Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота магістра

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень
(другий (магістерський) рівень)

на тему Аналіз способів виготовлення імплантів порошковими методами обробки тиском

Виконав: студент _2_курсу, гр. *8.1363-омт-дн*
___Степанян С.В._____
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
*Обробка металів тиском*_____
(шифр і назва)

Керівник _Карпенко Г.В._____
(прізвище та ініціали) (підпис)
Рецензент _Воденнікова О.С._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Рівень вищої освіти *другий (магістерський) рівень*
(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність *136 металургія*
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма *Обробка металів тиском*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*
Ю.О. Бєлоконь

"___" _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Степаняну Сергію Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) Аналіз способів виготовлення імплантів порошковими методами обробки тиском

керівник роботи (проєкту)*Карпенко Ганна Володимирівна, канд. техн. наук*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "28" лютого 2024 року № 359-с

2. Строк подання студентом роботи (проєкта). *19.02.2025*

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *науково-технічна література, періодичні видання за фахом, патентний пошук.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*: 1 Сучасний стан в області порошкових технологій. 1.1 Виробництво виробів складної форми із металевих матеріалів. 1.2 Особливості технологій виготовлення композитів із сплавів титану методом порошкової металургії. 2 Матеріали, техніка та методики дослідження. 2.1 Матеріали дослідження. 2.2 Лабораторно-технічне обладнання. 3 Наукові основи формування заготовок з порошків титану 3.1 Метод пресування порошків титану у закритих прес-формах. 3.2 Вплив пластифікаторів та оксидних плівок на пресування брикетів із порошків титану. 3.5 Формування матеріалу на основі титану методами порошкової металургії. 4 Охорона праці та техногенна безпека. 4.1 Небезпека порошкового титану.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *Креслення, презентаційний матеріал 10 слайдах (на 10 сторінках)*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
1 Сучасний стан в області порошкових технологій	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
2 Матеріали, техніка та методики дослідження.	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
3 Наукові основи формування заготовок з порошків титану	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
4 Охорона праці та техногенна безпека	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., зав. кафедрою*	

7. Дата видачі завдання: *01.03.2024 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*		
2	*Реферат*		
3	*Сучасний стан в області порошкових технологій*		
4	*Матеріали, техніка та методики дослідження.*		
4	*Наукові основи формування заготовок з порошків титану*		
5	*Охорона праці та техногенна безпека*		

Студент _____ *С.В. Степанян*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ *Г.В. Карпенко*
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної робота магістра: 84 с., 12 табл., 19 рис., 34 джерела.

ПОРОШОК, ТИТАН, ПРЕСУВАННЯ, ІМПЛАНТ, ТИСК ПРЕСУВАННЯ, ПОРУВАТІСТЬ, ЩІЛЬНІСТЬ ПРЕСОВКИ, ПОРОШКОВА МЕТАЛУРГІЯ

Об’єкт дослідження – методи обробки тиском порошкові титану.

Предмет дослідження – порошок титану .

Мета роботи – дослідити процеси пресування порошків титану у закритих прес-формах.

Методики дослідження – розроблені та стандартні методики виготовлення компакт-дисків методом пресування, визначення щільності зразків та побудова кривих ущільнення

В результаті проведених досліджень побудовано криву ущільнюваності порошкового титану технічної чистоти та проведено теоретичний розрахунок цієї кривої з урахуванням закону зміцнення твердої фази та еволюції порового простору.

Проаналізовано зміну твердості за глибиною порошинок у пресуваннях з різною пористістю. Встановлено, що в щільних пресування деформація розподілена більш рівномірно по всьому перерізу порошинки, ніж в пористих, де вона зосереджена переважно в приповерхневих шарах.

В розділі з охорони праці та техногенної безпеки проведено всебічний аналіз основних факторів безпеки при виробництві та використанні порошків титану. Розглянуті заходи щодо запобігання спалахам та вибухам порошків титану та проведений розрахунок заземлення будівлі в якому розташована лабораторія де проводились дослідження.

ЗМІСТ

ВСТУП…….. 7
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН В ОБЛАСТІ ПОРОШКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ…… 9
1.1 Виробництво виробів складної форми із металевих матеріалів……. 9
1.2 Особливості технологій виготовлення композитів із сплавів титану методом порошкової металургії……. 18
1.3 Стан теорії обробки тиском порошкових матеріалів……. 28
1.4 Постановка завдання дослідження…….. 31
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ, ТЕХНІКА ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ 32
2.1 Матеріали дослідження…….. 32
2.2 Лабораторно-технічне обладнання…… 32
2.3 Виготовлення компакт-дисків методом пресування…… 34
2.4 Визначення щільності зразків……. 34
2.5 Побудова кривих ущільнення…… 36
РОЗДІЛ 3 НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКІВ ТИТАНУ……... 38
3.1 Метод пресування порошків титану у закритих прес-формах…… 38
3.2 Вплив пластифікаторів та оксидних плівок на пресування брикетів із порошків титану…… 43
3.3 Вплив гранулометричного складу порошків на процес пресування.. 46
3.4 Вплив виду прес-форм, схеми пресування та характеристик пресів на пористість брикетів……. 50
3.5 Формування матеріалу на основі титану методами порошкової металургії…… 54
Висновки до розділу 3……... 60
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА……. 61
4.1 Небезпека порошкового титану……. 62
4.2 Заходи щодо запобігання спалахам і вибухам порошків титану…… 69

4.3 Розрахунок заземлення будівлі…… 71
4.4 Пожежна та техногенна безпека…… 75
Висновки до розділу 4…….. 78
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……. 79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ……. 81

ВСТУП

Титан використовують в авіації, космічній техніці, автомобілебудуванні, енергетиці та інших галузях промисловості. Це зумовлено його унікальними властивостями: легкістю, міцністю, корозійною стійкістю та ін. Титанові сплави є перспективним матеріалом для багатьох сфер застосування та мають потенційні можливості їхнього широкого використання для виготовлення деталей машин [1].

При виробництві виробів із титанових сплавів для скорочення матеріаломісткості та обсягу механічної обробки широко застосовуються методи порошкової металургії [2-4]. Титан і титанові сплави часто використовують із виготовлення композитів. Встановлено, що пластичне деформування є основою процесів виготовлення композитних виробів методами порошкової металургії. Саме процеси пластичної деформації визначають структуру та фізико-механічні властивості виробів. Вже на стадії проектування технологічних процесів пластичної формозміни заготовок можуть бути розглянуті багато варіантів удосконалення технологічних процесів, виключені свідомо невдалі та обраний оптимальний варіант процесу пластичного деформування. Огляду порушених проблем присвячена розглянута глава

Порошкові матеріали використовуються у багатьох наукових та технічних областях. Залежно від сфери застосування та необхідних властивостей виробу використовуватися різні типи порошкових матеріалів: метали, сплави, кераміка, скло, полімер та безліч варіантів композиційних матеріалів.

Розглянемо кілька прикладів застосування порошкових матеріалів.

Гальмівні колодки літаків та двигунів, сплави з високою щільністю, тверді сплави, надтверді зносостійкі деталі не можуть бути виготовлені за допомогою звичайних процесів лиття або кування, оскільки вони містять велику кількість неметалічних компонентів. Вони можуть бути виготовлені

лише з порошку. Порівняно з відповідними ливарними сплавами Cu-Cr-X, сплав Cu-Cr-Mg, що виробляється засобами порошкової металургії, поєднує в собі чудові механічні властивості та відмінну електропровідність. Ці характеристики тісно пов'язані з більш однорідною та дрібнішою мікроструктурою, отриманою в процесі порошкової металургії. [14]. Сплави Al-Mn, отримані методом порошкової металургії, мають більш високу термічну стабільність, ніж екструдовані вироби зі сплаву Al-Mn при традиційній металургії злитків. [15]

Композитне покриття з порошкового сплаву на основі алюмінію та поліуретану має гарну зносостійкість та корозійну стійкість [5], а алюмінієві сплави широко використовуються в аерокосмічній, автомобільній та інших областях [6-10].

