положень; проведення теоретичних та експериментальних досліджень спечених сплавів та сплавів, підданих інтенсивній пластичній деформації різними способами; обґрунтування основних ефектів від деформації гвинтовою екструзією; визначення запасу міцності лопаток двигунів та основних ефектів від впровадження результатів роботи у виробництво; формулювання висновків роботи. Автор брав участь у плануванні та проведенні експериментальних досліджень, обробці та аналізі отриманих результатів, а також у впровадженні результатів роботи у виробництво. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора описаний додатково у коментарях до списку робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи, наукові та практичні результати доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК), всеукраїнських і регіональних науково-технічних (НТК) і науково-практичних конференціях (НПК), у тому числі: НТК молодих вчених і спеціалістів "Титан: виробництво і застосування" (м. Запоріжжя, 2008, 2010, 2012 рр.); МНТК "Інноваційні ресурсозбережні матеріали та зміцнювальні технології" (м. Маріуполь, 2012 р.); МНТК "Ті-2013 в СНГ" (м. Донецьк, 2013 р.); 10-а МНТК "Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів і енергетичних установок" (м. Запоріжжя, 2013 р.); МНТК "Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів" (м. Запоріжжя, 2014, 2019 рр.); МНТК "Теоретичні та прикладні проблеми створення авіаційних двигунів і енергетичних установок" (м. Запоріжжя, 2014 р.); 16-а МНТК "New technologies and achievement in metallurgy, material engineering and production engineering" (Польща, м. Ченстохова, 2015 р.); 27-а НПК "Людина і Космос" (м. Дніпро, 2015, 2020 рр.); 21-й Міжнародний конгрес двигунобудівників (м. Харків, 2016 р.); 4-а НПК "Титан-2016: виробництво і застосування в авіабудуванні" (м. Запоріжжя, 2016 р.); 9-а МНПК "Приборостроение-2016" (Білорусь, м. Мінськ, 2016); 9-а МНПК "Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти" (м. Київ, 2018 р.); 11-і Міжнародні молодіжні науково-технічні читання ім. О.Ф. Можайського (м. Запоріжжя, 2018, 2019 рр.); 19-а МНТК "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта" (м. Київ, 2018 р.); European congress and exhibition on advanced materials and processes (Німеччина, м. Дармштадт, 2018 р.); 9-th і 10-th EASN International Conference (Греція, м. Афіни, 2019 р.; Італія, м. Рим, 2020 р.), а також на розширеному засіданні кафедри ТАД НУ «Запорізька політехніка (м. Запоріжжя, 2020 р) та кафедри ОМТ ДДМА (м. Краматорськ, 2020 р.)

Публікації. Основні результати 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.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм роботи 373 сторінки, в тому числі 290 сторінок основного тексту, 110 рисунків та 40 таблиць, список використаних джерел з 294 найменувань та 2 додатка.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень та показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами. Сформульовано мету та задачі, що були вирішені, дані характеристики об'єкту та предмету, розглянуті методи теоретичного та експериментального досліджень. Показана наукова новизна, практична цінність, апробація та публікації отриманих результатів із зазначенням особистого внеску здобувача, а також загальна структура.

У **першому розділі** виконано аналіз сучасного стану досліджень технологій і обладнання процесів виробництва деталей з порошкових матеріалів для ГТД. На основі аналізу досліджень провідних вітчизняних і закордонних учених в області металургії титану та порошкової металургії (Баглюк Г.А., Штерн М.Б., Шаповалова О.М., Івасишин О.М.), процесів та обладнання для інтенсивної пластичної деформації (Бейгельзімер Я.Ю., Тарасов О.Ф., Валієв Р.З., Лаповок Р.) і технологій виробництва деталей ГТД (Богуслаєв В.О., Качан О.Я., Долматов А.І.) сформульовано науково-прикладну проблему та наукову гіпотезу для її розв'язання.

Встановлено значний дисбаланс між об'ємом виробництва титанової губки і деформованих напівфабрикатів складнолегованих титанових сплавів та їх споживанням в Україні, що забезпечує матеріальну основу для розвитку і використання методів порошкової металургії титану у промисловому виробництві. Показано, що проблема високої вартості виробів з титану пов'язана з вартістю металургійного та наступного деформаційного переділу (рис. 1).

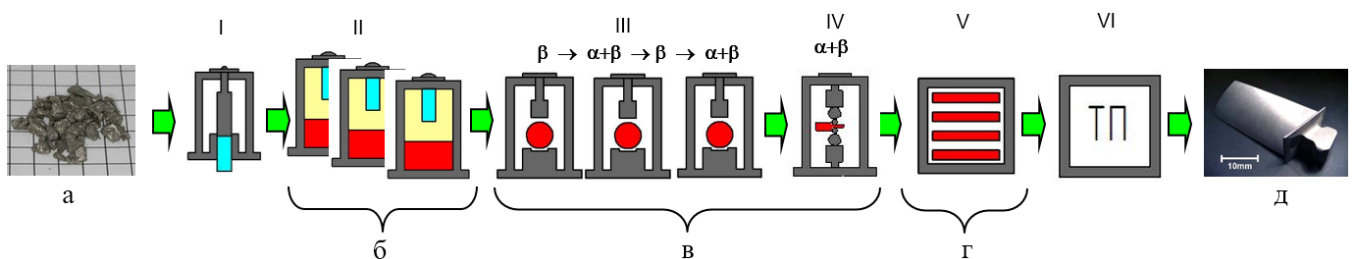


Рис. 1 – Структура технологічного циклу виготовлення лопаток компресорів ГТД, що базується на металургійному переділі: I – пресування електрода, II – вакуумно-дуговий переplав, III – деформаційна обробка, IV – прокатка, V – термічна обробка, VI – механічна обробка; а – губка титанова, б – литий стан, в – деформований стан, г – заготовка з рівнісною, бімодальною структурою, д – лопатка ГТД

Показано, що процеси порошкової металургії, будучи найбільш енергоефективними для отримання титанових напівфабрикатів, не забезпечують високий рівень їх міцнісних характеристик. Висунуто наукову гіпотезу про ефективність застосування процесів обробки тиском спечених заготовок методом інтенсивної пластичної деформації для розв'язання сформульованої науково-прикладної проблеми.

Обґрунтовано, що перевагами технології виготовлення заготовок деталей ГТД із застосуванням порошкових матеріалів і ППД є можливість швидкої зміни марки титанового сплаву при значному зниженні собівартості їх отримання, скорочення

виділення забруднюючих речовин і реалізації на підприємствах – виробниках газотурбінних двигунів.

Із застосуванням методу експертних оцінок встановлено, що застосування технології, основаної на процесах ПД спечених заготовок, дозволяє знизити ресурсовитратність виробництва титанових напівфабрикатів в 1,7 раза у порівнянні із технологією, основою на металургійному переділі титану.

Другий розділ присвячено опису використаних стандартних і оригінальних методик дослідження та моделювання.

Описано методики дослідження структури, хімічного складу, пористості, міцності, твердості та текстури зразків після деформації, а також розроблені оригінальні методики випробувань на багатоциклову втому, визначення теплофізичних характеристик титанових сплавів у різних станах. Наведені методики виготовлення зразків з порошкових матеріалів, термічної обробки, а також обробки тиском: гаряче ізостатичне пресування (ГІП), гідроекструзія, гвинтова екструзія і кручення під високим тиском (КВТ).

Описано методики моделювання та застосовані програмні продукти для статистичної обробки результатів експериментів, їх планування, розв'язання диференціальних рівнянь, обробки зображень і кількісного аналізу мікрофотографій, газодинамічного та міцнісного аналізу.

Сформульовано основні принципи організації досліджень з розвитку основ та удосконалення процесів виготовлення деталей з порошкових матеріалів для газотурбінних двигунів із застосуванням ПД. Зроблено висновок про те, що використаний стандартний комплекс матеріального та методологічного забезпечення, у комбінації з розробленим технологічним оснащенням і оригінальними методиками дослідження кристалографічної текстури, границі витривалості, здатності до зміцнення, є необхідним і достатнім для підтвердження висунутої наукової гіпотези та вирішення зазначеної науково-прикладної проблеми.

Третій розділ присвячено розвитку наукових основ виробництва титанових сплавів з порошкових матеріалів. Будучи основою для подальшої обробки тиском, спечені заготовки визначають хімічний та фазовий склад отримуваних після ПД напівфабрикатів та їх якість.

Досліджені сплави ВТ1-0, 2М2А, ВТ3-1, ВТ6 і ВТ8 – це найбільш характерні представники однофазних, псевдодвофазних і двофазних титанових сплавів, які застосовуються у ГТД. Сплав типу ВТ3-1 отримано з використанням комплексних лігатур, сплави типу 2М2А, ВТ6 та ВТ8 отримано із використанням порошків окремих легувальних металів.

Досліджено параметри різних партій порошків титану марки ПТ5, отримуваних з відсіву титанової губки, як основи порошкових сумішей складнолегованих сплавів. Відмінності в морфології частинок і особливостях будови їх поверхні не призводять до статистично значимих відмінностей у властивостях спечених з них зразків. Результати досліджень вказують на стабільність якості порошків незалежно від партії та часу зберігання.

Встановлено основні закономірності пороутворення залежно від режимних параметрів операцій однобічного холодного пресування та вакуумного спікання. Для пресовок діаметром 40 мм і висотою 70 мм мінімальне значення пористості,

після однобічного пресування при тиску 700 МПа та спікання при температурі 1250 °С протягом 2,5 год, спостерігалось в центральній верхній частині та становило 4,5 %, максимальне значення – в нижній частині, у периферійній зоні. Середнє значення пористості становило 7...9 %, що свідчить про наявність переважно закритих пор. Встановлено закономірності зміни пористості та розмірів пресовок після спікання. При тиску пресування більше 620...640 МПа подальше вакуумне спікання призводить до збільшення їх лінійних розмірів. Пресування при більш низькому тиску сприяє формуванню відкритої пористості, що забезпечує підвищення щільності при усадці. Раціональним рівнем тиску пресування порошкової суміші, з урахуванням пружної деформації, є 700 МПа.

Незалежно від розмірів частинок основи порошкової суміші (у діапазоні від 40 до 400 мкм) хімічний і фазовий склад сплаву, синтезованого із порошків окремих металів, відповідав хімічному складу сплаву ВТ8 згідно ОСТ 190013–81 (рис. 2). При цьому характеристики міцності, пластичності та твердості дослідного сплаву типу ВТ8 не задовольняли вимоги ОСТ 90002-70 і ОСТ 90006-70 для прутків і заготовок лопаток ГТД. Установлено наявність оксидів титану та лікваций легувальних елементів, що збільшують крихкість сплаву.

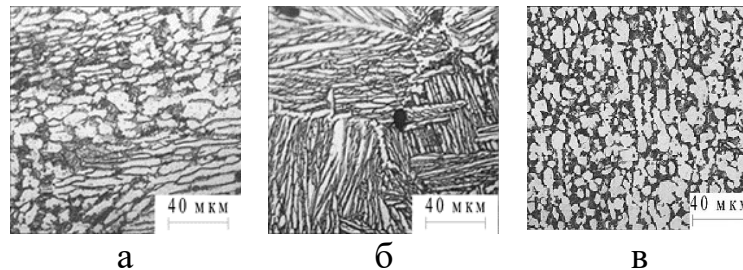


Рис. 2 – Структура деформованого прутка зі сплаву ВТ8 (а), дослідного сплаву типу ВТ8 (б) і серійної лопатки компресора зі сплаву ВТ8 (в)

Враховуючи великий вплив газових домішок на якість титанових сплавів, а також те, що технологія ІПД спечених заготовок не передбачає операцій, що приводять до їх видалення та рафінування сплаву, виконано аналіз концентрації газових домішок в напівфабрикаті.

Розглянуто основні джерела та виконано кількісний аналіз забруднення сплаву азотом і киснем з домішок, що містяться в частинках порошку та на їх поверхні, а також у порах спеченої заготовки в процесі їх заліковування. Встановлено, що сумарна гранична концентрація кисню в спеченому сплаві не перевищує 0,1% і 0,14%, азоту – 0,017% і 0,02% залежно від способу отримання порошків титану – з відсіву титану губчастого чи шляхом гідрування–дегідрування. Показано, що основну роль у забрудненні сплавів відіграє якість порошку титану. Застосування порошків титану з малим вмістом домішок забезпечує вміст кисню та азоту в синтезованих напівфабрикатах на рівні, що задовольняє вимоги до титану марки ВТ1-0 і складнолегованих сплавів.

Встановлено закономірності впливу параметрів порового простору на границю витривалості та запас міцності лопаток компресора. Оцінку границі витривалості лопаток запропоновано виконувати з урахуванням особливостей морфології

порового простору, використовуючи удосконалену модель, яка враховує розмір пор і фрактальну розмірність їх границь, що відображає особливості їх будови. На основі підходів механіки руйнування запропоновано удосконалену модель оцінки запасу міцності лопаток зі спечених сплавів (1) з урахуванням властивостей твердої фази, розміру та морфології пор, а також загальної пористості та фрактальної розмірності границь пор:

$$n(d, \theta, F_D) = \frac{\Delta K_{th\,eff} \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m^c}{\sigma_s^c}\right)}{Y \cdot K_\sigma \cdot \sigma_a^c (1 - \theta) \cdot F_D \cdot \sqrt{d}}, \quad (1)$$

де d – середній розмір пор, мкм; θ – пористість, %; F_D – фрактальний розмір.

На підставі встановлених закономірностей визначено гранично допустимі значення розміру пор і загальної пористості заготовок лопаток, що забезпечують запас міцності та імовірність неруйнування лопаток, які задовольняють вимоги нормативної документації.

Так, для лопаток першого ступеня компресора ГТД гранично допустимий розмір сферичних пор на поверхні пера при штатному режимі роботи компресора становить 15...16 мкм і 5...6 мкм для пор з розгалуженими границями. При надзвичайному режимі роботи компресора, що супроводжується збільшенням амплітуди змінних напружень у лопатках, допустимий запас міцності забезпечується при наявності сферичних пор, розмір яких не перевищує 3...3,5 мкм, і несферичних пор величиною до 1 мкм. При цьому ймовірність неруйнування лопаток на рівні 0,9 при запасі міцності 1,8 забезпечується за пористості сплаву не більше 2,5%. Таким чином, враховуючи, що середня пористість спечених заготовок складає 8...9%, технологія виготовлення лопаток компресора ГТД із порошкових матеріалів повинна передбачати процеси, спрямовані на повне усунення пор.

Четвертий розділ присвячено розвитку наукових основ і удосконалення процесів обробки спечених титанових сплавів тиском.

Досліджено основні ефекти, що відбуваються при ПД спечених заготовок: ущільнення, гомогенізацію, фрагментацію структурних складових, зміцнення. Досліджено процеси структуро- та текстуроутворення, зміни теплофізичних та механічних властивостей, технологічної пластичності та здатності до зміцнення, на підставі чого визначено раціональні режими обробки.

На підставі аналізу умов деформаційної обробки спечених сплавів та класифікації методів підвищення щільності та пластичності спечених заготовок обґрунтовано застосування методів високоенергетичного впливу з високим рівнем гідростатичного компонента в осередку деформації. Експериментально досліджено ущільнення спечених заготовок ГП та гідроекструзією. Встановлено, що для спечених заготовок з досліджених порошків титану ГП призводить до ущільнення тонкого поверхневого шару та не дозволяє усувати пори в серцевині зразка (рис. 3).

Гідроекструзія в діапазоні коефіцієнтів витяжки (1,5...2,5), що забезпечує збереження цілісності спечених заготовок, не приводить до повного усунення пористості (рис. 4).

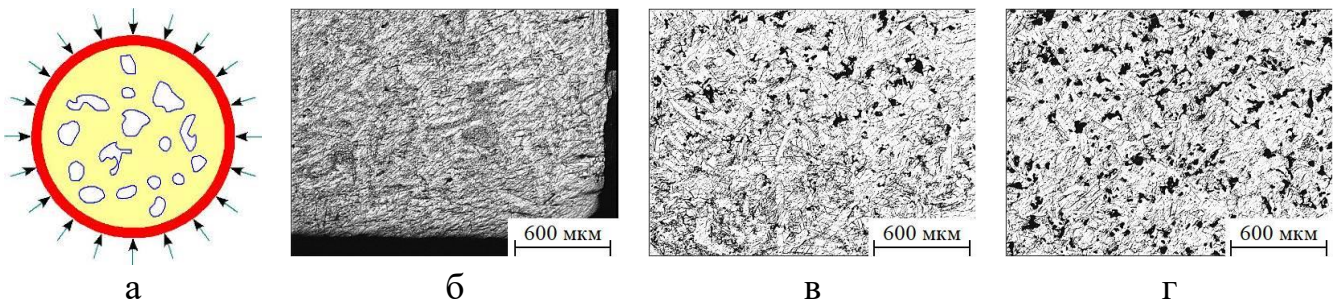


Рис. 3 – Схема деформації спеченої заготовки ГП (а) та мікроструктури поверхневого шару (а), перехідної зони (б) та центральної частини (в)

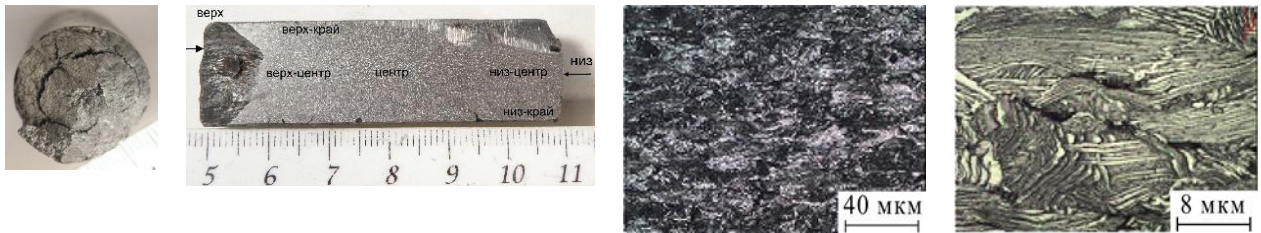


Рис. 4 – Структура спечених заготовок після гідроекструзії

Внаслідок КВТ, при якому реалізується деформація простим зсувом, відбувалися процеси, що сприяли досягненню основних цілей застосування деформаційної обробки спечених заготовок: усунення пористості, гомогенізація легувальних елементів та формування субмікросталічної структури. Незважаючи на те, що КВТ не може забезпечувати обробку об'ємних заготовок для ГТД, у першому наближенні такий спосіб ПД є подібним до деформації циклічним простим зсувом при ГЕ (рис. 5). Можна стверджувати, що ефекти від застосування цих способів ПД є подібними. Після КВТ спостерігалось ефективно усунення пористості за всім перерізом зразків незалежно від її початкового рівня (рис. 6).

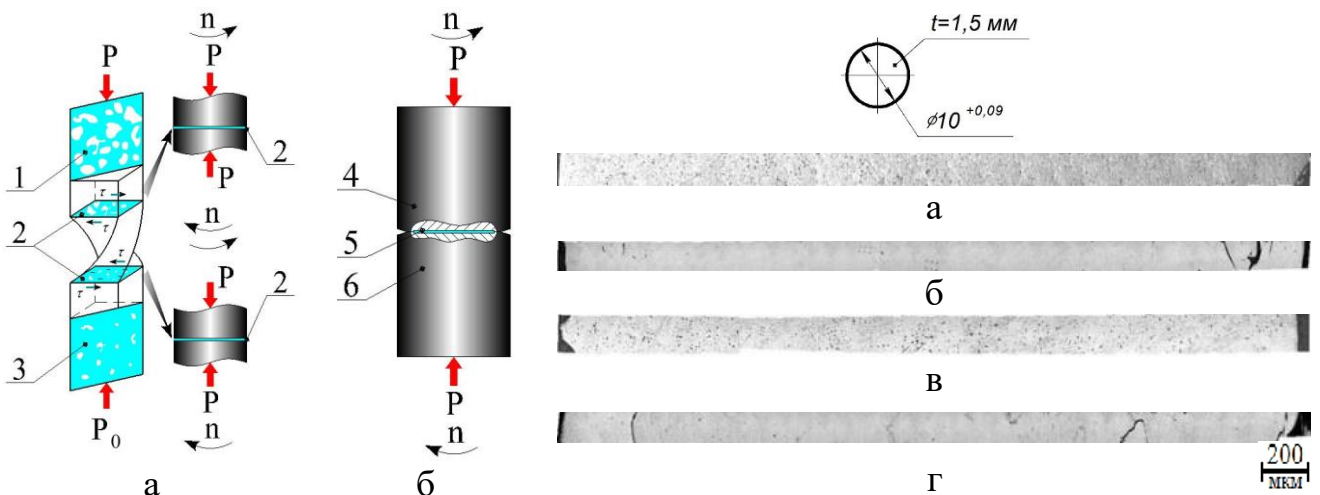


Рис. 5 – Схеми деформації при ГЕ (а) і КВТ (б): 1 – вихідний зразок; 2 – площини зсуву; 3 – зразок після ГЕ; 4 – верхня ковадла, 5 – зразок; 6 – нижня ковадла

Рис. 6 – Макроструктура поперечного перерізу зразків зі сплаву ВТ6 у різних станах після спікання: а – 0,5 год; б – 0,5 год + КВТ; в – 4 год; г – 4 год + КВТ

Встановлено закономірності зміни мікротвердості і її розсіювання за перерізом зразків залежно від часу спікання та режимів наступного КВТ. Показано, що незалежно від режимів спікання мікротвердість зразків після деформації вирівнюється за перерізом та не залежить від режимів обробки, що свідчить про ефект «насичення» фрагментації та зміцнення (рис. 7).

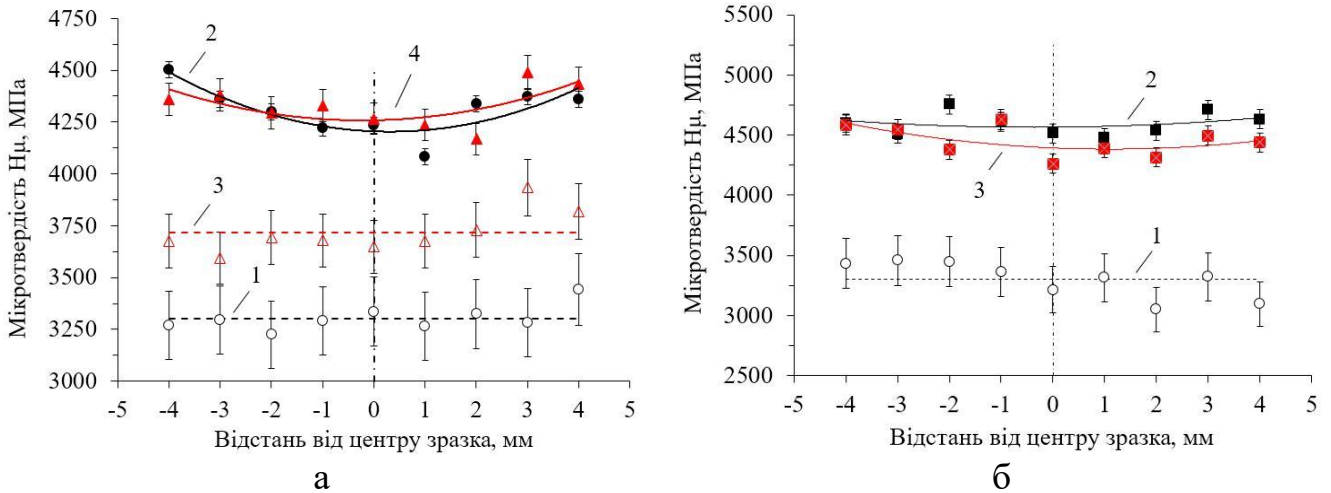


Рис. 7 – Розподіл мікротвердості за радіусом зразків від часу спікання для VT6 (а): 1 – 0,5 год; 2 – 4 год; 3 – 0,5 год + КВТ; 4 – 4 год + КВТ та VT8 (б): 1 – 2,5 год; 2 – 2,5 год + КВТ (5 ГПа, 5 об, 1 об/хв); 3 – 2,5 год +КВТ (5 ГПа, 10 об, 5 об/хв)

Незалежно від режиму деформації мікротвердість зразків зі сплаву VT8 збільшувалася від 3300 МПа до 4500...4700 МПа. Поряд з ефективним деформаційним зміцненням спостерігалось зниження розсіювання мікротвердості за перерізом зразка, що свідчить про гомогенізацію. На основі рентгенофазового аналізу встановлено, що в зразках зі сплавів VT6 і VT8 у процесі КВТ не відбувалось утворення нових фаз (фаз «високого» тиску). Це забезпечує відповідність фазового складу сплавів нормативним вимогам.

Ефективна гомогенізація легувальних елементів при КВТ експериментально підтверджена для спечених сплавів VT6 і VT8 при деформації з різними режимами (рис. 8). Відбувався перерозподіл основних легувальних елементів по границях структурних складових, що підтверджується їх більш рівномірною концентрацією. Після КВТ спостерігалось значне подрібнення пластинчастої структури на периферії зразків при різкому зниженні пористості. Відбувався більш однорідний розподіл легувальних елементів внаслідок підвищення дисперсності α - і β -фаз. Аналогічні результати були отримані для зразків з часом спікання в діапазоні 0,5...4 год.

Підтвердження ефекту масопереносу у площині деформації отримано також шляхом введення до складу порошкової суміші порошку ніобію, який повільно дифундує та не встигає гомогенізуватися протягом 4 год спікання (рис. 9, а, б). Відсутність локальних концентрацій легувальних елементів, включно зі штучно введеним ніобієм, у зразках після КВТ свідчить про ефективну гомогенізацію в процесі ПД (рис. 9, в).

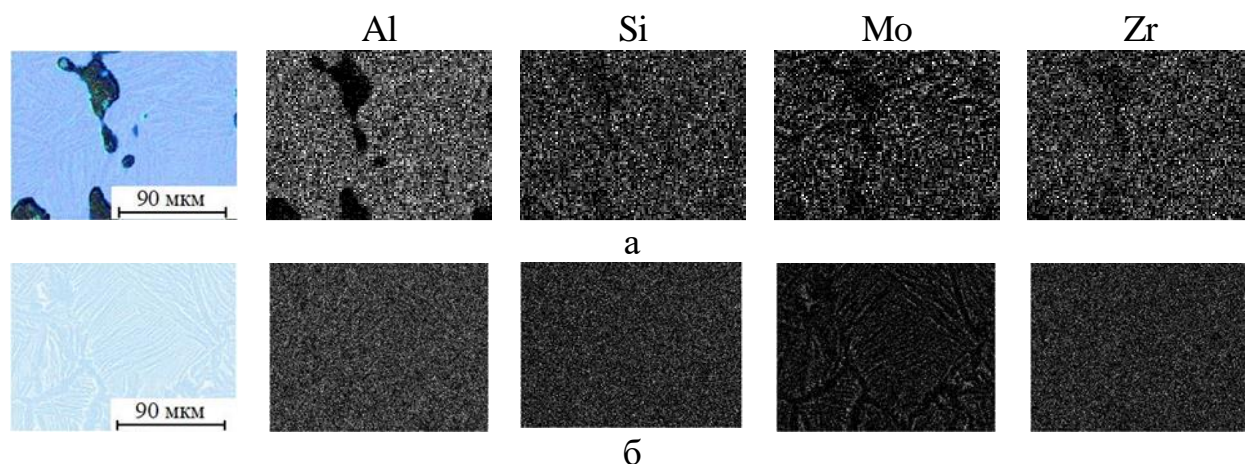


Рис. 8 – Карти розподілу легувальних елементів у зразках зі сплаву ВТ8 після спікання (а) та КВТ (б) (5 ГПа, 10 об, 5 об/хв)

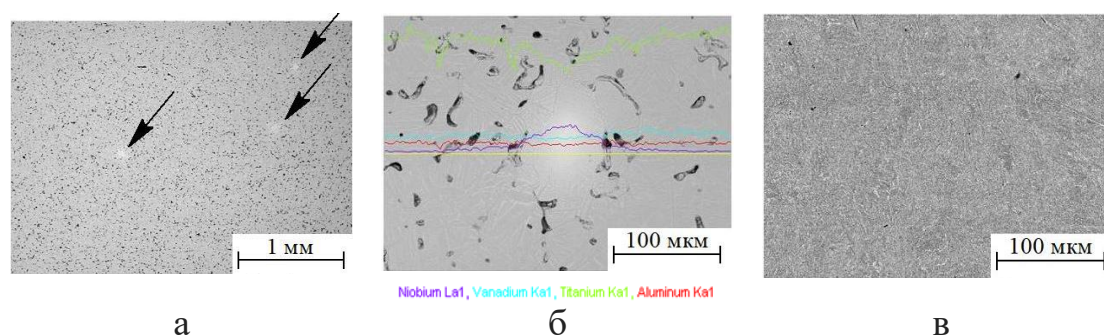


Рис. 9 – Мікроструктура (а) і концентрації (б) хімічних елементів у зразках зі сплаву ВТ6 після спікання впродовж 4 год та КВТ (в)

Таким чином, можна стверджувати, що ПД є ефективним методом усунення структурних і хімічних неоднорідностей у спечених з порошкового матеріалу титанових заготовках.

Для вибору найбільш раціональної схеми технології виробництва деталей з порошкових матеріалів розглянуто альтернативні варіанти отримання деформованих напівфабрикатів із застосуванням ГЕ. Виходячи з аналізу суперечливих умов, необхідних для реалізації мети застосування операції ПД спечених заготовок (табл. 1), проаналізовано чотири альтернативні схеми (рис. 10).

Кількісна оцінка витрат на реалізацію кожної з розглянутих схем ТП за критеріями витрат енергетичних ресурсів, трудомісткості виконання операції, витрат на оснащення з урахуванням зношування та витрат на обладнання показала, що найбільш ефективними є схеми без попереднього пресування та спікання та з однократною операцією ПД (рис. 10, в). Однак, з урахуванням особливостей серійного типу виробництва деталей ГТД та активністю титанових сплавів при нагріванні встановлено, що найбільш перспективною схемою є схема з однократною ПД (рис. 10, а). У цьому випадку режими ПД є компромісними з точки зору умов реалізації ПД спечених заготовок.

Таблиця 1 – Умови реалізації ПД спечених заготовок

Призначення	Режимні параметри ПД		
	Температура	Час	Деформація
Закриття пор	$>0,6 T_{пл}$	max	optimal
Заварювання пор	$>0,6 T_{пл}$	max	optimal
Гомогенізація	$>0,6 T_{пл}$	max	max
Подрібнення структурних елементів	$<(0,3...0,4) T_{пл}$	min	max

Примітка: max – максимальне; min – мінімальне; optimal – раціональне значення

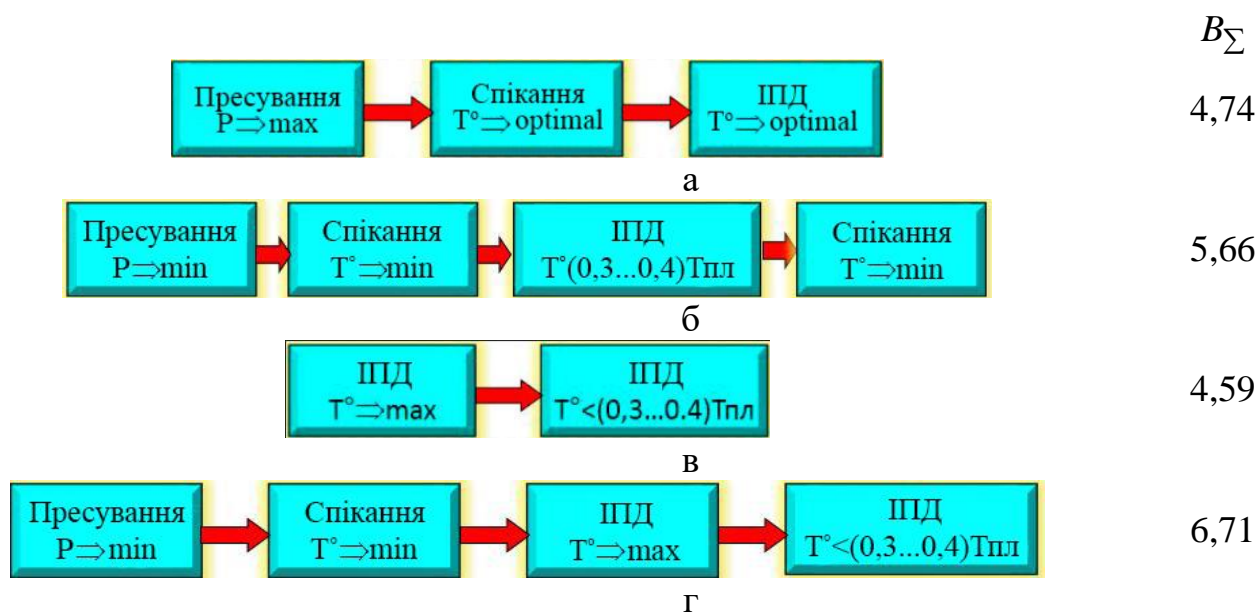


Рис. 10 – Альтернативні схеми отримання титанових напівфабрикатів: а – однократна, з оптимальними параметрами; б – з подвійним спіканням; в – ПД пресовок (без спікання); г – із дворазовою операцією ПД; B_{Σ} – відносні витрати

Дослідження еволюції порового простору в спечених заготовках під впливом ПД гвинтовою екструзією показало, що даний спiсб є ефективним для ущiльнення об'ємних спечених заготовок (рис. 11). Особливість ГЕ, пов'язана з деформацією простим зсувом без формозміни заготовки при високому рівні гідростатичного тиску в осередку деформації, визначає можливість реалізації послідовного ряду циклів обробки без руйнування.