Порошкові технології мають низку переваг, серед яких суттєве зниження енергоспоживання, економне використання сировини, висока продуктивність, точність геометричних параметрів та стабільність якості виробів, що особливо ефективно для серійного виробництва. Крім того, ця технологія дає змогу виготовляти складні деталі та матеріали, які недосяжні для традиційних методів лиття або механічної обробки. Завдяки застосуванню порошків можна гнучко регулювати пористість і склад матеріалів, адаптуючи їх під конкретні технічні вимоги.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН В ОБЛАСТІ ПОРОШКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Виробництво виробів складної форми із металевих матеріалів

Вибір раціональної технології виробництва для будь-якого продукту або деталі може дозволити виробляти високоякісну продукцію у найкоротший термін. Існує безліч методів виробництва металевих виробів складної форми, і кожен із них має свої переваги та недоліки. У процесі літературного огляду буде обрано метод, що найбільше підходить для виробництва невеликих партій виробів складної та/або індивідуальної форми з металевих матеріалів високої якості, а також з точки зору економічної вигоди.

Токарно-фрезерна обробка на верстатах із ЧПУ – це автоматизований процес виготовлення деталей відповідно до заздалегідь створеної програми. Оператор формує технологічний маршрут обробки, задає параметри процесу, траєкторію руху інструмента, зміщення, режими різання та допоміжні функції. Усі ці дані оформлюються у вигляді програми відповідно до інструкцій та форматів, передбачених системою ЧПУ. Потім програму завантажують у блок управління верстата для подальшого виконання. Виготовлені заготовки повинні відповідати високим стандартам якості поверхні та структури, що впливає на собівартість кінцевого виробу. З економічного погляду верстати з ЧПУ найбільш підходять для обробки наступних деталей:

Деталі складної форми з високими вимогами до точності, які неможливо обробити або важко обробити на звичайних верстатах (рис.1.1);

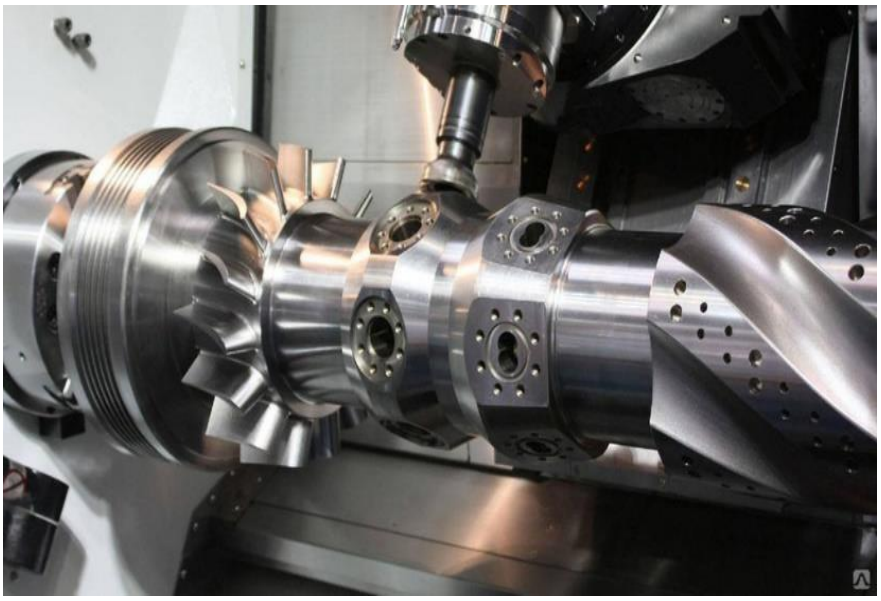


Рисунок 1.1 – Обробка складних металевих деталей на верстатах з ЧПУ

Деталі, які потребують мінімального виробничого циклу

Переваги:

Стабільно висока точність обробки.

Верстат відрізняється високим ступенем автоматизації, що дозволяє знизити трудомісткість.

Недоліки:

Висока вартість обладнання.

Високі вимоги до заготівлі.

Підвищені технічні вимоги до оператора та обслуговуючого персоналу.

Лиття. Лиття – це технологія обробки металів, яку людство освоїло однією з перших, цей метод існує вже близько 6000 років. Лиття є одним із основних процесів сучасної металургійної галузі. Лиття - це процес, при якому розплавлений метал, заливається в ливарну порожнину, необхідної форми, після охолодження та кристалізації деталь або заготівля витягується з форми. Литтям можна виготовляти вироби заданої форми, розміру та

механічних характеристик. Матеріалом форми може бути пісок, метал або кераміка. Залежно від матеріалу та вимог до виробу, технологія та режими лиття можуть змінюватись. Оскільки відлита заготівля має форму та розміри близькі до заданих, можна уникнути або мінімізувати обсяг додаткової токарно-фрезерної обробки, що знизить вартість та до певної міри скоротить час виробництва.

Лиття дозволяє використовувати практично будь-який метал для виготовлення складних деталей із високою якістю поверхні. Однак існує безліч процесів лиття, і виробничий процес важко контролювати, тому відсоток шлюбу відносно високий (рис.1.2).

Слід зазначити, що процес плавки дуже впливає на властивості і можливе виникнення дефектів структури (пористість, уловлювання газу, порожнечі та усадки). Більшість кольорових сплавів схильні до утворення пір і включень, які знижують характеристики виробів, особливо це актуально для титанових, алюмінієвих, магнієвих і деяких мідних сплавів [11].

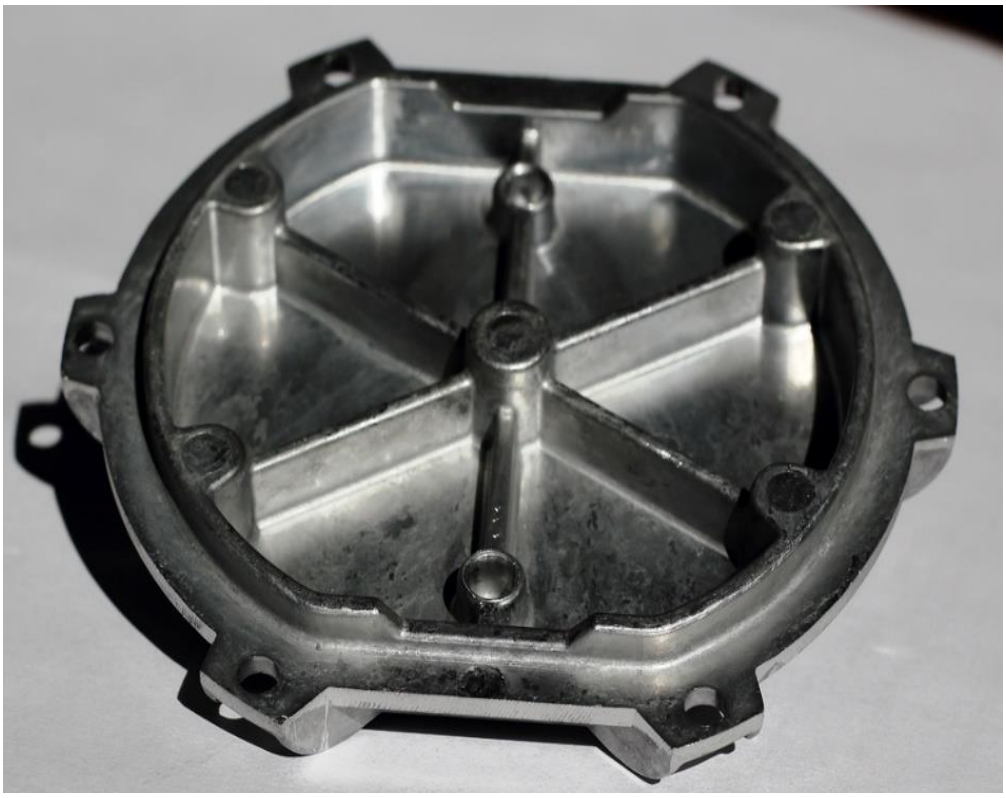


Рисунок 1.2 – Лиття алюмінію під тиском

Переваги:

Створення деталей зі складною геометрією та порожнистими структурами, які важко або неможливо реалізувати традиційними методами.