На підставі дослідження механічних характеристик зразків, підданих різним способам ПД, обґрунтовано застосування ГЕ як найбільш ефективного способу з погляду характеристик отримання об'ємних компактних напівфабрикатів (табл. 2).

Таблиця 2 – Властивості зразків з титану марки ВТ1-0 у різних станах

Стан зразків	σ_{θ} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСТ, кДж/м ²
спечений	325	285	6	3	1078
спечений + ГП	375	289	9,4	7,4	1130
спечений + ГЕ	690	635	15	19	882

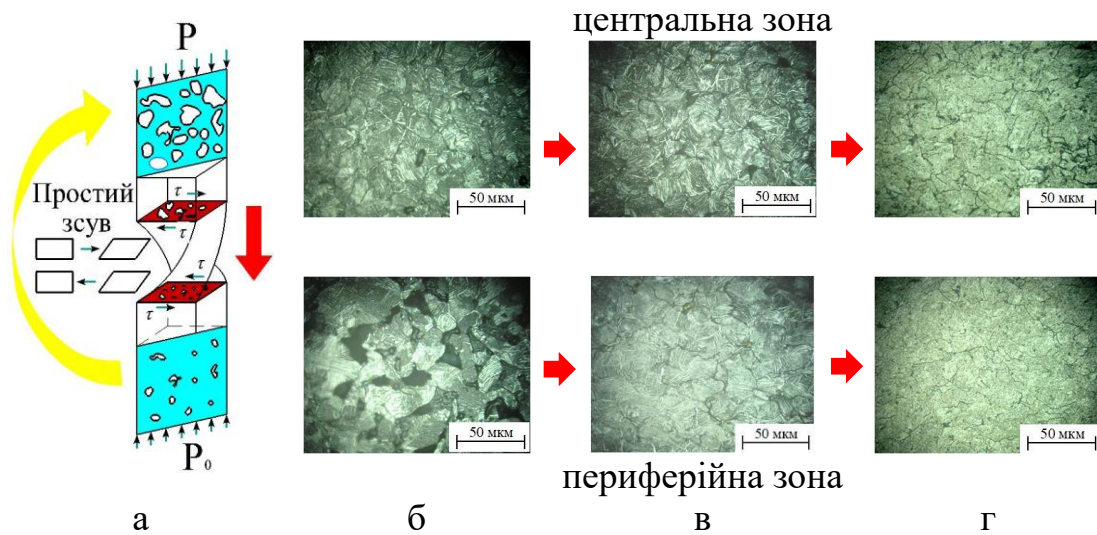


Рис. 11 – Схема ущільнення спечених заготовок ГЕ (а) і структура спечених зразків у різних зонах після одного (б), двох (в) і трьох (г) циклів: P – тиск; P_0 – протитиск

Шляхом реалізованих оціночних та експериментальних досліджень, спрямованих на порівняння силових характеристик процесів пресування, виконано порівняльну оцінку впливу способу отримання титанових пресовок при пресуванні у жорсткій матриці та ГЕ на щільність, досягнуту при однакових осьових напруженнях. Для оцінки використано модель пластичності порошкового матеріалу з поверхнею навантаження у вигляді еліпсоїда, симетричного до початку координат у просторі напружень. Функції пористості вибиралися так, щоб забезпечити граничний перехід до умови плинності Мізеса для компактного матеріалу.

Було встановлено, що для отримання малих значень пористості (менш ніж 2%) в процесі одновісного пресування для титанових сплавів потрібен рівень гідростатичного тиску не менш ніж 10^4 МПа, досягнення якого в умовах серійного виробництва є нераціональним.

Аналіз ущільнення порошкових матеріалів ГЕ виконано виходячи з того, що в першому наближенні його можна розглядати як простий циклічний зсув під тиском. Застосована модель, основана на рівнянні пористості, є адекватною для випадку малої пористості матеріалу. Вона містить коефіцієнт внутрішнього тертя, що враховує несумісність пластичної деформації структурних елементів пористого тіла (розпушення матеріалу):

$$\frac{d\theta}{d\gamma} = -\frac{3}{2}\theta\frac{p}{k} + \alpha, \quad (2)$$

де θ – пористість; γ – щільність; p – гідростатичний тиск; k – границя плинності матеріалу на зсув; α – коефіцієнт внутрішнього тертя.

Це дозволило моделювати не тільки ущільнення, але і руйнування матеріалу. Встановлено, що для ущільнення порошкового матеріалу до рівня граничної пористості необхідним є виконання нерівності:

$$\frac{p}{k} > \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\theta_s}, \quad (3)$$

де θ_s – гранична пористість.

На підставі рішення диференціального рівняння для пористості, за початкових умов, що відповідають компактному матеріалу, встановлено, що для досягнення однієї і тієї ж залишкової пористості титанових пресовок з порошкових матеріалів при ГЕ необхідно прикласти набагато менший тиск, ніж при одновісному пресуванні. Чисельні оцінки для порошкового титану дали наступний результат: при залишковій пористості 5% тиск, необхідний для усунення пористості шляхом ГЕ, в 20 раз менший за тиск одновісного пресування. Це свідчить про більшу ефективність ущільнення ГЕ у порівнянні з одновісним пресуванням за рахунок інтенсифікації деформації зсувом при високому рівні гідростатичного тиску.

Експериментальні дослідження підтвердили теоретичні висновки. Встановлено (рис. 12), що при одному рівні тиску щільність зразків після ГЕ була на 10...12% більша, ніж після одновісного пресування, що добре узгоджується з результатами теоретичного аналізу.

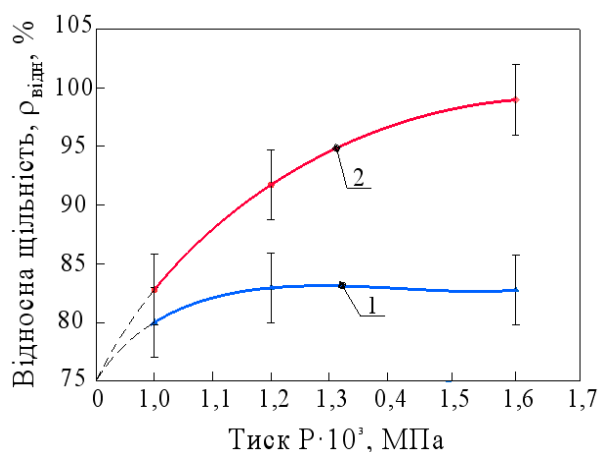


Рис. 12 – Залежність відносної щільності порошкових заготовок від тиску: 1 – одновісне пресування, 2 – гвинтова екструзія

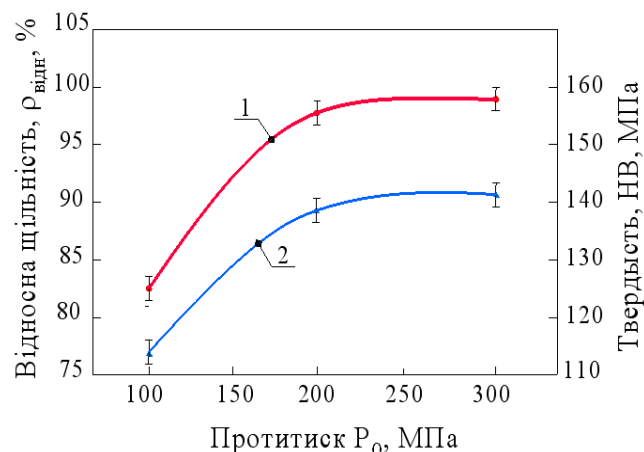


Рис. 13 – Залежність відносної щільності та твердості порошкових заготовок від протитиску при ГЕ: 1 – відносна щільність, 2 – твердість

При протитиску менш ніж 100 МПа (рис. 13) зразки порошкового титану руйнувалися на першому циклі деформації ГЕ, тоді як при більш високих значеннях протитиску твердість пресовок монотонно зростала до 140 НВ, практично виходячи на цей рівень при протитиску 200 МПа. Значення твердості, що була досягнута, близьке до твердості технічно чистого титану (160 НВ). Остання обставина вказує на те, що при деформації ГЕ відбувається не тільки ущільнення порошкових заготовок, але і утворення міцних зв'язків між частинками порошку та структурними дефектами. При протитиску 200 МПа на рівень насичення виходила не тільки твердість, але і щільність, а тому його подальше збільшення є нераціональним.

Таким чином, ущільнення спечених заготовок без їх руйнування способом ГЕ можливе при величині протитиску не менше третини від тиску пресування. Ці

результати було також підтверджено моделюванням впливу протитиску на розподіл пористості в об'ємі зразка при різному ступені пошкодження матеріалу методом скінченних елементів.

Для визначення ефективності ущільнення та підвищення комплексу властивостей зразків після ГЕ експериментально вивчено її вплив на структуру, фізичні та механічні властивості титанових напівфабрикатів у литому та деформованому (після деформаційної обробки вилівка) станах, а також спечених заготовок. Шляхом порівняння вихідних значень властивостей з аналогічними значеннями після ГЕ встановлено, що ГЕ сприяє суттєвому підвищенню границі міцності, умовної границі плинності, відносного видовження та звуження, твердості та удаваної щільності для зразків у всіх досліджених станах (рис. 14).

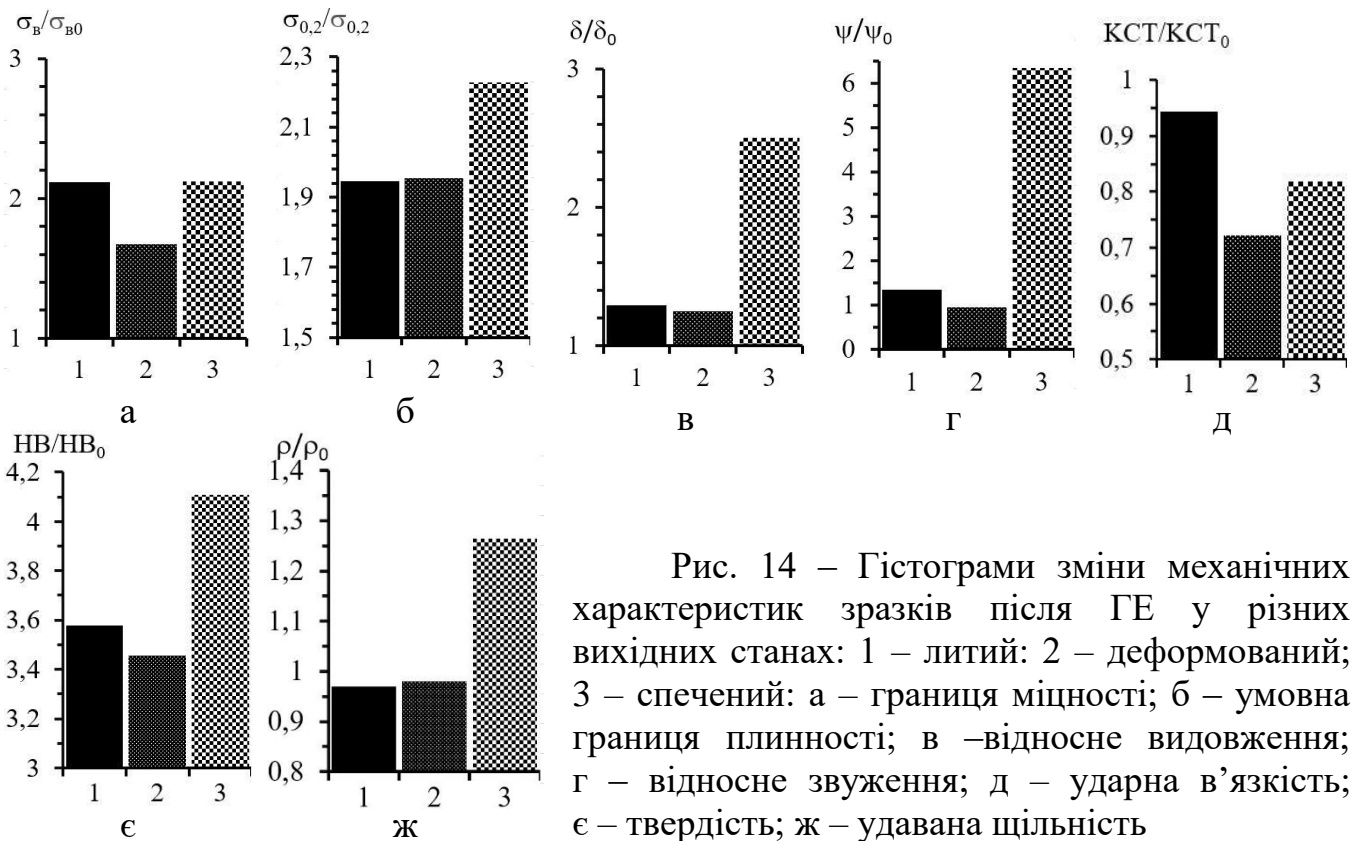


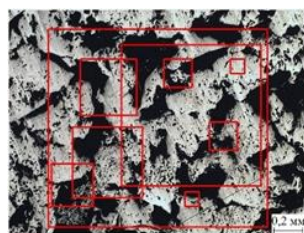
Рис. 14 – Гістограми зміни механічних характеристик зразків після ГЕ у різних вихідних станах: 1 – литий; 2 – деформований; 3 – спечений: а – границя міцності; б – умовна границя плинності; в – відносне видовження; г – відносне звуження; д – ударна в'язкість; е – твердість; ж – удавана щільність

Основною причиною підвищення міцності і пластичності є формування СМК структури та гомогенізація, а для спечених зразків також усунення пористості та дефектів структури. Зниження рівня ударної в'язкості характерно для сплавів з СМК структурою та пов'язане з розповсюдженням руйнування по границях зерен. Максимальний ефект від застосування обробки ГЕ спостерігається для спечених сплавів. Рівень їх властивостей наближався до рівня сплаву в вихідному деформованому стані, що формувалася за технологією металургійного та деформаційного переділу.

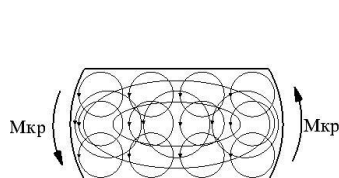
Структура титану після ГЕ практично не залежала від вихідного стану. Після 5-ти циклів деформації ГЕ в зразках формувалась структура з розміром зерен близько 200...250 нм і субзерен близько 30...40 нм.

З використанням модифікованої, для умов деформації спечених заготовок, теорії утворення латентних вихорів при ГЕ теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено гомогенізацію спечених сплавів під час ГЕ.

Аналіз причин і основних наслідків латентної деформації при ГЕ показав, що розвинений поровий простір у спечених заготовках приводить до виникнення самоподібних вихорів (рис. 15) на різних масштабних рівнях за рахунок виникнення так званого stick-slip ефекту, викликаного різницею моментів на границях самоподібних областей (рис. 16).