Висока продуктивність можна відливати вироби від декількох грамів до сотень тон.

Широкі сировинні ресурси та відносно низька ціна готової продукції.

Недоліки:

Висока вартість прес-форм та обладнання.

Механічні властивості зразка нестабільні, як у поковок, наприклад, груба структура, багато дефектів і т.д.

Якість виливків нестабільне, обумовлене великою кількістю факторів, вплив яких важко оцінити.

Велика кількість технологічних стадій виробництва.

Високі витрати енергії на плавлення сировини.

Селективне лазерне спікання (SLS) — це сучасний метод тривимірного друку, у якому лазер використовується як джерело енергії для спікання порошкових матеріалів. Під час процесу у робочу зону наноситься та вирівнюється тонкий шар порошку, після чого лазерний промінь вибірково спікає матеріал відповідно до заданого поперечного перерізу моделі. Потім наноситься наступний шар порошку, і процедура повторюється до повного формування деталі. По завершенню надлишковий порошок видаляється, а готовий виріб вилучається з робочої камери.

На сьогодні широко освоєні технології друку з використанням воскових і пластикових порошків, тоді як процеси спікання металевих та керамічних порошків досі активно досліджуються. Основними матеріалами для SLS залишаються різні порошкові склади, включно з полімерними, металевими та композитними.

Технологія SLS має широкий спектр застосувань, зокрема у виробництві деталей для силових установок, у машинобудуванні, авіакосмічній галузі та інших сферах промисловості. Останнім часом цю

технологію застосовують для створення арт- та дизайнерських проектів. Схему методу наведено рисунку 1.3.

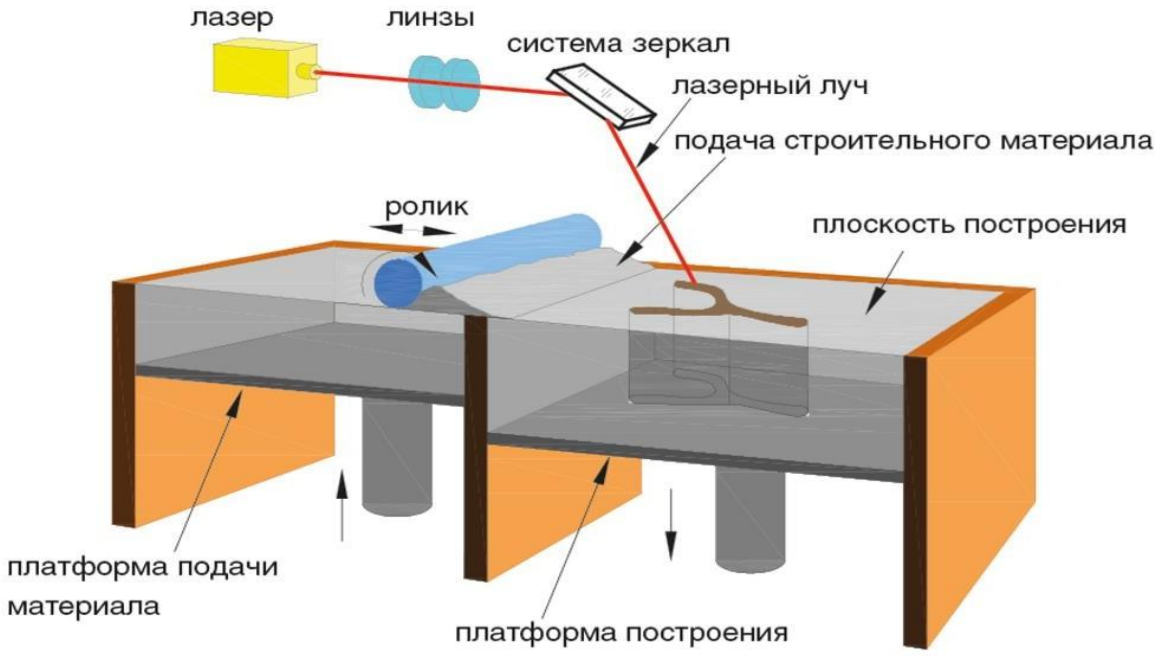


Рисунок 1.3 – Схема селективного лазерного спікання [13]

Метод дозволяє виготовляти деталі практично будь-якої форми з високою точністю — до 0,1 мм. Завдяки можливості створення складних геометричних конструкцій, включно з внутрішніми порожнинами та тонкими стінками, селективне лазерне спікання широко застосовується для виробництва функціональних прототипів та кінцевих виробів у різних галузях промисловості (рисунок 1.4).



Рисунок1.4 – Деталі з металу та кераміки, отримані селективним лазерним спіканням

Переваги:

Широкий вибір матеріалів.

Метод забезпечує можливість виготовлення металевих виробів складної форми, які потребують мінімального обсягу додаткової механічної обробки. Висока точність процесу та шарове формування дозволяють отримувати деталі зі складною геометрією, тонкими стінками та внутрішніми порожнинами, що значно скорочує час і витрати на фінішну обробку.

Недоліки:

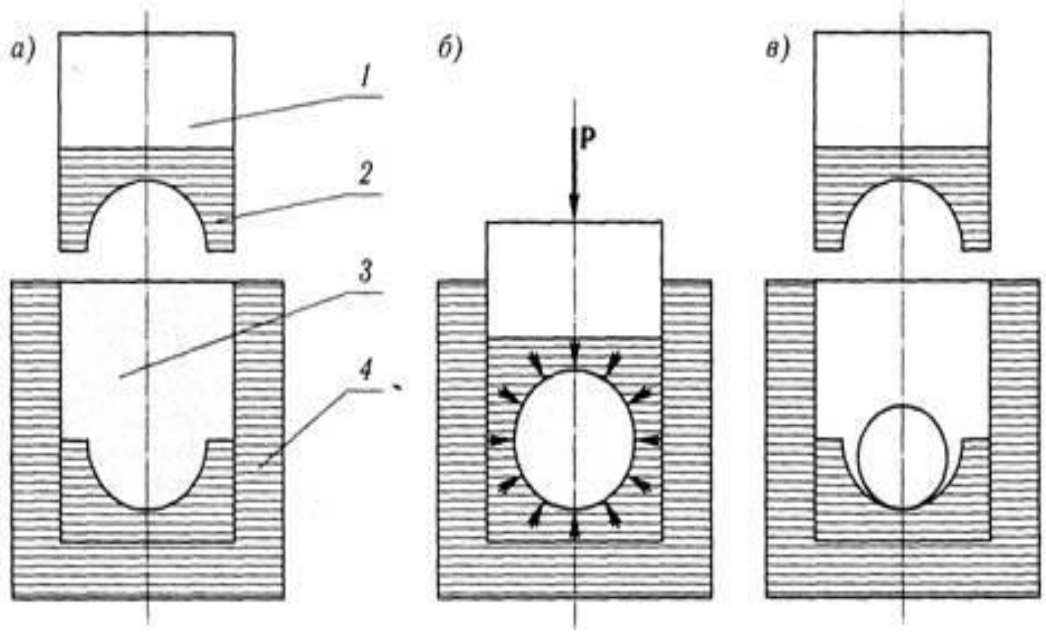
Сировина використовується в повному обсязі.

Висока вартість обладнання.

Шорстка поверхня виробу.

Квазіізостатичне пресування — це перспективний метод виготовлення виробів складної або індивідуальної форми з різноманітних порошкових матеріалів. Відмінність цього методу від традиційного ізостатичного пресування полягає в тому, що для передачі тиску порошковому тілу використовується не рідина або газ, а квазірідина. Вона

поміщається у сталеву прес-форму для одновісного, одностороннього пресування (рисунок 1.5).



а - завантаження прес-форми, б - стадія пресування, - повернення пуансона у вихідне положення, 1 - металевий штамп, 2 - еластична прес-форма, 3 - прес-порошок, 4 - матриця.

Рисунок 1.5 – Схема квазіізостатичного пресування сферичної заготівлі

Середовищем, яке передає тиск, слугують еластичні або пластичні матеріали, такі як гума, синтетичний каучук чи термопластичні полімери. Ущільнення порошку відбувається завдяки стисненню еластичної оболонки, розміщеної в жорстку закриту прес-форму. Під дією об’ємної деформації еластичний елемент передає тиск на порошкове тіло подібно до рідини з високою в’язкістю (квазірідини). Таким чином, тиск рівномірно розподіляється по всій поверхні компакту, забезпечуючи всебічне ущільнення.

Отримані за цією технологією пресування відзначаються високою однорідністю щільності у різних перерізах виробу. Водночас незначні перепади щільності можуть спостерігатися від периферії до центру через те, що зовнішні шари ущільнюються швидше, частково перешкоджаючи передачі тиску у глибину матеріалу. Завдяки всебічному обтиску

пресованого матеріалу досягається рівномірний розподіл щільності у всьому об’ємі, що, своєю чергою, забезпечує стабільну та рівномірну усадку виробів під час спікання.

Серед різних методів ізостатичного пресування цей метод є найбільш економічним, тому що КВП не потрібно використовувати дороге обладнання, а використовується звичайна сталева прес-форма та еластична оболонка з гуми або поліуретану. Конструкція та виготовлення прес-форми (аналогічно прес-формі статичного тиску) значно спрощені. Термін служби гумової мембрани при гідростатичному тиску становить 250 циклів, а поліуретанового буфера тиску – понад 1 мільйон циклів [17].

Ефективним методом формування різноманітних матеріалів, таких як кераміка, метали, графітовий порошок, кремнієве мікрокристалічне скло, ферити, абразивні та вогнетривкі вироби, є пресування.

Переваги:

Легкість та швидкість виготовлення еластичних оболонок: Еластичні оболонки, які використовуються в процесі пресування, виготовляються легко та швидко. Це дозволяє зменшити час на підготовку до виробничого процесу та підвищити його ефективність. Крім того, ці оболонки здатні витримувати значну кількість циклів пресування, що забезпечує їх довговічність та економічну вигідність.

Універсальність прес-форми: Пресування відбувається у сталевій прес-формі для одновісного одностороннього пресування. Ця форма є універсальним інструментом, що дозволяє виготовляти вироби різної конфігурації. Заміна прес-форми потрібна лише у випадку значного збільшення об'єму виробу, що робить її використання економічно ефективним.

Висока рівномірність розподілу густини: Вироби, отримані методом пресування в еластичних оболонках, мають високу рівномірність розподілу густини за об'ємом. Це забезпечує однорідність структури матеріалу та покращує його механічні властивості.

Широка номенклатура виробів: Метод пресування в еластичних оболонках дозволяє виготовляти широкий спектр виробів різної форми та розмірів. Це робить його універсальним та дозволяє задовольнити потреби різних галузей промисловості.

Автоматизація процесу: Процес пресування в товстостінних оболонках легко піддається автоматизації. Автоматизація дозволяє підвищити продуктивність, зменшити вплив людського фактора та забезпечити стабільність якості виробів.

Недоліки:

Нелінійна деформація оболонки при пресуванні, яка є причиною спотворення форми компакт-дисків і може стати причиною їх руйнування.

Головний недолік пресування в еластичних оболонках полягає в тому, що внутрішня порожнина оболонки може деформуватися та викривлятися під час процесу. Для простих форм це не становить проблеми, оскільки зміни можна передбачити. Однак, коли йдеться про складні або розвинені поверхні, прогнозування стає надзвичайно складним, а іноді й неможливим. Крім того, нерівномірна деформація різних елементів оболонки може призвести до її пошкодження.

Шляхом порівняння методів, що використовуються для виробів складної форми з металевих матеріалів, можна зробити такі висновки.

Вибір технології для виготовлення металевих виробів складної форми - це завжди компроміс між різними факторами, такими як вартість, якість, продуктивність та сфера застосування. Саме тому існує безліч варіантів, кожен з яких оптимальний для певних умов.

Квазіізостатичне пресування є перспективним методом виготовлення металевих виробів складної та/або індивідуальної форми та має величезну економічну перевагу: використання сталевих прес-форм простої конструкції та недорогої сировини (поліуретан, гума) для еластичних оболонок. Еластична оболонка проста у виготовленні та витримує велику кількість циклів пресування, що робить КВП придатним для масового

виробництва.

Усі проблеми, описані вище, пов'язані з недостатньо розвиненою теоретичною базою та відсутністю апарату, що дозволяють коректно описувати та враховувати особливості поведінки системи «жорстка прес-форма – еластична оболонка – порошкове тіло». З цієї тематики опубліковано надзвичайно мало статей, а представлені роботи здебільшого присвячені отриманню виробів простої геометрії [18, 19].

1.2 Особливості технологій виготовлення композитів із сплавів титану методом порошкової металургії

У виробництві титанових виробів значна частина матеріалу перетворюється на стружку та інші відходи, що часто перевищують за вагою готову продукцію. Ці немагнітні відходи, маючи меншу щільність порівняно з чорними металами, створюють додаткові труднощі та витрати при транспортуванні, знижуючи ефективність використання транспортних засобів. Особливо проблематичною є стружка, яка становить значну частку від загальної маси металевих відходів. Її переробка ускладнюється великим об'ємом, забрудненням різноманітними речовинами та сторонніми включеннями. На жаль, лише незначна частина цієї стружки піддається переробці, тоді як більшість її утилізується неефективно, завдаючи шкоди економіці та екології.

Для переробки відходів машинобудівного виробництва, особливо стружки титанових сплавів, існує кілька ефективних методів. Один з них базується на використанні 10-15% стружки та 85-90% титанової губки для виготовлення витратних електродів. Технологічний процес включає в себе пресування компонентів з подальшим зварюванням брикетів в аргоновому середовищі [5-9].

Відома технологія виготовлення витрачаються електродів з кускових титанових відходів ливарного виробництва і брикетованої стружки шляхом

укладання у виливницю кускових відходів і стружкових брикетів з подальшою заливкою виливниці рідким однойменним сплавом, який заповнює порожнечі між шматками і брикет.

Відомий спосіб отримання електродів, що витрачаються шляхом заливання однойменним сплавом завантажених у виливницю титанових кускових відходів і стружкових брикетів (частка використання стружки в шихті становить 5-10%).

Заслуговує на увагу спосіб отримання електродів, що витрачаються, з металевої стружки, запропонований Гіршовим В.Л., Трещевським А.М. та ін [9], який включає дроблення та очищення стружки, вакуумно-термічну дегазацію при 550-650 оС, витримку 1-2 год. Стружкові брикети пресують і завантажують із зазором у виливницю, яку перед заливкою однойменним сплавом нагрівають до 400-45. Спосіб дозволяє використовувати 100% стружки при отриманні вторинних ливарних сплавів, виключити з процесу виготовлення електродів, що витрачаються, дорогу титанову губку, підвищувати механічну міцність електродів і покращувати якість вторинних сплавів за рахунок зменшення вмісту домішок впровадження. Винахід спрямовано на вирішення завдання, що полягає в 100% залученні стружки в металургійний переділ, виключення з процесу виготовлення електродів, що витрачаються, дорогої титанової губки, у підвищенні механічної міцності електродів і поліпшенні якості вторинних сплавів за рахунок зменшення вмісту домішок впровадження. Одержуваний продукт переробки випускається у формі електродів, що витрачаються, і застосовується при виробництві вторинних титанових сплавів, а також для легування сталей. Зокрема витрачається електрод використовується технології вакуумно-дугового переплаву для плавки титанових сплавів в зливки. Для досягнення підвищеної якості злитків використовують подвійний-потрійний переплав.

Виробництво титанових напівфабрикатів та заготовок базується на складній технологічній схемі, яка включає кілька етапів. Починаючи з виплавлення великих злитків методом вакуумної дугової плавки, процес

передбачає їх подальшу переробку на проміжну заготівлю шляхом кування, прокатки або пресування. Завершальним етапом є деформаційна, термічна та механічна обробка для отримання готових напівфабрикатів.