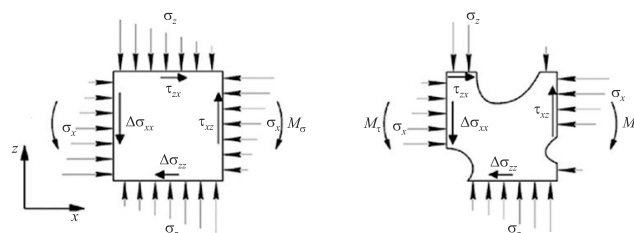


а



б

Рис. 15 – Мікрооб'єми, що обертаються, в некомпактному матеріалі (а) і в поперечному перерізі некомпактних зразків при ГЕ (б)



а

б

Рис. 16 – Модель виникнення силових моментів при простому зсуві в компактному (а) і некомпактному (б) матеріалах

Обґрунтовано належність множинних вихорів до фрактальних структур, наслідком чого є процеси перемішування та масопереносу, що виникають при взаємодії вихорів на різних масштабних рівнях (рис. 17). Експериментальне підтвердження гомогенізації при ГЕ отримано шляхом аналізу полів розподілу основних легувальних елементів у спеченій заготовці (рис. 18).

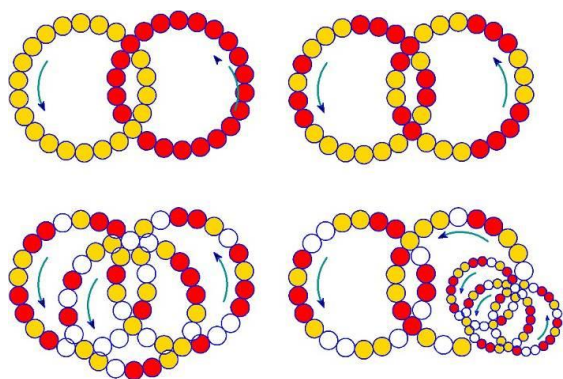
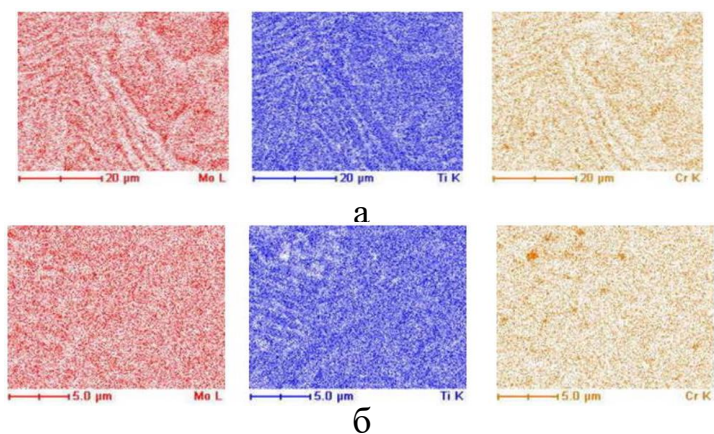


Рис. 17 – Модель масопереносу та перемішування у спечених заготовках при гвинтовій екструзії



а

б

Рис. 18 – Розподіл легувальних елементів у структурних складових зразків зі сплаву ВТЗ-1 у вихідному стані (а) і після гвинтової екструзії (б)

Для спечених сплавів ефект гомогенізації на макрорівні при циклічному простому зсуві під час ГЕ обґрунтовано наявністю явищ витягування, утворенням складок матеріалу та розпадом потоків (рис. 19). Одночасно з утворенням вихрових рухів це сприяє ефективній гомогенізації як на мікро-, так і на макрорівні.

Розглядаючи деяку область усередині поперечного перерізу зразка, порівняну з розміром зерна або частинкою порошку (рис. 19, а), можна бачити, що при розвороті перерізу у каналі матриці під час ГЕ напруження значно перевищують границю плинності матеріалу. Розглянута область, міцно пов'язана з оточуючими її областями, пластично деформується та витягується в напрямку ліній течії (рис. 19, б).

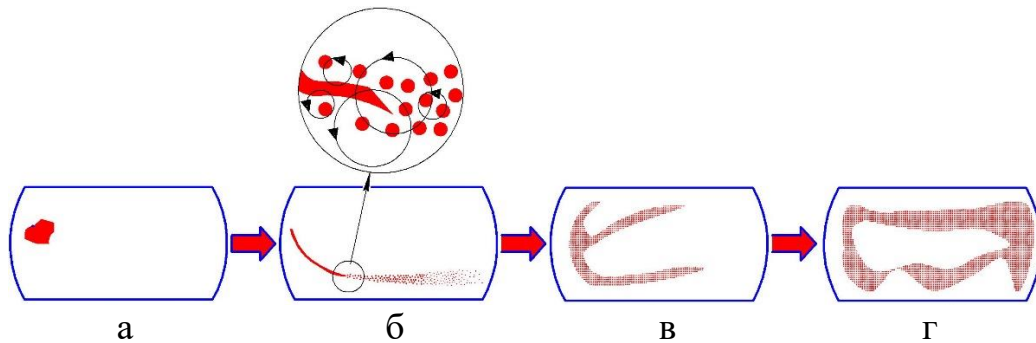


Рис. 19 – Траєкторія руху матеріальних точок у поперечному перерізі спеченої заготовки під час ГЕ: а – матеріальна точка; б – витягування; в – утворення складок; г – гомогенізація

Виникаючі вихрові явища приводять до “розпаду” потоку і до його диспергування на окремі фрагменти. Розворот перерізу зразка в протилежному напрямку, характерний для ПД способом ГЕ, приводить до відомого явища утворення складок матеріалу. Основною причиною їх утворення є розбіжність траєкторій руху окремих матеріальних точок у поперечному перерізі при його закручуванні та наступному розкручуванні, що викликано наявністю сил внутрішнього тертя. Багаторазові цикли деформації сприяють переносу частинок розглянутої області в межах поперечного перерізу зразка, а також її диспергуванню. Враховуючи фрактальну природу вихорів, які виникають під час ГЕ, можна стверджувати, що аналогічний механізм гомогенізації реалізується не тільки на макро-, але і на мікрорівні (що можна порівняти з розміром частинок порошку).

Важливим наслідком виникнення в процесі ГЕ мультимасштабних вихрових явищ є відмінності в схемі зміцнення компактних і некомпактних матеріалів. На першій стадії деформації компактних матеріалів (рис. 20, а) реалізується механізм деформаційного зміцнення за схемою, аналогічною чистому зсуву. Щільність дефектів кристалічної ґратки матеріалу збільшується, що приводить до формування розорієнтованих субзерен і нових зерен з висококутовими границями. Крива залежності зміцнення некомпактних матеріалів при ГЕ відрізняється появою стадії ущільнення й акомодатії Г' (рис. 20, б). На початковій стадії деформування під дією дотичних напружень і мультимасштабних вихорів відбувається деформація простим зсувом, що супроводжується ефективним масопереносом, перемішуванням і ущільненням.

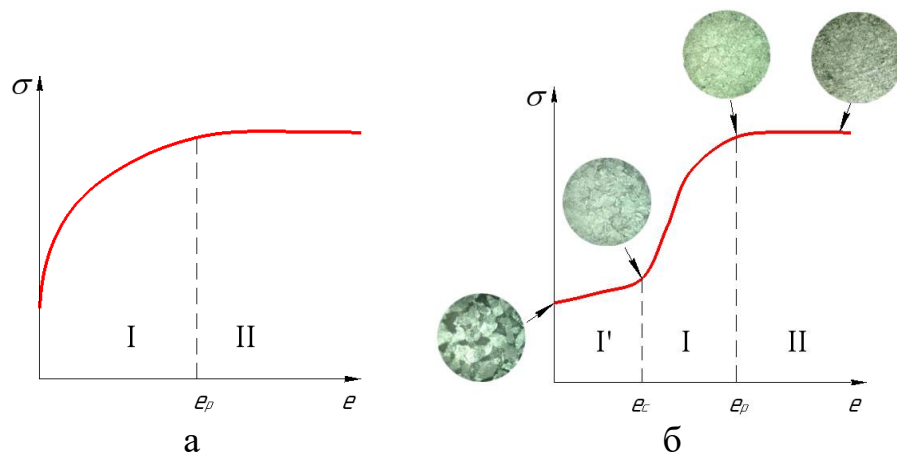


Рис. 20 – Схема зміцнення компактних (а) і некомпактних (б) матеріалів при гвинтовій екструзії

Основною причиною ущільнення є акомодация частинок порошку для порошкових і пластична деформація – для пористих матеріалів. Виникнення крутного моменту від порового простору призводить до полегшеного повороту мікроб'ємів матеріалу, що затрудняють на даній стадії реалізацію процесів зміцнення, фрагментації та диспергування структури. Полегшений поворот і множинні вихори, що виникають на першій стадії деформування, сприяють ефективному масопереносу в площині деформації. У результаті ансамблі частинок порошків легувальних елементів перемішуються, хімічний склад зразків стає більш гомогенним. Високий рівень контактних напружень, що діють на частинки порошків, сприяє активізації механохімічних процесів, що прискорюють взаємну дифузію частинок порошкової суміші.

Кінець стадії ущільнення характеризується деякою величиною деформації компактування ϵ_c , для якої характерне усунення пористості. На даному етапі матеріал заготовки можна вважати компактним, із крупнокристалічною структурою. Поведінка матеріалу на наступних стадіях I і II є аналогічною до поведінки компактних матеріалів. В результаті обробки ГЕ некомпактних заготовок, на відміну від компактних, досягається не тільки формування СМК структури, хімічна і структурна гомогенізація, але й ущільнення.

Експериментальне підтвердження латентної деформації під час ГЕ отримане на зразках з титанових сплавів ВТЗ-1, ВТ8 у різних вихідних станах (компактних і некомпактних). Так, вихідна заготовка з компактного сплаву ВТЗ-1 мала типову для титанових деформованих сплавів пластинчасту структуру, представлену зернами первинної β -фази розміром 20...40 мкм. Усередині зерен первинної β -фази розташовувалися пластини α -фази з розміром 2...4 мкм, між якими були прошарки β -фази з розміром близько 2 мкм (рис. 21, а).

По границях первинних β -зерен була присутня α -окантовка з розміром 3..7 мкм, що до 2,5 раз перевищувала середні розміри α -пластин і до 5 разів була більше за розміри β -прошарків. Дослідження розподілу основних легувальних елементів у структурних складових показали, що у вихідних заготовках мала місце істотна хімічна неоднорідність. Підвищена концентрація β -стабілізуючих елементів

– Mo і Cr – мала місце в β -прошарках і практично була відсутня в α -пластинах, що є характерним для $(\alpha + \beta)$ -сплавів із пластинчастою структурою.

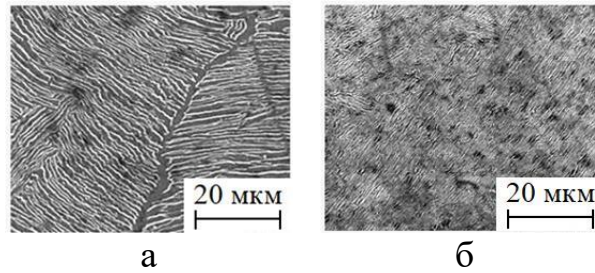


Рис. 21 – Мікроструктура сплаву VT3-1 у вихідному стані (а) та після ГЕ (б)

У результаті першого циклу деформації ГЕ відбувалась значна зміна структури сплаву (рис. 21, б). Однак у зонах, близьких до осі заготовки, при одному циклі деформування спостерігались ділянки структури, практично не піддані змінам при деформації. При цьому багаторазові цикли деформації, притаманні ГЕ, приводили до збільшення загального об'єму деформованих областей зразка. Після 4-5 циклів деформації спостерігалась деформація за всім перерізом зразка. У деформованому стані були практично відсутні границі первинних β -зерен і α -окантовка. Розміри α -пластин, що є основними структурними складовими сплаву, зменшувалися з 2...4 мкм до 0,2 мкм. Пропорційне зменшення розміру спостерігалось і для прошарку β -фази. Аналіз розподілу легувальних елементів показав зменшення концентраційної неоднорідності в сплаві з СМК структурою.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено наявність трьох стадій зміцнення при ГЕ, що пояснюють підвищення міцності та пластичності некомпактних матеріалів. Встановлено, що мультифрактальні вихори при простому зсуві в процесі ГЕ обумовлюють відмінності в механізмах зміцнення компактних і некомпактних матеріалів. Значно збільшений, у порівнянні з концентричними лініями течії при деформації компактних матеріалів, інтегральний шлях деформації сприяє інтенсифікації процесів акомодатії частинок суміші порошкових компонентів. Також вихори викликають інтенсивне переміщення та масоперенос як на мікро-, так і на макрорівні. Інтенсивний масоперенос приводить до хімічної та структурної гомогенізації, а також усунення пористості.

Встановлено основні закономірності структуро- та текстуроутворення титану під дією ГЕ та наступної термічної обробки. Встановлено, що ГЕ приводить до подрібнення зерен та зменшення розміру областей когерентного розсіювання, розмір яких не залежить від режимів спікання та режимів деформації в дослідженому діапазоні. В заготовках з титану після обробки ГЕ формувалася кристалографічна текстура аксіального типу. З ростом температури відпалу анізотропія зменшувалась. Анізотропія модуля пружності після 5 циклів деформації становила 14,0%. Після відпалу при 250°C параметри текстури Кернса мали найбільш близькі значення, що відповідає безтекстурному стану. При подальшому збільшенні температури відпалу анізотропія модуля пружності зростала і після відпалу при 400°C її величина набувала значення 16,42 %. Визначено значення коефіцієнтів анізотропії границь міцності та плинності титану після ГЕ, а також

встановлено закономірність їх зміни залежно від температури подальшого відпалу. Так, після 5 циклів деформації ГЕ вони становили 32,0% і мали мінімальне значення 7,0% після відпалу при 250°C та максимальне значення 37,0% при температурі відпалу 400°C. На підставі визначення закономірностей формування кристалографічної текстури встановлено, що після термічної обробки напівфабрикату індивідуальні заготовки лопаток компресору ГТД, для забезпечення їх міцності, вирізаються у поперечному напрямку (рис. 22).

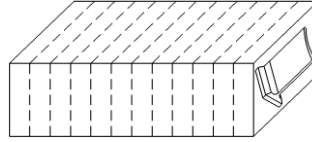


Рис. 22 – Схема вирізання заготовок лопаток з напівфабрикату після ІПД

Результати вимірювань температуропровідності, теплопровідності та теплоємності зразків з титану марки ВТ1-0 у крупнокристалічному, СМК і в спеченому станах дозволили встановити, що коефіцієнти тепло- і температуропровідності для титану в СМК і спеченому станах нижчі в порівнянні з титаном у крупнокристалічному стані (рис. 23).

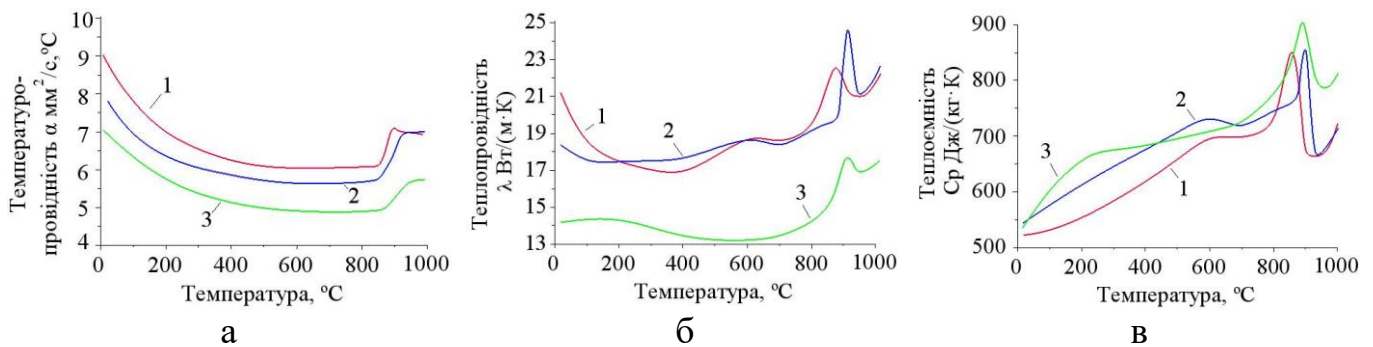


Рис. 23 – Залежності температуропровідності (а), теплопровідності (б) та питомої теплоємності (в) від температури для титану ВТ1-0 в різних станах: 1 – литий; 2 – субмікросталічний; 3 – спечений

У діапазоні температур 20...550 °С титан у СМК і спеченому станах характеризується більшою величиною питомої теплоємності в порівнянні з титаном у литому стані. У титані в литому стані фазове перетворення проходить в інтервалі температур 800...900 °С, у СМК – 850...950 °С, у спеченому – 800...950 °С. Встановлено статистично значиме збільшення температури фазового перетворення для сплаву в СМК стані. Температурний коефіцієнт лінійного розширення титану в СМК стані в діапазоні температур 100...600 °С нижчий, ніж у крупнокристалічному стані. Встановлені залежності теплофізичних властивостей титану у СМК стані від температури є подальшим розвитком наукових основ ОМТ, оскільки дають уяву про оптимізацію технологічних процесів їх подальшої обробки тиском у широкому діапазоні температур.

З метою дослідження можливості подальшої обробки різанням і тиском заготовок, підданих ІПД способом ГЕ на етапі виготовлення деталей ГТД механічною обробкою, проведено аналіз технологічної пластичності спечених

сплавів і сплавів після ГЕ. В основу методики оцінки технологічної пластичності покладено припущення про те, що пластична деформація твердих тіл неминуче супроводжується накопиченням в них мікроруйнувань. Збільшення гідростатичного тиску дозволяє підвищити граничну деформацію матеріалу та забезпечити його більш високу стійкість до локалізації деформацій.

На основі теорії деформаційної мікропористості виконано моделювання поведінки спеченої заготовки та заготовки після ГЕ при обробці тиском та різанням. Використано кінетичне рівняння деформаційної пористості, яке містить кількісну міру здатності структурних складових матеріалу до взаємної акомодатії, що складається з двох незалежних параметрів. Це дозволило виконати диференційовану оцінку внесків твердого оксидного каркаса та тіла зерна, а також жорсткості напруженого стану та дало можливість моделювати як виникнення, так і залікування мікропор:

$$\frac{d\theta}{d\gamma} = \alpha_1 \exp(-\lambda\gamma) + \alpha_2' (1 - \exp(-\lambda\gamma))\gamma^n + 6a\theta\eta, \quad (4)$$

де α_1 , α_2' , λ і n – постійні параметри; η – коефіцієнт жорсткості напруженого стану.

Для оцінки технологічної пластичності на якісному рівні використано граничні значення параметрів рівняння (4), виходячи з їх фізичного сенсу. Параметр α_1 , що характеризує механізм утворення деформаційних мікропор та пов'язаний з руйнуванням сплаву по границях зерен через наявність крихкого оксидного каркаса, змінювався від 0,1 для порошкових та до 1,0 для спечених заготовок. Чим більше величина α_1 , тим більший внесок у збільшення пластичності вносить механізм руйнування оксидного каркаса по границях зерен. Параметр, що характеризує пороутворення в тілі зерна, залежить від деформації за статичним законом, у зв'язку із чим у рівнянні (4) цей механізм визначається постійною величиною α_2' та показником ступеня n , що становив 1,0 для порошкових заготовок, 0,1 для спечених та 0,5 для напівфабрикатів після ГЕ. Чим більше величина n , тим більший внесок у механізм зародження деформаційних мікропор при обробці вносить тіло зерна. Значення коефіцієнта жорсткості напруженого стану визначається видом і режимом обробки. Для його оцінки використано метод скінченних елементів.

На підставі результатів моделювання встановлено, що диспергування крихкого оксидного каркаса по границях зерен сприяє істотному підвищенню рівня технологічної пластичності спечених титанових сплавів (рис. 24).

Для спеченого сплаву гранична деформація Мізеса до руйнування при жорсткості напруженого стану, що відповідає діапазону обробки різанням, не перевищує 0,17...0,18 (рис. 24, а). Модель матеріалу, що враховує відсутність оксидного каркаса по границях зерен та припускає переважне руйнування шляхом зародження мікропор у тілі зерна (сплав у СМК стані), вказує на можливість реалізації набагато більших деформацій. Розв'язок рівняння (4) з початковими умовами, які відповідають п'яти циклам деформації ГЕ, показав (рис. 24, б), що у СМК стані спечений сплав може оброблятися тиском до рівня деформації Мізеса 2,1...2,2. Допустима деформація при обробці лезовим інструментом перевищує 5. Її

збільшення дозволяє не допустити руйнування поверхневого шару заготовок деталей при різанні та інтенсифікувати режими обробки.

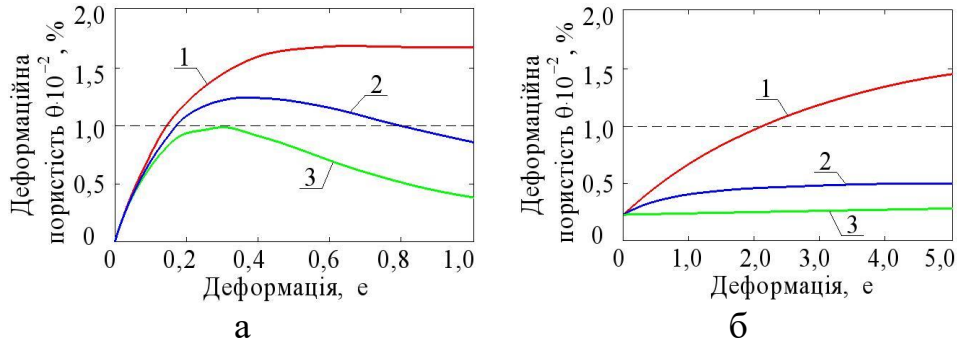


Рис. 24 – Залежність деформаційної пористості від деформації Мізеса для спечених (а), спечених та підданих ГЕ (б) сплавів: 1 – $\eta = -1/\sqrt{3}$, 2 – $\eta = -2$, 3 – $\eta = -4$

Результати моделювання деформаційної мікропористості пояснюють низьку пластичність сплавів, отриманих методами порошкової металургії, та високу пластичність сплавів у СМК стані.

Теоретичний аналіз підтвердив отримані експериментальні результати щодо підвищення після ГЕ рівня пластичності спечених титанових сплавів. Підтвердженням результатів моделювання є також дослідна партія лопаток компресора, які були виготовлені шляхом високошвидкісного різання зі спечених заготовок, підданих ГЕ.

Враховуючи те, що в процесі різання та деформаційного зміцнення поверхневий шар пера лопаток зазнає пластичної деформації, було розглянуто його схильність до деформаційного зміцнення шляхом побудови кривих зміцнення та визначення тангенса кута їх нахилу у логарифмічних координатах. Для пояснення встановлених закономірностей розглянуто особливості структури та механізми зміцнення при деформації стисненням титану в крупнокристалічному і СМК станах. Встановлено, що ПД сприяє майже дворазовому підвищенню напруження плинності титану при стисненні. При цьому, показник деформаційного зміцнення на 23...25% менший у порівнянні зі сплавом у крупнокристалічному стані. Обґрунтовані механізми зміцнення, базуючись на тому, що основний вклад у деформаційне зміцнення крупнокристалічних матеріалів вносять механізми зміцнення тіла зерна у той час, як для сплавів у наноструктурованому стані основна роль відводиться механізмам зернограничного зміцнення. Зміцнення сплавів у СМК стані відбувається як за рахунок підвищення міцності тіла зерен, так і за рахунок підвищення міцності їх границь.

На підставі результатів досліджень щодо розвитку наукових основ процесів виготовлення деталей з порошкових матеріалів для ГТД із застосуванням методів ПД запропоновано та експериментально апробовано технологічний цикл виробництва лопаток компресора. Відповідно до нього виробництво напівфабрикатів складнолегованих титанових сплавів типу ВТ3-1, ВТ6, ВТ8

відбувається шляхом синтезу із суміші порошкових компонентів методами порошкової металургії (рис. 25).

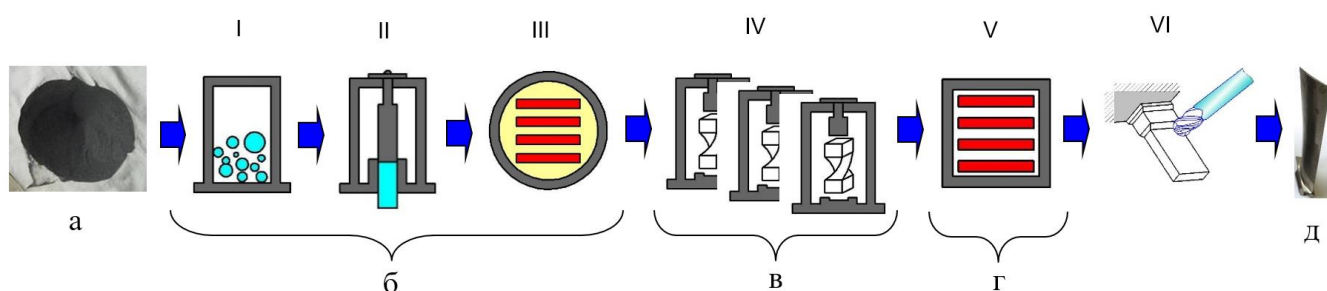


Рис. 25 – Структура технологічного циклу виготовлення лопаток ГТД з порошкового матеріалу із застосуванням ППД: I – шихтування; II – пресування; III – вакуумне спікання; IV – ППД гвинтовою екструзією; V – термічна обробка; VI – механічна обробка; а – порошкова суміш; б – некомпактна, спечена заготовка; в – компактний напівфабрикат з СМК структурою; г – заготовка лопатки з рівновісною, бімодальною структурою; д – лопатка ГТД

Комбінація методів порошкової металургії та ППД дозволяє отримувати високоміцні компактні напівфабрикати складнолегованих титанових сплавів, виключаючи енерговитратні операції металургійного переділу титану та гарячої деформаційної обробки. Практична реалізація розробленого технологічного циклу на основі удосконалених процесів для типового представника деталей ГТД з титанових сплавів – робочої лопатки компресора зі сплаву ВТ8 – підтвердила ефективність їх виготовлення за технологією із застосуванням ППД (рис. 26).

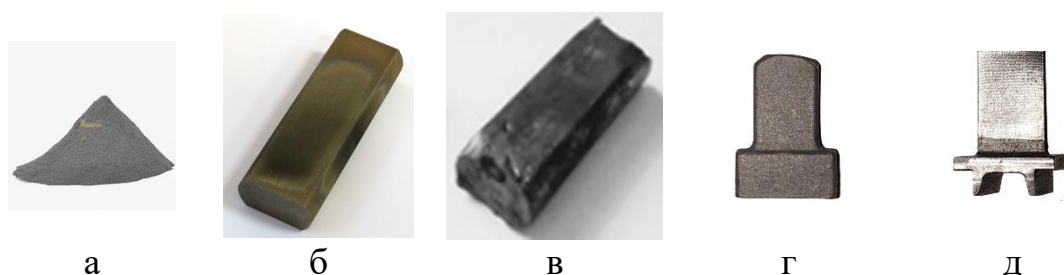


Рис. 26 – Лопатка ГТД на основних операціях процесу виготовлення: а – порошкова суміш; б – спечена заготовка; в – напівфабрикат (після гвинтової екструзії); г – заготовка лопатки (після термічної обробки); д – лопатка ГТД (після механічної обробки)

Для аналізу можливості застосування сплаву ВТ8 у різних станах для виготовлення лопаток ротора та статора компресора малорозмірного ГТД зроблена оцінка їх міцнісної надійності. Шляхом імітаційного моделювання чисельним методом у системі ANSYS виконано термогазодинамічний аналіз, на підставі якого визначено тиски газового потоку та температури, що діють на аеродинамічні поверхні лопаток усіх ступенів компресора малорозмірного ГТД типу Р95-300. У результаті комплексного газодинамічного, теплового та міцнісного розрахунків визначено поля діючих напружень і температур для лопаток ротора та статора компресора з урахуванням фізичних і механічних властивостей. Їх аналіз дозволив

визначити, що робоча температура пера змінюється від 80°C для першого ступеня до 575°C для робочих лопаток шостого ступеня та від 25 до 605°C для лопаток статора відповідно. Максимальні еквівалентні напруження в пері лопаток склали відповідно від 477 до 889 МПа для ротора та від 8,8 до 146 МПа для статора. Це дало підставу для оцінки міцнісної надійності лопаток з деформованого прутка зі сплаву ВТ8, отриманого за технологією переплаву та після його ПД (ВТ8іпд), а також лопаток, виготовлених зі спеченого сплаву (ВТ8пм) і після його ПД (ВТ8пм_іпд). Обмеження запасу міцності лопаток на рівні 1,1...1,2, що відповідає вимогам до ГТД безпілотних літальних апаратів, та максимально дозволених температури експлуатації сплавів залежно від кристалічного стану дозволило оцінити можливість застосування розглянутих матеріалів відповідно до технологій їх обробки (рис. 27).

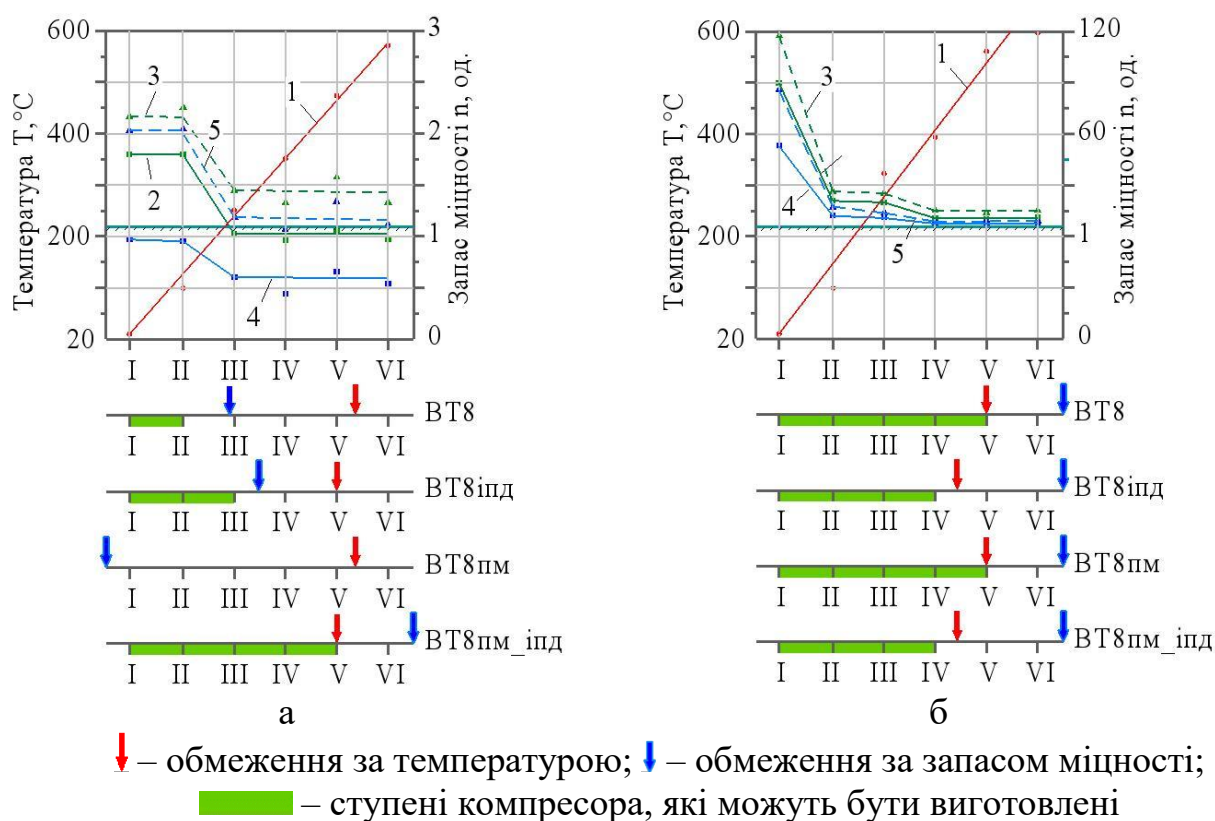


Рис. 27 – Номограми граничних температур і запасу міцності для лопаток ротора (а) і статора (б) різних ступенів компресора з титанового сплаву ВТ8, отриманого з використанням різних технологічних процесів: 1 – температура, °С; 2 – ВТ8; 3 – ВТ8іпд; 4 – ВТ8пм; 5 – ВТ8пм_іпд.