Поряд з багатьма перевагами ця технологія має такі недоліки:

утворення тугоплавких, зокрема газонасичених включень;

грубозерниста структура великогабаритних зливків, що використовуються для одержання напівфабрикатів;

Значні втрати матеріалу при виробництві титанових напівфабрикатів обумовлені великою кількістю технологічних операцій та обмеженими можливостями отримання заготовок, близьких за формою до готових деталей.

Використання порошкової металургії, особливо її сучасного гранульного варіанту, відкриває значні можливості для підвищення ефективності виробництва деталей з титанових сплавів. Цей метод дозволяє не тільки збільшити коефіцієнт використання матеріалу та зменшити металоємність конструкцій, але й значно скоротити кількість відходів при механічній обробці. Крім того, порошкова металургія забезпечує високу однорідність матеріалу та створює умови для отримання нових сплавів та мікроструктур [10].

Порошкова металургія відкриває унікальні можливості для виробництва деталей конструкційного призначення, особливо складної конфігурації або невеликих деталей, що виготовляються великими серіями. Цей метод дозволяє отримувати форми, близькі до готових виробів, з подальшим спіканням або гарячим пресуванням порошків, гарячою ковкою. Завдяки цьому досягається значна економія матеріалу та зменшення втрат на обробку. Крім того, порошкова металургія є незамінною для виготовлення пористих виробів та корозійностійких фільтрів, які не можуть бути виготовлені іншими методами [11].

Метод розпилення розплавленого металу або сплаву струменем стиснутого газу, рідини або механічним способом, зокрема з використанням

витратних електродів, є перспективним напрямком у виробництві порошків титану та його сплавів. Цей процес відрізняється високою продуктивністю, технологічністю та рівнем автоматизації, а також відносно низькими енерговитратами та екологічною безпекою. Крім того, розпилення розплаву дозволяє швидко наростити обсяги виробництва металевого порошку з заданими характеристиками за мінімальних витрат (включаючи капітальні) та використовувати як сировину відходи металообробки [12].

Хоча промислове виробництво розпорошених порошків почалося ще наприкінці 1930-х років, справжній розвиток ця галузь отримала лише в 1960-х роках. До цього часу виробництво порошків залишалося маломасштабним. Проте вже в 1960-х роках такі країни, як США, Канада, ФРН, Англія, Японія та Швеція активно розвивали виробництво розпорошених порошків. З 1978 року виробництво порошків диспергуванням широко використовувалося на підприємствах колишнього СРСР. Сьогодні світовий обсяг виробництва порошків диспергуванням розплавів постійно зростає, і на цей метод припадає близько 60-70% від загального обсягу виробництва порошків.

Розпилення є високоефективним методом виробництва порошків багатокомпонентних сплавів, що дозволяє отримувати матеріали з аморфною структурою. Ця структура забезпечує рівномірний хімічний склад композиції, навіть якщо вміст легуючих компонентів перевищує межу їх розчинності в основному компоненті сплаву. Крім того, порошки, отримані методом розпилення розплавів, мають оптимальну будову та тонку структуру кожної частинки, що формується завдяки кристалізації дисперсних крапель розплаву з високими швидкостями охолодження.

Порівняно з традиційним металургійним розпиленням, плазмове розпилення має ряд значних переваг. Серед них - відносна простота обладнання, широкий діапазон регулювання параметрів процесу, стабільність та легкість переналагодження. Крім того, плазмове розпилення дозволяє обробляти тугоплавкі матеріали та матеріали з особливими

властивостями, проводити термохімічну обробку безпосередньо під час розпилення, впливати на форму частинок (сферична, витягнута, плоска) та отримувати задану структуру з необхідними механічними властивостями. Нарешті, цей метод забезпечує отримання порошків заданого розміру, можливість створення будь-якої контрольованої атмосфери та компактність обладнання.

Гаряче ізостатичне пресування (ГІП) є добре вивченим та широко використовуваним методом отримання високоякісних деталей з розмірами, близькими до кінцевих. Цей технологічний процес застосовується для різних цілей, включаючи допресування спечених виробів, заліковування дефектів лиття, пресування порошкових виробів з досягненням остаточної щільності, дифузійне зварювання металів та виробництво композиційних матеріалів [13].

Основним компонентом обладнання для гарячого ізостатичного пресування (ГІП) є судини високого тиску, в яких створюється тиск стисненого інертного газу або рідини, що впливає на оброблюваний об'єкт. Вартість цього обладнання є суттєвим фактором, який необхідно враховувати при виборі методу виробництва.

Більше того, процес гарячого ізостатичного пресування у разі консолідації порошкових матеріалів складний і складається зі стадій:

розробка та виробництво металевої форми;

заповнення форми необхідним порошком;

вакуумування форми;

приміщення у прес ГІП;

підвищення температури та тиску;

витримка за необхідних технологічних параметрах;

охолодження преса та форми;

видалення отриманої деталі форми.

При виробництві виробів з титанових сплавів ГІП є дорогим та малопродуктивним способом, що змушує застосовувати інші методи

компактування. Серед яких можна виділити: гаряче, гаряче вакуумне, холодне, холодне ізостатичне пресування та інші. Для деяких областей застосування, наприклад для виробництва фільтрів з високою проникністю, доцільно застосовувати більш прості, порівняно з ГІП, технологічні схеми, які залучають до виробництва напівфабрикатів і виробів високоміцні титанові сплави отримані розпиленням плазмою.

Найбільш простим та легко здійсненним на виробництві методом виготовлення виробів із порошків є холодне компактування заготовок з їх подальшим спіканням [14]. Однак використання даного методу, наприклад, для виробництва виробів з порошків високоміцних сплавів титану зі сферичною формою частинок, має ряд недоліків. Оскільки одержувані компакти (брикети) мають невисоку сиру міцність і руйнуються межами частинок порошку або компактуються [2]. Створення композиційного матеріалу шляхом додавання модифікуючих компонентів дозволяє покращити консолідацію частинок та, відповідно, підвищити формувальність. Композитні матеріали, що складаються з двох або більше компонентів, які відрізняються за хімічним складом та мають властивості, що відрізняються від властивостей окремих компонентів, є неоднорідними на мікро-рівні та однорідними у статистичному сенсі на макро-рівні. Властивості композитів визначаються поєднанням компонентів, які повинні бути присутніми в нормованих кількостях. Такі матеріали часто мають унікальні властивості, наприклад, надпровідність, радіопрозорість та радіопоглинання, що робить їх придатними для теплового захисту космічних апаратів, а також для створення матеріалів з малим коефіцієнтом термічного розширення та високим модулем пружності [15-17].

Технологія пресування порошкових сумішей титану поєднує в собі економічну ефективність та достатні експлуатаційні характеристики готових виробів, що робить її привабливою для багатьох сфер застосування. (рис. 1.6) [18]. Властивості металокерамічного титану та його сплавів тісно пов'язані з тиском пресування, що відіграє вирішальну роль у процесах

пластичного деформування. (таблиця 1.1). Склад порошків, що використовуються як вихідні компоненти, має значний вплив на ущільнюваність порошків та формування властивостей виробів з титанових композитів. Міцність пресування визначається здатністю консолідації частинок, тобто утворенням твердофазних сполук між частинками, що мають істотні відмінності за хімічним складом і механічними властивостями, формою та станом поверхні [19-21].