Встановлено раціональні, з погляду собівартості та умов експлуатації, технології отримання сплаву ВТ8 для лопаток ротора та статора різних ступенів компресора. Лопатки статора I-V ступенів компресора можуть бути виготовлені зі спеченого титанового сплаву ВТ8 без деформаційної обробки (ВТ8пм), лопатки ротора I-IV ступенів – зі спеченого титанового сплаву ВТ8 після ПД (ВТ8пм_іпд).

Достовірність отриманих результатів міцнісного аналізу та можливість застосування титанових сплавів зі встановленим рівнем властивостей підтверджено актом серійного виробника ГТД АТ "Мотор Січ".

П'ятий розділ присвячено удосконаленню спеціального технологічного оснащення, обладнання та технології гвинтової екструзії порошкових матеріалів, а також оцінці економічного та екологічного ефектів.

Особливості процесу ГЕ, фізичних та механічних властивостей спечених титанових сплавів, а також серійного типу виробництва деталей ГТД обумовлюють ряд вимог як до технологічного оснащення, так і до обладнання для його реалізації. У першу чергу, технологічне оснащення повинне бути надійним і не руйнуватися при деформації високоміцних титанових сплавів типу ВТ8. Технологічне обладнання та процес обробки мають бути адаптовані до умов серійного типу виробництва, забезпечуючи при цьому стабільну якість партій напівфабрикатів. Розв'язання цих завдань потребує удосконалення технологічного оснащення для ГЕ спечених заготовок. Основними напрямками удосконалення є зниження навантажень на основні деталі, сил тертя між заготовками та матрицями, а також автоматизація роботи установки для ГЕ.

Підвищення технологічності конструкції та експлуатаційної технологічності гвинтових матриць та приймального контейнера, що є одними з найбільш навантажених деталей штампа для пресування з протитиском, досягнуто завдяки роз'ємній конструкції. Для зменшення сил тертя заготовки в контейнері та матриці запропоновано спосіб багатоетапного пресування заготовок пластичним середовищем (фальш-заготовкою) (рис. 28, а, б).

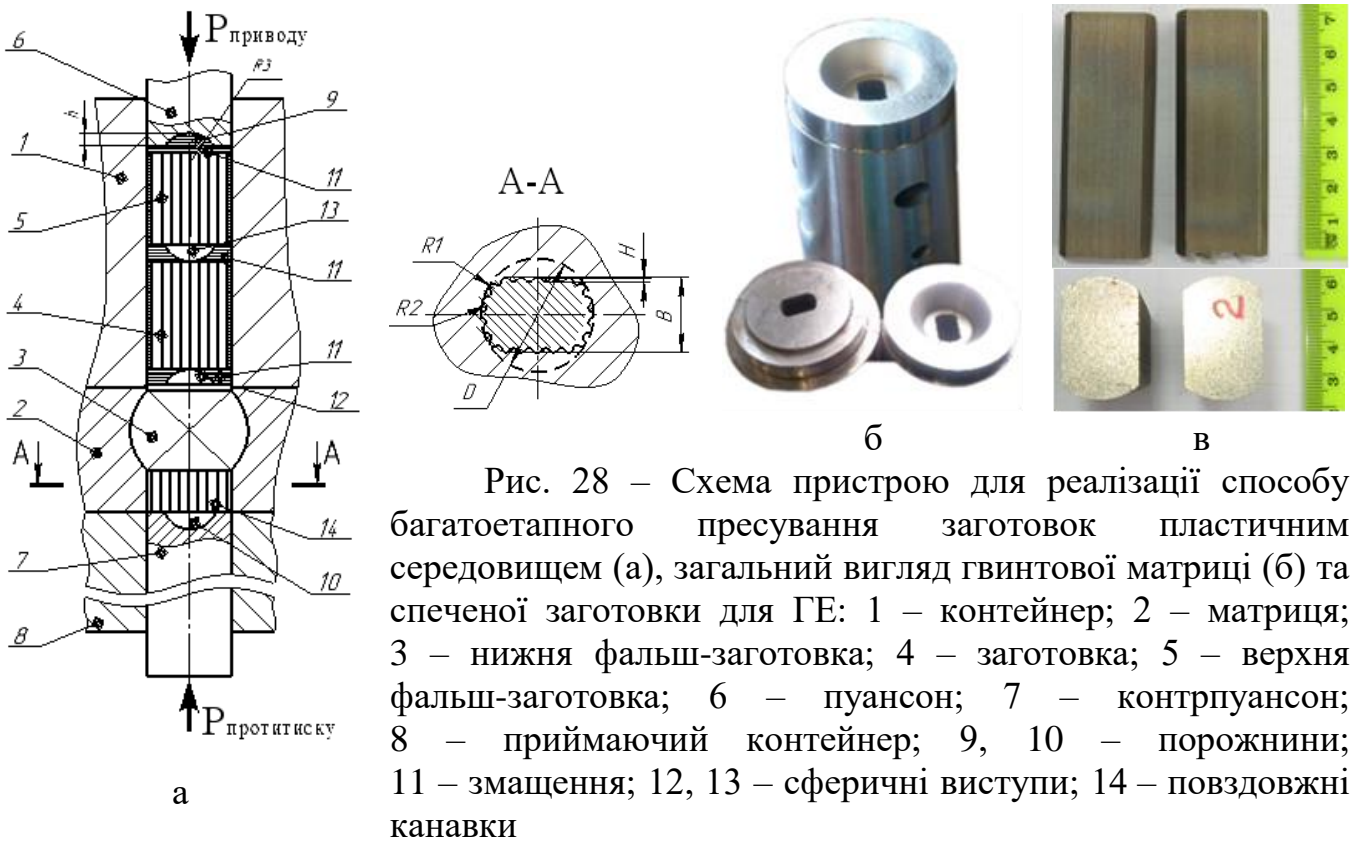


Рис. 28 – Схема пристрою для реалізації способу багатоетапного пресування заготовок пластичним середовищем (а), загальний вигляд гвинтової матриці (б) та спеченої заготовки для ГЕ: 1 – контейнер; 2 – матриця; 3 – нижня фальш-заготовка; 4 – заготовка; 5 – верхня фальш-заготовка; 6 – пуансон; 7 – контрпуансон; 8 – приймаючий контейнер; 9, 10 – порожнини; 11 – змащення; 12, 13 – сферичні виступи; 14 – повздовжні канавки

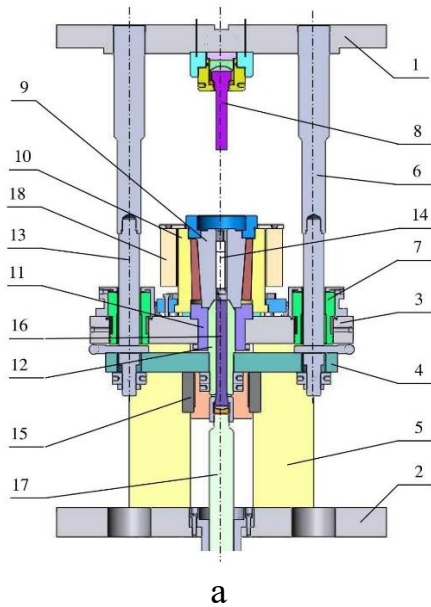
Від відомих способів він відрізняється тим, що в процесі деформування заготовки пуансоном і контрпуансоном формують виступи на торцях верхньої та нижньої фальш-заготовок відповідно, після деформації в матриці на бічних

поверхнях фальш-заготовки та заготовки формують поздовжні канавки (на ділянці виходу з каналу матриці). Перед і після встановлення заготовок в контейнер заповнюють канавки і порожнини навколо виступів фальш-заготовок мастилом. Це дозволяє забезпечити зниження тертя бічних поверхонь заготовки і фальш-заготовок об стінки каналу контейнера і гвинтової матриці, що приводить до зменшення тиску пресування ГЕ заготовок пластичним середовищем (фальш-заготовкою). Після кожного циклу деформації заготовка завдяки ділянці 14 каналу гвинтової матриці 2, що калібрує, приймає вихідну форму (рис. 28, в), що дозволяє послідовно виконувати потрібну кількість циклів деформації ГЕ.

Для виключення явища викривлення заготовки при кожному циклі деформування гвинтовою екструзією, що характеризується відносним закручуванням переднього та заднього торців заготовки, досліджено вплив ширини заготовки на довжину ділянки каналу матриці, що калібрує. Забезпечення викривлення на рівні $2...3^\circ$ важливо з точки зору можливості наступних циклів деформації заготовки без її виправлення. Довжину калібрувальної частини каналу матриці розглядали відносно ширини заготовки, що дало можливість встановити критерій щодо довжини ділянки каналу у безрозмірному вигляді. Встановлено, що зменшення калібрувальної ділянки до довжини, меншої за 0,6 ширини заготовки призводить до такого її викривлення, яке перевищує допустиму величину. Це не дозволяє виконувати наступні цикли деформації ГЕ. Збільшення довжини калібрувальної ділянки до величини більшої за 1,0 ширини заготовки призводить до збільшення сил тертя та, як наслідок, тиску пресування та навантаження деталей штампа. Для заготовки з поперечним перерізом 18×28 мм раціональна довжина калібрувальної ділянки каналу гвинтової матриці становить 15 мм. Викривлення заготовки при цьому не перевищувало 3° . Це не потребувало її виправлення між циклами деформації.

Для реалізації процесу ППД заготовок з порошкових матеріалів удосконалено конструкцію штампа для пресування заготовок гвинтовою екструзією (рис. 29). Запропонована конструкція штампа дозволила вирішити задачу підвищення надійності і довговічності його роботи за рахунок того, що нерухоме закріплення бандажа приймального контейнера на верхній проміжній плиті збільшує площу опори матриці і забезпечує передачу тиску пресування з матриці на основу, а також підвищує точність позиціонування приймального контейнера відносно матриці і у такий спосіб підвищується надійність роботи штампа.

Закріплення приймального контейнера на нижній проміжній плиті дозволяє вводити та виводити його з бандажа, розташованого на верхній проміжній плиті, гідроциліндрами преса (за рахунок зв'язку з тягами та наявності фіксаторів), притиснути його до нижнього торця матриці і зафіксувати нижню проміжну плиту та приймальний контейнер у верхньому положенні, і в такий спосіб забезпечити надійний контакт приймального контейнера з матрицею, що підвищує надійність роботи штампа. Наявність колонок і втулок забезпечує співвісність верхнього пуансона і матриці, що також підвищує надійність та довговічність роботи цих деталей штампа.



а

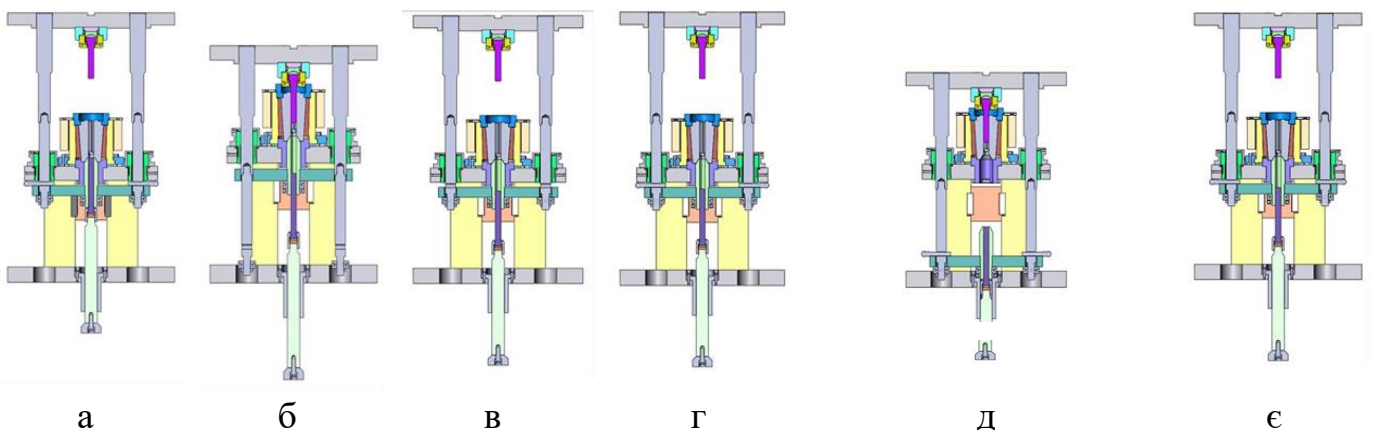
б

в

Рис. 29 – Схема (а) та загальний вигляд (б) штампів і установки для ГЕ на його основі (в): 1 – верхня рухома плита; 2 – нижня нерухома плита; 3 – проміжна нерухома плита; 4 – проміжна рухома плита; 5 – опори; 6 – колонки; 7 – втулки; 8 – робочий пуансон; 9 – гвинтова матриця; 10 – контейнер; 11 – бандаж приймального контейнера; 12 – приймальний контейнер; 13 – тяги; 14 – заготовка, що обробляється; 15 – клини; 16 – нижній контрпуансон; 17 – проміжний шток; 18 – нагрівач

Цикл роботи штампів містить шість етапів, що забезпечує реалізацію деформації в напівавтоматичному режимі «заготовка за заготовкою» (рис. 30).

Автоматизація роботи штампів досягається за рахунок того, що всі основні дії (крім установки та зняття основної та фальш-заготовок та клинів) виконуються за рахунок робочого та допоміжного рухів преса відповідно до запрограмованого циклу. Це вимагає удосконалення гідравлічного преса та пресового обладнання.



а

б

в

г

д

є

Рис. 30 – Цикл роботи штампів для пресування гвинтової екструзією з протитиском: а – завантаження заготовки та фальш-заготовки; б – робочий хід; в – підняття рухомих плит; г – вилучення клинів, встановлення фіксаторів; д – вилучення заготовки та фальш-заготовки; є – повернення у вихідне положення, встановлення клинів, вилучення фіксаторів

На підставі аналізу умов деформації спечених заготовок та циклу роботи штампа сформульовано вимоги до пресового обладнання, що дозволяє вдосконалити процес їх ПД. Встановлено, що основними умовами реалізації процесу ГЕ на гідравлічних пресах є наявність зворотного циліндра – виштовхувача, що дозволяє реалізувати деформацію із протитиском, можливість незалежного регулювання режимів роботи основного гідроциліндра та циліндра виштовхувача, швидкість їх переміщення на робочому ході не менш ніж 10...20 мм/с, керування тиском на верхній і нижній пуансон, контроль величини переміщення на всій траєкторії робочого та холостого ходів. Розміри робочої зони преса, а також робочі і холості ходи повзуна та виштовхувача повинні дозволяти реалізовувати цикл деформації ГЕ, пов'язаний з деформацією пакета, що складається із двох фальш- і однієї основної заготовок, видаленням заготовки та фальш-заготовки. У відповідності до цих умов було проведено модернізацію пресу П-315 з числовим програмним керуванням.

Оскільки одним із головних питань у вирішенні проблеми підвищення рівня механічних властивостей заготовок з порошкових матеріалів тиском є економічна доцільність використання, розраховано собівартість напівфабрикатів та очікуваний економічний ефект від впровадження.

Порівняльний аналіз енергоефективності та екологічності альтернативних варіантів технологічних циклів показує, що технологія виготовлення деталей з порошкових матеріалів для газотурбінних двигунів із застосуванням ПД перевершує технологію металургійного переділу за всіма показниками. Так, витрати електроенергії знижуються в 5,57 раза, природного газу – на 360 м³ на 1 т продукції, що випускається. Викиди забруднюючих речовин зменшуються в 4,67 раза за пилом та 2,82 раза за оксидами вуглецю. При цьому, на відміну від технології металургійного переділу, виділення оксидів азоту та сірчистого ангідриду не передбачається, що досягається за рахунок відмови від використання природного газу.

Розроблена технологія і креслення технологічного обладнання передані та впроваджені на АТ «Мотор Січ» і ДП «Івченко-Прогрес». Отримання очікуваного економічного ефекту від впровадження удосконалених процесів виготовлення деталей з порошкових матеріалів для ГТД, за рахунок зниження собівартості титанових напівфабрикатів малого діаметра, із розрахунку на 1 т заготовок у розмірі 4918 тис. грн та реального економічного ефекту, який становив 750 тис. грн, підтверджено актом впровадження.

ВИСНОВКИ

У завершеній науково-дослідній дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему підвищення якості заготовок з порошкових матеріалів обробкою тиском на базі розвитку наукових основ і удосконалення процесів інтенсивної пластичної деформації. Це дало можливість реалізувати енергоефективну технологію виробництва заготовок деталей газотурбінних двигунів на основі ПД спечених заготовок з наступною термічною обробкою.

Результати роботи дозволяють зробити такі основні висновки:

1. На підставі літературного аналізу встановлено проблеми ОМТ титанових порошкових заготовок, що стримують розвиток енергоефективних технологій виробництва деталей ГТД. Розглянуто шляхи розвитку процесів деформаційної обробки порошкових заготовок. Встановлено, що виготовлення заготовок з порошкових матеріалів є у 1,7 раза енергоефективнішою технологією у порівнянні з металургійним переділом титану. Визначено основні напрямки розвитку технологій обробки заготовок з порошкових матеріалів тиском, що полягають в удосконаленні процесів деформування шляхом створення високого рівня гідростатичного тиску в осередку деформації та активізації деформації зсувом.

2. Встановлено, що методи порошкової металургії дозволяють на основі серійного порошку титану ПТ5 отримувати спечені напівфабрикати складнолегованих титанових сплавів, які за хімічним та фазовим складом, а також домішками відповідають ОСТ 190013-81. Середня пористість спечених сплавів складає 8...9%, гранична концентрація кисню після інтенсивної пластичної деформації не перевищує 0,14%, азоту – 0,017%, що також відповідає вимогам ОСТ 190013-81. Структура та характеристики міцності спечених заготовок не задовольняють вимоги ОСТ 90006-70 до титанових прутків і заготовок лопаток ГТД. Для підвищення якості вони мають бути піддані обробці тиском та термічній обробці.

3. Встановлено, що нормативний рівень запасу міцності робочих лопаток компресора ГТД у межах 1,5...1,8 за змінними напруженнями може бути забезпечений при пористості заготовок не більше 2,5% та розмірі пор не більшому ніж 1 мкм. Для забезпечення потрібного рівня запасу міцності спечені заготовки мають бути піддані обробці тиском. Найбільш раціональною, з погляду енергоефективності в умовах серійного типу виробництва деталей ГТД для ущільнення, гомогенізації та формування СМК структури в напівфабрикатах, є схема технологічного процесу, що містить операції пресування, спікання та однократну операцію ПД. Найбільш раціональним способом ПД спечених заготовок є гвинтова екструзія.

4. Встановлено, що 5 циклів деформації об'ємних спечених титанових заготовок гвинтовою екструзією при температурі на 50...100°C нижче за температуру початку рекристалізації сплаву дозволяють досягати основних цілей обробки тиском. Для збереження цілісності заготовок гвинтова екструзія повинна реалізовуватися з протитиском на рівні 30% від тиску пресування. Це приводить до ущільнення як периферійних, так і центральних частин заготовки. В них формується субмікрокристалічна структура з середнім розміром зерен 200...300 нм і областями когерентного розсіювання близько 30...40 нм при рівні удаваної пористості 1...2%. Це сприяє істотному підвищенню комплексу характеристик міцності при незначному зниженні ударної в'язкості, модуля пружності, тепло- і температуропровідності та коефіцієнта лінійного розширення.

5. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено наявність у площині деформації спечених заготовок під час обробки гвинтовою екструзією латентної деформації у вигляді мультимасштабних вихорів, що сприяють інтенсивному перемішуванню на мікро- та макрорівні. Це приводить до гомогенізації і усунення лікваций в напівфабрикатах.

6. Експериментально доведено, що у напівфабрикатах з титану після обробки гвинтовою екструзією формується кристалографічна текстура аксіального типу. Анізотропія модуля пружності після 5 циклів деформації заготовок зі сплаву VT1-0 має мінімальне значення 3,35% після відпалу при 250°C. Коефіцієнти анізотропії границь міцності та плинності мають мінімальне значення 7,0% після відпалу при 250°C. Це дозволило обґрунтувати схему вирізання заготовок лопаток з напівфабрикату та режим їх термічної обробки.

7. Із застосуванням моделі технологічної пластичності матеріалів встановлено, що після гвинтової екструзії спечені заготовки можуть оброблюватися методами ОМТ до рівня деформації Мізеса 2,1...2,2. Допустимий ступінь деформації без руйнування поверхневого шару при обробці лезовим інструментом перевищує 5. Експериментально встановлено, що коефіцієнт деформаційного зміцнення титану в субмікрокристалічному стані зменшується на 23...25% відносно литого стану. Це вказує на можливість ефективно обробляти спечені заготовки після гвинтової екструзії різанням, методами ОМТ та поверхнево-пластичним деформуванням для виготовлення з них деталей ГТД.

8. Експериментально встановлено, що застосування повздовжніх канавок у каналі гвинтової матриці призводить до зниження тертя, навантаження на силові елементи штампа та необхідного тиску пресування. Рациональна довжина калібрувального паска матриці становить 0,6...1 товщини заготовки, що забезпечує пластичне відновлення її первинного перерізу та можливість багатоциклового оброблювання. Розроблена конструкція штампа для пресування гвинтовою екструзією з протитиском забезпечує зниження робочих навантажень на його елементи та можливість роботи в напівавтоматичному режимі і дозволяє обробляти складнолеговані титанові сплави для деталей ГТД.

9. Очікуваний економічний ефект від впровадження вдосконалених процесів виготовлення заготовок деталей з порошкових матеріалів для газотурбінних двигунів становить 4918 тис. грн з розрахунку на 1 т титанових напівфабрикатів. Реальний економічний ефект склав 750 тис. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази SCOPUS:

1. Karpinos B. S., **Pavlenko D. V.**, Kachan O. Ya. Deformation of a submicrocrystalline VT1-0 titanium alloy under static loading. *Strength of Materials*. 2012. Vol. 44 (1). P. 100-107.

2. Olshanetskii V. E., Stepanova L. P., Tkach D. V., **Pavlenko D. V.** About formation of crystallographic texture in VT1-0 titanium under helical extrusion. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012. № 53 (11-12). P. 618-622.

3. Olshanetskii V. E., Stepanova L. P., Greshtha V. L., **Pavlenko D. V.**, Tkach D. V. Deformation behavior of titanium VT1-0 with submicrocrystalline structure formed by the method of helical extrusion. *Metal Science and Heat Treatment*. 2014. Vol. 55, Issue 11-12. P. 603-607.

4. **Pavlenko D. V.**, Ovchinnikov A. V. Effect of Deformation by the Method of Screw Extrusion on the Structure and Properties of VT1-0 Alloy in Different States. *Materials Science*. 2015. Vol. 51, Issue 1. P. 52-60.

5. Vasylyev M.O., Mordyuk B.M., **Pavlenko D. V.**, Yatsenko L.F. Ultrasonic impact processing of surface layer of the BT1-0 titanium in a submicrocrystalline state. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2015. Vol. 37. P. 121-134.

6. Kuzmov A. V., Shtern M. B., Kirkova E. G., Beygel'zimer Ya. E., **Pavlenko D. V.** Analysing the twist extrusion of porous blanks using modified theories of plasticity for porous bodies. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2016. Vol. 54, № 11-12. P. 631-640.

7. **Pavlenko D. V.**, Beygel'zimer Ya. E. Vortices in noncompact blanks during twist extrusion. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2016. Vol. 54, № 9-10. P. 517-524.

8. **Pavlenko D. V.**, Tkach D. V., Danilova-Tret'yak S. M., Evseeva L. E. Thermo-physical properties and temperature of the start of titanium recrystallization in different structural states. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. Vol. 90, № 3. P. 685-696.

9. **Pavlenko D. V.** Assessment of Gas Saturation of Titanium Alloys Synthesized From Powders Using Twist Extrusion. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2017. Vol. 56, Issue 5-6. P. 46-59.

10. Beygelzimer Ya. E., **Pavlenko D. V.**, Synkov O. S., Davydenko O. O. The Efficiency of Twist Extrusion for Compaction of Powder Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2019. Vol. 58, № 1-2. P. 7-12.

11. **Pavlenko D. V.** Effect of porosity parameters on the strength of gas turbine compressor blades made of titanium alloys. *Strength of Materials*. 2019. Vol. 51, № 6. P. 887-899.

12. Bykov I. O., Ovchinnikov A. V., **Pavlenko D. V.**, Lechovitzer Z. V. Composition, Structure, and Properties of Sintered Silicon-Containing Titanium Alloys. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 58 (9). P. 613-621.

13. **Pavlenko D.**, Dvirnyk Ya., Przysowa R. Advanced materials and technologies for compressor blades of small turbofan engines. *Aerospace*. 2021. Vol. 8, Issue 1. P. 1-16.

Публікації у міжнародних наукових журналах:

14. **Павленко Д. В.**, Овчинников А. В., Качан А. Я., Шевченко В. Г., Бейгельзимер Я. Е., Решетов А. В., Кулагин Р. Ю. Формирование субкристаллической структуры в сложнолегированных титановых сплавах. *Перспективные материалы*. 2009. № 7. С. 240-244.

Публікації у фахових виданнях України:

15. Овчинников А. В., **Павленко Д. В.**, Качан А. Я., Шевченко В. Г. Оценка эффективности применения интенсивной пластической деформации для получения нанокристаллической структуры в титановом сплаве ВТЗ-1. *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*. 2007. № 1. С. 27-31.

16. **Павленко Д. В.**, Ткач Д. В., Грешта В. Л. Деформационное поведение и выносливость сплава ВТ1-0 с субмикроструктурной структурой. *Вестник двигателестроения*. 2011. № 1. С. 125-131.

17. **Павленко Д. В.** Упрочняемость сплава ВТ1-0 в субмикрористаллическом состоянии при сжатии. *Вестник двигателестроения*. 2012. № 1. С. 161-168.
18. **Павленко Д. В.** Закономерности диссипации энергии в образцах из сплава ВТ1-0 с субмикрористаллической структурой в интервале рабочих температур. *Вестник двигателестроения*. 2013. № 1. С. 65-71.
19. **Павленко Д. В.** Материаловедческие аспекты ресурсосберегающей технологии получения титановых полуфабрикатов. *Технологические системы*. 2013. № 4 (65). С. 21-29.
20. **Павленко Д. В., Овчинников А. В.** Техничко-экономические аспекты технологических схем получения заготовок из титановых сплавов для лопаток ГТД. *Вестник двигателестроения*. 2014. № 1. С. 98-103.
21. **Павленко Д. В.** Альтернативные схемы технологического процесса получения полуфабрикатов для лопаток ГТД методами порошковой металлургии. *Технологические системы*. 2014. № 4. С. 51-57.
22. **Павленко Д. В.** Влияние параметров порошков титана на прочность спеченных полуфабрикатов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2014. № 2. С. 87-92.
23. **Павленко Д. В.** Технологические методы уплотнения спеченных титановых заготовок. *Вестник двигателестроения*. 2015. № 1. С. 87-93.
24. **Павленко Д. В.** Повышение технологической пластичности спеченных титановых сплавов. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 2015. Вип. 15. С. 1-14.
25. Тарасов А. Ф., Бейгельзимер Я. Ю., **Павленко Д. В., Штерн М. Б.** Совершенствование технологических процессов и оснастки для деформирования порошковых заготовок с применением интенсивной пластической деформации. *Обработка материалов давлением*. 2015. № 2 (41). С. 336-344.
26. **Павленко Д. В.** Методика оптимизации канала матриц для винтовой экструзии. *Журнал инженерных наук*. 2015. Т. 2, № 1. С. 8-15.
27. **Павленко Д. В., Овчинников А. В.** Уплотнение спеченных титановых заготовок гидроэкструзией. *Вестник двигателестроения*. 2016. № 1. С. 58-61.
28. **Павленко Д. В., Коваленко Т. А., Овчинников А. В.** Влияние термического воздействия на структуру и свойства титанового сплава ВТ8М в субмикрористаллическом состоянии. *Технологические системы*. 2016. № 1. С. 60-67.
29. **Павленко Д. В.** Особенности уплотнения спеченных титановых сплавов методами обработки давлением. *Обработка материалов давлением*. 2017. № 1 (44). С.174-180.
30. **Павленко Д. В.** Методология обработки давлением спеченных сплавов при изготовлении деталей газотурбинных двигателей. *Вестник двигателестроения*. 2017. № 1. С. 83-92.
31. Богуслаев В. А., Коцюба В. Ю., **Павленко Д. В.** Модернизация прессового оборудования для реализации технологий интенсивной пластической деформации сплавов для авиационной техники. *Технологические системы*. 2017. № 4 (81). С. 7-14.

32. **Павленко Д. В.**, Тарасов А. Ф., Бейгельзимер Я. Е., Коцюба В. Ю. Конструктивные аспекты оснастки для винтовой экструзии. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. Вып. 8/152. С. 42-53.

33. **Павленко Д. В.** Закономерности уплотнения титановых прессовок. *Вестник двигателестроения*. 2018. № 1. С. 106-115.

34. **Павленко Д. В.** Моделирование теплового состояния зоны резания сплава ВТ8 в различных структурных состояниях. *Вестник двигателестроения*. 2019. № 1. С. 75-88.

35. **Павленко Д. В.** Структурні та хімічні неоднорідності у спечених титанових сплавах після інтенсивної пластичної деформації. *Матеріалознавство та обробка металів*. 2020. № 3. С. 43-52.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

36. **Павленко Д. В.** Экспериментально-статистическая методика определения пределов выносливости материалов. *Титан-2008: производство и применение: материалы I науч.-техн. конф. молод. ученых и специалистов*. (Запорожье, 1-2 октября 2008 г.). Запорожье: ЗНТУ, 2008. С. 80-82.

37. Варюхин В. Н., Бейгельзимер Я. Е., Кулагин Р. Ю., Овчинников А. В., **Павленко Д. В.** Перспективы применения винтовой экструзии в авиадвигателестроении. *Титан-2010: производство и применение: материалы II науч.-техн. конф. молод. ученых и специалистов*. (Запорожье, 1-2 декабря 2010 г.). Запорожье: ЗНТУ, 2010. С. 11.

38. **Павленко Д. В.** Конструктивно-технологические аспекты применения нано и субмикрористаллических сплавов в авиадвигателестроении. *Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф.* (Запорожье, 24-29 сентября 2012 г.). Запорожье: АО "Мотор Сич", 2012. С. 86-93.

39. Васильев М. О., **Павленко Д. В.**, Яценко Л. Ф. Зміна фізико-хімічного стану поверхні титанових сплавів після ультразвукової ударної обробки. *Титан-2012: виробництво і застосування: матеріали III наук.-техн. конф. молод. вчених і спеціалістів*. (Запоріжжя, 4-5 жовтня 2012 р.). Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. С. 14-15.

40. **Павленко Д. В.** Аспекты механической и отделочно-упрочняющей обработки титановых сплавов в субмикрористаллическом состоянии. *Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф.* (Запорожье, 24-29 сентября 2012 г.). Запорожье: АО "Мотор Сич", 2012. С. 133-136.

41. **Павленко Д. В.** Ресурсосберегающая технология получения компактных заготовок сложнолегированных титановых сплавов. *Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: материалы X Междунар. науч.-техн. конф.* (Запорожье, 23-28 сентября 2013 г.). Запорожье: АО "Мотор Сич", 2013. С. 14-17.

42. **Павленко Д. В.**, Овчинников А. В., Капустян А. Е., Скребцов А. А. Получение деформированных заготовок из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии. *Ti-2013 в СНГ: сборник трудов международной конференции*. (Донецк, 26-29 мая, 2013 г.). Киев: ИМФ, 2013. □С. 307-312.