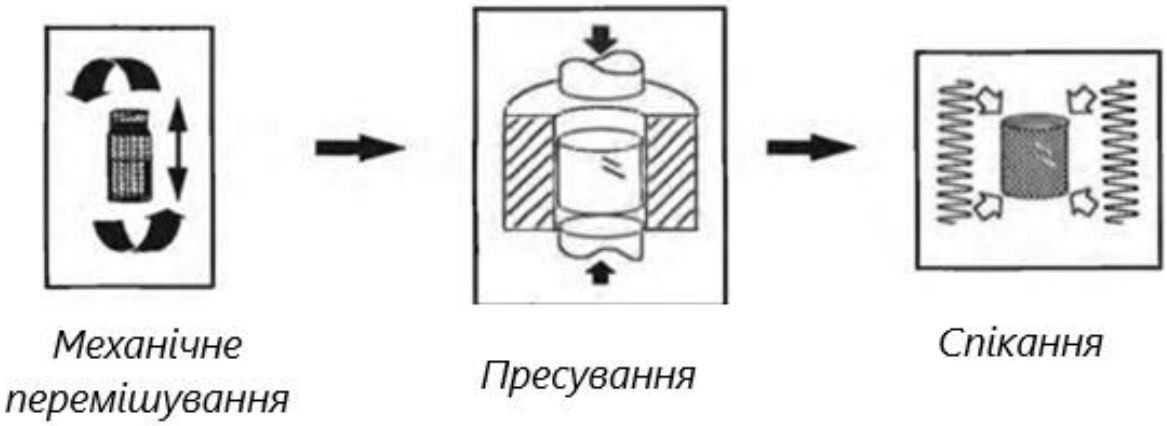


Рисунок 1.6 – Основні стадії одержання заготовок та виробів методом холодного пресування із порошкоподібної сировини

Таблиця 1.1 Залежність властивостей металокерамічного титану та її сплавів від тиску пресування [22]

Тиск пресування, МПа	Щільність зразка, %		ζв, МПа	ζт, МПа	ψ, %
	до спікання	після спікання			
Технічний титан					
500	87,0	90,5	400	310	15
800	93,5	95,0	490	370	24
900	94,7	97,0	510	390	25
Ti-2Al					
500	87,5	91,0	490	410	10
800	94,0	95,0	590	490	16
900	95,0	96,2	600	500	20

Продовження табл.1.1					
Ti-6Al-4V					
500	91,3	95,0	780	730	7
800	93,2	96,0	830	740	9
900	93,2	96,0	840	770	9

Виробництво заготовок, напівфабрикатів та виробів з механічної суміші порошків включає кілька ключових етапів: змішування порошків, холодне пресування та спікання. Крім того, можуть бути передбачені додаткові етапи, такі як вторинна та механічна обробка. Гнучкість технології полягає в тому, що деякі етапи можуть варіюватися або бути відсутніми, що дозволяє враховувати індивідуальні вимоги до виробів.

Для створення порошкової суміші, яка служить основою для формування виробів, компоненти піддаються механічному змішуванню. Зазвичай для цього використовуються млини. У процесі змішування частинки неправильної форми можуть набувати більш округлої, рівноважної форми. Перед змішуванням порошки титану проходять вхідний хімічний та ситовий контроль, а також обов'язкову магнітну сепарацію для видалення сторонніх магнітних включень [2].

Гранулометричний склад порошків є важливим фактором, що впливає на їх ущільнюваність. Підвищення мікротвердості частинок порошку та зменшення величини контактної поверхні призводять до необхідності збільшення тиску пресування. Крім того, наявність домішок у порошках та відповідне зростання твердості зумовлюють зниження характеристик пластичності. Тому необхідний диференційований підхід до використання титанових порошків різних способів виробництва, що мають різну твердість. Зокрема, порошки з твердістю до 150 НВ рекомендується використовувати для виробництва конструкційних деталей, тоді як порошки з вищою твердістю краще підходять для отримання пористих виробів та використання в якості наповнювача в антикорозійних покриттях.

Існує ряд факторів, що сприяють підвищенню міцності та ущільнюваності брикетів, серед яких важливим є використання зв'язки з більш пластичного матеріалу. Проте, застосування дорогих матеріалів зв'язки (матриці) може значно покращити механічні характеристики композиту. У зв'язку з цим, постає завдання вибору оптимального співвідношення матеріалів матриці та наповнювача з урахуванням економічної доцільності технологічного процесу[23].

У виробництві деталей з титанових сплавів методами порошкової металургії етап формозміни може здійснюватися різними способами. Для невеликих деталей (розмірами до 100 мм) ефективним є використання сталевих прес-форм, що дозволяє отримувати деталі досить складної конфігурації. Проте, слід враховувати обмеження щодо напрямку пресування та співвідношення висоти деталі до її діаметру для забезпечення однорідності усадки [24].

Для виготовлення великогабаритних виробів та деталей зі значним співвідношенням висоти до діаметра найбільш ефективним є метод гідростатичного пресування. Цей метод особливо цінний при створенні деталей складної форми, що мають виступи, поглиблення та наскрізні канали різної спрямованості. Гідростатичне пресування дозволяє отримувати багато виробів безпосередньо з використанням фасонних гільз. Крім того, з титанового порошку можна пресувати в гідростатичній установці заготовку наближеної форми, наприклад, паралелепіпеда, суцільного або порожнистого циліндра, яка потім піддається механічній обробці. Порошок, що утворюється під час обробки, може бути використаний повторно. Після холодного пресування титанові заготовки-брикети піддаються спіканню [25-27].

Спікання сформованих заготовок є важливим етапом виробництва виробів з титану. Цей процес може відбуватися у вакуумі при залишковому тиску менше 0,133 Па або в середовищі інертного газу, такого як аргон. Вибір середовища спікання впливає на властивості готового виробу.

Спікання у високому вакуумі забезпечує більш повне видалення домішок з титану та захист металу від впливу кисню та азоту. Однак, зразки, спечені в атмосфері аргону, можуть мати знижені механічні характеристики. Для досягнення задовільних механічних властивостей у цьому випадку потрібне ретельне очищення та сушіння аргону.

Оптимальні параметри спікання, такі як температура та тривалість, визначаються індивідуально для кожного типу виробів, враховуючи їх призначення (пористі або компактні), хімічний та гранулометричний склад вихідних порошків титану. Зазвичай, для пористих матеріалів температура спікання знаходиться в межах 900-1000 °С, тоді як для високощільних конструкційних виробів цей показник становить 1200-1300 °С. Важливим фактором, що впливає на усадку під час спікання, є тип, розмір, питома поверхня та форма частинок вихідних порошків [28].

Деякі деталі, отримані методом спікання, можуть мати достатні механічні властивості, форму та розмірну точність для безпосередньої механічної обробки. Проте, інші деталі можуть потребувати додаткової обробки для підвищення щільності та, відповідно, механічних властивостей. Одним з таких методів є гаряче ізостатичне пресування.

Особливості технології обробки тиском порошкових композитних матеріалів із сплавів титану описані у роботах [2,17,22 та інш.]. Зокрема, у роботі [29] наведено технологію виготовлення композиційного матеріалу системи Ti-Be, що включає гаряче пресування суміші гранул сплавів Ti-6Al-4V, Ti-6Al-6V-2Sn з гранулами берилію, подальшу екструзію та процес прокатки. В результаті було отримано матеріал з межею плинності 1300-1360 МПа. Автори роботи [29] провели аналіз процесу спікання двофазної системи порошок + основа, внаслідок чого зробили висновок, що незалежно від часу спікання існує гранично досяжне значення залишкової пористості. Показано, що швидкість ущільнення при спіканні зменшується зі збільшенням вмісту основи. Встановлено, що практично безпористі матеріали можна одержати з використанням гарячого пресування, що

реалізується після спікання спресованих заготовок.

Композиційні матеріали системи Ti-Mg, що представляють значний інтерес, виготовляються за складною технологією, яка включає пресування та спікання порошків титану з подальшим просоченням пористих заготовок алюмінієво-магнієвим сплавом. Цей процес відбувається в інертній атмосфері при температурі 750-800 °С. Отриманий титаномагнієвий композиційний матеріал характеризується задовільними механічними характеристиками та корозійними властивостями.

На етапі попереднього проектування технології створення нових композитів та виробів на їх основі, першочерговим завданням є проведення досліджень для ідентифікації оптимального складу компонентів. Цей склад повинен забезпечити баланс необхідних механічних характеристик виробів. Паралельно з цим, здійснюється підбір раціональних режимів технологічних операцій, враховуючи економічну обґрунтованість процесу.

У роботі, під час експериментального дослідження, пресування брикетів здійснювалося за такою схемою: шихтопідготовка з механічним перемішуванням + холодне пресування в закритій прес-формі + спікання у вакуумі.

1.3 Стан теорії обробки тиском порошкових матеріалів

Теорія обробки тиском композитів виникла та інтенсивно розвивалася у 1960-1980 рр. у зв'язку з необхідністю вирішення завдань створення та вдосконалення виробництва авіаційної та космічної техніки. Основою теорії обробки тиском композитів становить науковий напрямок механіка композитних середовищ [30]. Перші роботи, виконані в цьому напрямку, з'явилися в 20-х роках XX століття, коли В. Фойгт (W. Voigt) і Е. Рейс (E. Reyes) запропонували обчислювати ефективні модулі пружності та податливості мікронеоднорідних матеріалів за правилом механічного змішування. Потім І.М. Ліфшицем та Л.М. Розенцвейгом було

запропоновано метод опосередкування властивостей полікристалів на основі розв'язання стохастичного крайового завдання, який отримав розвиток у роботах В.В. Болотіна, С.Д. Волкова, В.А. Ломакіна, Ю.В. Соколкіна, А.А. Ташкінова, Т.Д. Шермергора та інших. Ц. Хашиним (Z. Hashin), Ш. Штрикманом (S. Shtrikman), Б. Розеном (B. Rosen), Р. Хіллом (R. Hill) та іншими на основі варіаційних принципів розроблено метод, що дозволяє обчислювати межі ефективних модулів гранульованих та волокнистих композитів. Істотний внесок у розвиток механіки структурно-неоднорідних середовищ зробив Р.І. Нігматулін.

Математичному моделюванню та експериментальному дослідженню процесів пластичного деформування матеріалів, що виготовляються методом порошкової металургії, присвячені роботи В.Л. Колмогорова, Ю.М. Логінова, А.В. Овчиннікова, В.Є. Перельмана, А.І. Рудського, В.В. Скорохода, та ін. Розглянутий напрямок робіт активно розвивається в зарубіжних країнах, тут необхідно відзначити роботи AC Bentham, A. Cocks, S. Dolerevic, JA Elliot, BC Hancock, KT Kim, VI Kushch, G. Michot, IC Sinka, HC Yang, CY Wu, A. Zavaliangos.

Перші теорії, що описували пружну та пластичну поведінку композитних матеріалів, базувалися на значно спрощених механічних моделях. Сьогодні ж у механіці формування порошкових композитів широко використовується дискретно-континуальна модель. Ця модель розглядає деформоване тіло як пластично стислий дисконтинуум з кусково-постійними властивостями. [31-33]. Рух такого дисконтинууму вивчався на роботах [34-36] з урахуванням феноменологічного підходу механіки суцільних середовищ, соціальній та роботах [37,38] з допомогою структурно- феноменологічного підходу.

Механіка структурно-неоднорідних матеріалів є одним із найбільш перспективних напрямів наукових досліджень процесів деформування порошкових та композитних матеріалів. Цей напрям зосереджений на вивченні поведінки структурних елементів матеріалу на різних рівнях

масштабу - від макроскопічного до мікро- та мезоскопічного. Концепція масштабно-структурної ієрархії при деформації матеріалів була вперше сформульована у роботах В.Є. Паніна [39].

Істотні результати у вирішенні завдань у галузі механіки композитів з використанням багаторівневого підходу досягнуто у роботах [40,41].

В основі феноменологічного підходу в механіці гетерогенних середовищ лежить концепція існування так званого представницького елемента об'єму, що деформується. Цей елемент, хоча й малий порівняно з розмірами зразка, що деформується, є достатньо великим, щоб включати значну кількість окремих матеріальних частинок. Властивості цього представницького елемента вважаються ідентичними властивостям всього тіла. Для кожного елемента та матеріалу в цілому виконуються основні закони механіки та термодинаміки континууму. Перевага континуального опису порошкових матеріалів полягає в можливості застосування математичного апарату та варіаційного числення для дослідження неперервних функцій. Експериментальні дані та інші дослідження підтверджують допустимість континуального підходу [42, 43]. За допомогою цього підходу було вирішено багато завдань технологічної механіки, зокрема, пресування порошків та гранул, гідростатичне пресування, штампування, пряме та зворотне видавлювання гетерогенних заготовок з різних металів. Проте, на думку багатьох вчених, феноменологічний підхід має обмеження, зокрема, він не дозволяє врахувати вплив форми, геометричних параметрів компонентів мікроструктури деформованих матеріалів та їх розподілу за об'ємом на процеси пластичної деформації порошкових композитів.

Для врахування неоднорідностей структури пористих та порошкових матеріалів та їх еволюції під час деформування застосовується механіка структурно-неоднорідних середовищ. Структурно-феноменологічний підхід, зокрема, базується на встановленні зв'язку між геометричною структурою пористого тіла та його фізико-механічними властивостями.

Реологічні характеристики середовища, що деформується, визначаються шляхом аналізу еволюції елементів структури. Основні положення, що використовуються при вирішенні задач механіки структурно-неоднорідних матеріалів, розглянуто та узагальнено в роботі [38].

Ефективне вирішення технологічних завдань обробки тиском композитних матеріалів залишається актуальною проблемою, що потребує подальших наукових досліджень. Комплексне застосування сучасних методів механіки структурно-неоднорідних матеріалів та інженерного аналізу сприяє глибшому розумінню процесів, що відбуваються в структурних компонентах композиційного матеріалу, та їх стану під час пластичної деформації.

1.4 Постановка завдання дослідження

Виходячи з аналізу літератури, можна сказати, що пресування порошків титану є перспективним методом виробництва металевих виробів складної або індивідуальної форми, проте поширенню та ефективному застосуванню даної технології перешкоджає слабо розвинена теоретична база та відсутність апарату, що дозволяють коректно описувати та враховувати особливості поведінки системи «жорстка прес-форма – еластична оболонка».

Таким чином, метою роботи є вивчення впливу параметрів пресування порошків титану и на деформацію металевих порошків у процесі пресування.

ГЛАВА 2 МАТЕРІАЛИ, ТЕХНІКА ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали дослідження

Як вихідний матеріал для виготовлення компактів використовували порошок титану і порошок титану марки ПТЕС. У таблицях 2.1 та 2.2 представлені дані про хімічний склад та теоретичну щільність порошків.

Таблиця 2.1. Хімічний склад у % титану та порошку ПТЕС

	Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cl	N/O2/C
Титан, порошок	0,03	0,02		99,75	0,6	0,06	0,03/0,06/0,02
ПТЕС	0,06	0,02		99,75		0,06	0,03/0,06/0,02

Таблиця 2.2. Теоретична щільність порошків

Порошок	Теоретична щільність, г/см3
Титан порошковий	1,6
ПТЕС	1,4-2,0

2.2 Лабораторно-технічне обладнання

Пресування виробів у прес-формах проводили з використанням гідравлічного пресу ІП-500М авто (ЗАТ «ЗІПО», Угорщина) (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Гідравлічний прес ІП-500М

Для визначення твердості матеріалу використовували твердомір Шора з індикатором типу D (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – ТВР-ДЦ твердомір (дюрометр) Шора тип D із цифровим індикатором

2.3 Виготовлення компакт-дисків методом пресування

Досліджували матеріали, отримані з порошку титанового марки ПТЕС різних фракцій. Зразки готували двостороннім пресуванням у закритій прес-формі без обмежувача. Тиск пресування змінювали від 100 до 800 МПа. При цьому залежно від тиску пресування пористість зразків змінювалася від 0,05 до 0,4.

Вплив пористості та розміру частинок порошку на характеристики пружності сирих пресувань вивчали на циліндричних зразках діаметром 11,3 та висотою 10 мм. Досліджено три партії зразків, виготовлених пресуванням порошку різних фракцій: -630+500, -500+315 та -315+200 мкм.