43. **Павленко Д. В.** Структура и свойства титановых сплавов, полученных по технологии интенсивного уплотнения спеченных полуфабрикатов. *Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів*: матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф. (Запоріжжя, 7-9 жовтня 2014 р.). Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. С. 22-24.

44. **Павленко Д. В.** Ресурсосберегающая технология изготовления нагруженных титановых деталей авиационных двигателей. *Теоретические и прикладные проблемы создания авиационных двигателей и энергетических установок*: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Запорожье, 16-17 октября 2014 г.). Запорожье: АО "Мотор Сич", 2014. С. 76-78.

45. **Павленко Д. В.,** Овчинников О. В. Ресурсосберегающая технология получения деформированных полуфабрикатов для авиационной техники на основе метода интенсивной пластической деформации. *New technologies and achievement in metallurgy, material engineering and production engineering*: materials of XVI International scientific conference. Czestochowa, 2015. P. 205-208.

46. **Павленко Д. В.,** Гавриленко А. А. Формирование субмикроструктурной структуры в заготовках из спеченных титановых сплавов. *Людина і Космос*: матеріали XVII Міжнар. молод. наук.-практ. конф. (Дніпропетровськ, 8-10 квітня 2015 р.). Дніпропетровськ: НЦАОМ ім. О.М. Макарова, 2015. С. 356.

47. Панин В. В., **Павленко Д. В.** Закономерности порообразования при получении полуфабрикатов спеченных титановых сплавов. *Людина і Космос*: матеріали XVII Міжнар. молод. наук.-практ. конф. (Дніпропетровськ, 8-10 квітня 2015 р.). Дніпропетровськ: НЦАОМ ім. О.М. Макарова, 2015. С. 383.

48. **Павленко Д. В.,** Бейгельзимер Я. Е., Кулагин Р. Ю., Давиденко А. А., Распорня Д. В. Массоперенос при винтовой экструзии как важный фактор обеспечения качества порошковых полуфабрикатов для ответственных деталей ГТД. *Титан-2016: производство и применение в авиационной промышленности*: материалы IV науч.-техн. конф. молод. ученых и специалистов. (Запорожье, 3-4 ноября 2016 г.). Запорожье: АО "Мотор Сич", 2016. С. 119-123.

49. **Павленко Д. В.,** Прибора Т. И., Коцюба В. Ю., Пахолка С. Н. Перспективные материалы и технологии для деталей ротора компрессора ГТД. *XXI міжнародний конгрес двигунобудівників*. Харків: Нац. аерокосмічний ун-т "ХАІ", 2016. С. 71.

50. **Павленко Д. В.** Ресурсосберегающая технология получения сложнолегированных сплавов. *Приборостроение-2016*: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 23-25 ноября 2016 г.). Минск: БНТУ, 2016. С. 121-122.

51. **Павленко Д. В.** Ресурсосберегающая, импортозамещающая технология производства полуфабрикатов сложнолегированных титановых сплавов. *Титан-2016: производство и применение в авиационной промышленности*: материалы IV науч.-техн. конф. молод. ученых и специалистов. (Запорожье, 3-4 ноября 2016 г.). Запорожье: АО "Мотор Сич", 2016. С. 60-64.

52. Бейгельзимер Я. Е., **Павленко Д. В.,** Тарасов А. Ф., Коцюба В. Ю., Кулагин Р. Ю., Давиденко А. А. Простой сдвиг в обработке материалов давлением. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової*

освіти: матеріали ІХ Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ-Херсон, 28 травня – 1 червня 2018 р.). Київ: НТУУ "КПІ", 2018. С.28-30.

53. **Павленко Д. В.**, Щетініна М. О. Закономірності пороутворення в титанових сплавах, синтезованих з порошків. *XI Междунар. молод. науч.-техн. чтения им. А.Ф. Можайского*. (Запорожье-Приморск, 14-17 мая 2018 г.). Запорожье: АО "Мотор Сич", 2018. С. 203-204.

54. **Павленко Д. В.**, Тарасов О. Ф., Лоскутов С. В., Щетініна М. О. Прогресивна технологія виготовлення лопаток компресору ГТД з використанням інтенсивної пластичної деформації та устаткування для її реалізації. *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали ХІХ міжнар. наук.-техн. конф.* (Київ, 19-22 червня 2018 р.). Київ: НТУУ "КПІ", 2018. С. 22-24.

55. Kulagin R., Estrin Y., Beygelzimer Y., Mazilkin A., **Pavlenko D.**, Hahn H. Features of nanostructured materials for micromanufacturing. *Materials Science and Engineering-2018 (MSE): European congress and exhibition on advanced materials and processes*. (Darmstadt, September 26-28, 2018). Darmstadt, 2018.

56. **Павленко Д. В.** Ресурсосберегающие технологии получения титановых сплавов для авиационно-космической техники. *China-Jiaxing Aerospace and Hundreds People's Association-2019 and 1-thYangtze River Delta Global Science and Technology Innovation Project Roadshow*. (Jiaxing, April 27-29, 2019). Jiaxing, 2019.

57. Щетініна М. О., **Павленко Д. В.** Гомогенізація спечених титанових сплавів інтенсивною пластичною деформацією. *XII Междунар. молод. науч.-техн. чтения им. А.Ф. Можайского*. (Запорожье-Приморск, 20-23 мая 2019 г.). Запорожье: АО "Мотор Сич", 2019. С. 125-127.

58. **Павленко Д. В.** Перспективы и пути применения интенсивной пластической деформации в аэрокосмической отрасли. *Нові сталі та сплави і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів: матеріали ХІV міжнар. наук.-техн. конф.* (Запоріжжя, 8-10 жовтня 2019 р.). Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. С. 26-28.

59. **Pavlenko D.**, Dvirnyk Y., Przysowa R. Advanced Materials and Technologies for Compressor Blades of Small Turbofan Engines. *10th EASN Virtual International Conference on Innovation in Aviation & Space to the Satisfaction of the European Citizens*. (September 2-4, 2020). P. 135.

Додатково наукові результати дисертації відображені в роботах:

60. Спосіб виготовлення заготовки з титанових сплавів для лопаток газотурбінних двигунів: пат. 81692 Україна, МПК С22F-1/18 (2006.01). № u201300173; заявл. 03.01.2013; опубл. 10.07.2013, Бюл. 13.

61. Спосіб виготовлення напівфабрикатів з суміші порошків на основі титану методом інтенсивної пластичної деформації: пат. 107549 Україна, МПК С22С 1/04 (2006.01), В22F 3/00, С22F 1/16. № u201512866; заявл. 25.12.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. 11.

62. Штамп для пресування заготовок з протитиском: пат. 104922 Україна, МПК В21D 22/02 (2006.01). № u201508328; заявл. 25.08.2015; опубл. 25.02.2016, Бюл. 4.

63. Спосіб багатоетапного пресування заготовок пластичним середовищем (фальш-заготовкою): пат. 110125 Україна, МПК В21D 22/02 (2006.01), В21С 23/32 (2016.01) В21J 5/00. № u201603315; заявл. 30.03.2016; опубл. 26.09.2016, Бюл. 18.

Особистий внесок здобувача в роботах, що опубліковані у співавторстві:

[1] – встановлення залежностей зміни властивостей зразків від структурного стану; [2] – формулювання ідеї та основних технічних рішень; [3] – дослідження структури та властивостей; [4] – дослідження структури, пористості та властивостей, формулювання висновків; [5, 39] – дослідження якості поверхневого шару; [6] – дослідження структури, обґрунтування ролі протитиску при деформуванні гвинтовою екструзією; [7, 48] – теоретичне обґрунтування мультимасштабних вихорів, дослідження розподілу хімічних елементів, встановлення основних ефектів; [8] – встановлення та обґрунтування залежностей теплофізичних властивостей від температури; [10] – аналіз ущільнення заготовок, оцінка граничного ущільнення і величини протитиску, дослідження твердості; [12] – дослідження структури, хімічного і фазового складу, міцнісних характеристик, твердості і розподілу легуючих елементів, формулювання висновків; [13, 59] – термогазодинамічний розрахунок, оцінка міцнісної надійності титанових лопаток; [14, 15, 42, 45] – формулювання ідеї дослідження, аналіз структури і розподілу легуючих елементів, висновки; [16] – випробування на втому, побудова та аналіз кривих втоми, висновки; [20] – аналіз схем отримання титанових напівфабрикатів, висновки; [25] – систематизація методів деформування, чисельне моделювання, обґрунтування вимог до технологічного оснащення, розробка схеми установки; [27] – дослідження структури, висновки; [28] – термічна обробка, дослідження структури, висновки; [31] – обґрунтування вимог до умов деформування титанових сплавів ГЕ; [32] – технічні рішення і конструктивні заходи щодо вдосконалення конструкції технологічного оснащення для реалізації процесу ГЕ титанових сплавів; [37, 54] – формулювання ідеї дослідження, аналіз структури технології виготовлення лопаток, висновки; [46, 47, 53, 56] – формулювання ідеї, дослідження якості заготовок, висновки; [49] – формулювання ідеї, оцінка запасу міцності, висновки; [52] – обґрунтування ролі простого зсуву при деформації ГЕ; [55] – оцінка ефективності застосування деформації для титанових сплавів; [60, 61] – обґрунтування принципів формування розмірів зерен, розробка способу виготовлення; [62] – аналіз умов деформації, розробка конструкції штампа; [63] – розробка способу пресування.

АНОТАЦІЯ

Павленко Д.В. Розвиток наукових основ і удосконалення процесів виготовлення деталей з порошкових матеріалів для газотурбінних двигунів із застосуванням інтенсивної пластичної деформації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском. – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2021.

Дисертація спрямована на розв'язання важливої науково-прикладної проблеми підвищення якості заготовок з порошкових матеріалів обробкою тиском. Встановлені проблеми обробки тиском титанових порошкових заготовок та шляхи їх вирішення. Визначено характеристики якості порошкових заготовок. Обґрунтовано необхідність застосування методів обробки їх тиском та структуру технологічного процесу виробництва напівфабрикатів із застосуванням гвинтової екструзії. Досліджено основні ефекти, що відбуваються під час інтенсивної пластичної деформації порошкових заготовок, та процеси структуро- і текстуроутворення, зміни теплофізичних та механічних властивостей, технологічної пластичності й здатність до зміцнення. Розроблено рекомендації щодо удосконалення процесу гвинтової екструзії, технологічного обладнання та оснащення. Оцінено економічний та екологічний ефекти.

Ключові слова: наукові основи, пластична деформація, гвинтова екструзія, порошкові матеріали, режим, залежність, заготовка, напівфабрикат, структура, властивості, лопатка.

ABSTRACT

Pavlenko D.V. Development of scientific bases and improvement of processes of manufacturing parts of powder materials for gas turbine engines with the use of severe plastic deformation. –Scientific qualification work with manuscript copyright.

Thesis for the Doctoral degree of Technical Science in specialty 05.03.05 Processes and Machines of Plastic Working. – Donbas State Engineering Academy, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk, 2021.

The thesis aims at solving an important applied scientific problem of improving the quality of workpieces manufactured from powder materials by pressure treatment.

Problems of pressure treatment of titanium powder blanks and the ways of their solving are defined. The characteristics of powder blanks quality were determined. The research substantiates the necessity of applying the methods of pressure treatment of workpieces. The structure of the technological process to produce semi-finished products and the use of twist extrusion deformation have been substantiated. The main effects that occur during severe plastic deformation of powder workpieces were investigated. The structure and texture formation processes, changes in thermophysical and mechanical properties, technological plasticity and the ability to strengthen were studied. Recommendations for improving the process of twist extrusion, technological equipment and tooling have been developed. The economic and environmental effects were estimated.

Key words: scientific basis, plastic deformation, twist extrusion, powder materials, regimens, relation, billet, semi-finished, structure, properties, blade.

АННОТАЦИЯ

Павленко Д.В. Развитие научных основ и совершенствование процессов изготовления деталей из порошковых материалов для газотурбинных двигателей с применением интенсивной пластической деформации. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением. – Донбасская государственная машиностроительная академия, Министерство образования и науки Украины, Краматорск, 2021.

Диссертация направлена на решение важной научно-прикладной проблемы повышения качества заготовок из порошковых материалов обработкой давлением с целью расширения номенклатуры деталей газотурбинных двигателей, изготавливаемых методами порошковой металлургии.

Установлены проблемы обработки давлением порошковых заготовок, сдерживающие развитие энергоэффективных технологий производства деталей газотурбинных двигателей. Основными из них являются остаточная пористость, ликвации легирующих элементов и газовых примесей, снижающих их пластичность, что затрудняет обработку их давлением.

Рассмотрены пути развития технологий деформационной обработки порошковых материалов. Они основываются на совершенствовании процессов деформирования путем создания высокого уровня гидростатического давления в очаге деформации и активизации сдвиговой деформации. Отмеченным условиям соответствуют методы интенсивной пластической деформации.

Определены характеристики прочности, химический и фазовый составы, а также концентрации газовых примесей в порошковых заготовках из сложнолегированных титановых сплавов ВТ8 и ВТ6. На основании модели прочностной надежности лопаток компрессора ГТД установлены значения минимальной пористости и размера пор, при которых обеспечивается допустимый уровень запаса их прочности. Обоснована необходимость применения методов ОМД для заготовок лопаток компрессора из порошковых материалов с целью устранения остаточной пористости, гомогенизации химического состава и повышения уровня механических свойств и термической обработки для формирования структуры материала равноосного, бимодального типа.

Исследована эффективность применения различных методов интенсивной пластической деформации титановых порошковых заготовок. Установлено, что винтовая экструзия является наиболее рациональным способом деформационной обработки, позволяющим решать весь комплекс задач, связанный с повышением качества заготовок из порошковых материалов. Обоснована рациональная структура технологического процесса производства полуфабрикатов с субмикроструктурной структурой из порошковых материалов на основе интенсивной пластической деформации. Исследованы основные эффекты интенсивной пластической деформации порошковых заготовок: уплотнение, гомогенизация, фрагментация структурных составляющих, упрочнение. Установлены механизмы их реализации при обработке винтовой экструзией. Основным из них является

возникновение множественных вихрей в плоскости простого сдвига, приводящих к массопереносу материала и, как следствие, перемешиванию. Это способствует устранению ликваций легирующих элементов и газовых примесей. Исследованы процессы структуро- и текстурообразования, изменения теплофизических и механических свойств, технологической пластичности и способность к упрочнению в спеченных заготовках при винтовой экструзии. Это позволило развить научные основы обработки давлением титановых сплавов в субмикроструктурном состоянии.

Разработаны рекомендации по совершенствованию процесса винтовой экструзии титановых заготовок, технологического оборудования и оснастки для его реализации. На основании моделирования процесса винтовой экструзии заготовок из порошковых материалов с учетом возможности уплотнения и разуплотнения твердой фазы определены требования к режимам обработки, обеспечивающие возможность деформации без разрушения. Установлены основные особенности проектирования винтовых матриц для обеспечения возможности пластического восстановления формы заготовки после каждого цикла деформации, что позволяет выполнять многоцикловую обработку и накапливать большие деформации. Рекомендации по совершенствованию оборудования и оснастки для винтовой экструзии позволили обрабатывать сложнолегированные титановые сплавы в полуавтоматическом цикле и повысить их качество. На основании численного моделирования определены ступени компрессора малоразмерного ГТД, для которых могут быть использованы заготовки лопаток из порошковых материалов, обработанные винтовой экструзией. Исследование параметров качества заготовок опытной партии лопаток компрессора из сплава ВТ8 позволили установить их соответствие нормативным документам к заготовкам лопаток ГТД и подтвердить результаты моделирования.

Оценены экономический и экологический эффекты, полученные от внедрения усовершенствованного процесса изготовления заготовок деталей из порошковых материалов для ГТД.

Ключевые слова: научные основы, пластическая деформация, винтовая экструзия, порошковые материалы, режим, закономерность, заготовка, полуфабрикат, структура, свойства, лопатка.

Підписано до друку 01.04.2021 р.
Формат 60x90/16. Папір офсетний. Друк – цифровий.
Умовн. друк. арк. 1,9. Тираж 100 прим. Зам. № 1032 2021 р.

АТ «МОТОР СІЧ»

пр. Моторобудівників, 15, м. Запоріжжя, 69068

Тел.: 061-720-42-49

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4213 від 22.11.2011 р.