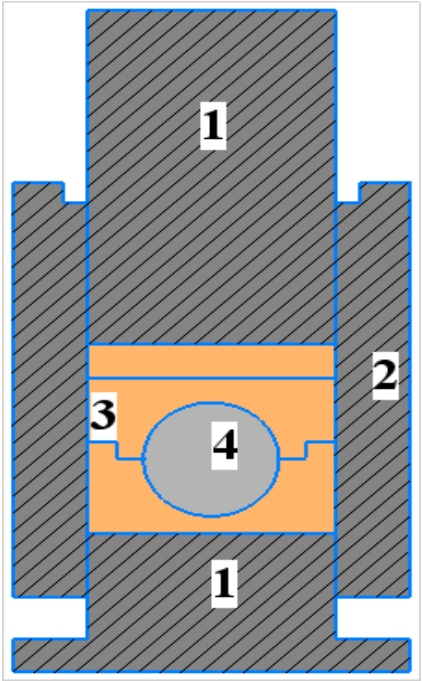
Вплив температури спікання на акустичні характеристики визначали на зразках порошку тих же фракцій, а також поліфракційного порошку -630 мкм. Зразки були стрижніми прямокутного поперечного перерізу довжиною 45 мм, шириною 6 і 7 мм і висотою H = 3...5 мм. Тиск пресування був спрямований по осі М. Вимірювання проводили на зразках трьох партій: одну партію становили сирі пресування, а дві інші - зразки, спечені після пресування у вакуумі при температурах 573 і 773 відповідно. .Компактування порошків в еластичних оболонках, що містяться в жорстку циліндричну прес-форму, проводили за схемою, представленою на рисунку 2.4.

2.4 Визначення щільності зразків

Вимірювання геометричних розмірів зразків показало суттєве відхилення геометрії компактів від сферичної форми, що ускладнює визначення густини на основі геометричних розмірів, тому густину визначали методом гідростатичного зважування. Як гідроізоляцію використовували цапонлак (щільність = 1,27 г/см3).

Метод гідростатичного зважування – це метод вимірювання відносної

густини об'єктів, чию густину проблематично визначити виміром геометричних розмірів, що є наслідком неправильної форми. Принцип методу гідростатичного зважування полягає у використанні закону Архімеда для розрахунку відносної щільності твердих тіл, як робочий інструмент використовують електронні ваги зі спеціальною приставкою для гідростатичного зважування.



1 – пуансони, 2 – матриця, 3 – еластична оболонка, 4 – порошкове тіло

Рисунок2.4 – Схема лабораторної реалізації пресування у жорсткій циліндричній прес-формі

Для розрахунку густини зразків використовували формулу 2.1:

$$\rho_{\text{гидро с лаком}} = \frac{m_{\text{обр.+лак}}}{m_{\text{обр.+лак}} - m_{\text{вод.}}} \times \rho_{\text{в}} \qquad (2.1)$$

де $\rho_{\text{гідро з лаком}}$ – щільність зразків з лаком, $m_{\text{обр.+лак}}$ – маса зразків з лаком, $m_{\text{вод.}}$ - маса зразків з лаком, $\rho_{\text{в}}$ - щільність дистильованої води.

Потім формулою 2.2 розраховували обсяг зразка без лаку

$$V_{\text{обр.}} = \frac{m_{\text{обр.+лак}}}{\rho_{\text{гидро с лаком}}} - \frac{(m_{\text{обр.+лак}} - m_{\text{обр}})}{1.27} \qquad (2.2)$$

Далі масу зразка ділили з його обсяг і отримували його щільність.

2.5 Побудова кривих ущільнення

Для наочного уявлення про поведінку порошку в процесі пресування необхідно побудувати його криву ущільнення, тобто залежність щільності від тиску пресування. Використовується два методи побудови кривих ущільнення.

Перший метод полягає в тому, що порошкове тіло піддають навантаженню з подальшим розвантаженням (розвантаження проводитися, щоб врахувати пружну післядію прес-форми і порошку), цей процес повторюється з певним кроком з підвищенням величини навантаження, при цьому постійно фіксується зміна висоти порошкового тіла, залежність висоти порошкового тіла. Після закінчення цього процесу із зафіксованих значень висоти пресування визначається щільність порошкового тіла на всіх етапах (після розвантаження), потім будується залежність щільності від тиску пресування (крива ущільнення, рис. 2.5).

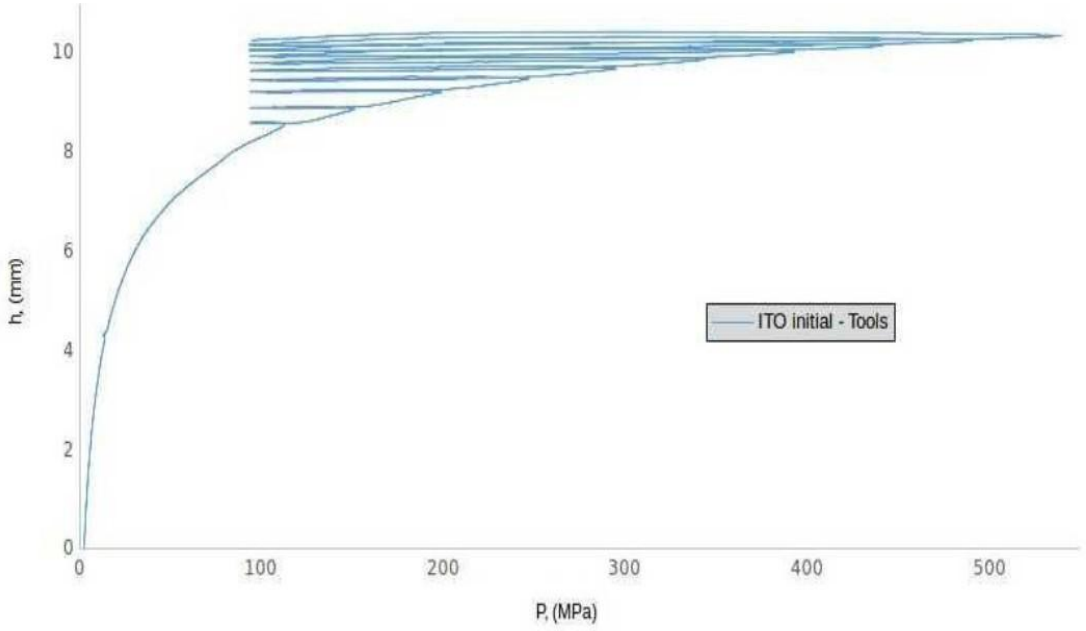


Рисунок 2.5 – Залежність висоти пресування від тиску пресування

Другий метод полягає в побудові залежності густини компактів, спресованих при різних тисках і витягнутих з прес-форми, від тиску пресування. Перевагою методу є відсутність необхідності враховувати пружну післядію прес-форми та порошкового тіла, але для побудови кривої ущільнення потрібно кілька зразків на відміну від першого методу. У цьому роботі використовували останній метод.

Виходячи з отриманих значень достовірності апроксимації для різних видів рівнянь, можна визначити рівняння, здатне точніше описати поведінку того чи іншого порошку при ущільненні. Рівняння всіх типів із високою точністю описують ущільнення всіх порошкових матеріалів. Однак логарифмічне рівняння, на відміну від статечного та експоненціального, має ясний фізичний сенс входять до нього коефіцієнтів, а інтерпретація змін цих коефіцієнтів не викликає труднощів [20], тому для подальшого зіставлення характеристик пресування досліджуваних порошків було прийнято рішення використовувати його.

Для опису ущільнення порошку в процесі пресування використовували логарифмічне рівняння безрозмірне:

$$\rho = b \cdot \ln\left(\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{кр}}}\right) + 1 \qquad (2.3)$$

Коефіцієнт b характеризує інтенсивність ущільнення порошкового тіла (ущільнюваність) під впливом пресування тиску. Критичний тиск пресування Ркр – умовна величина, коли він порошкового тіла досягає безпористого стану.

РОЗДІЛ 3 НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКІВ ТИТАНУ

3.1 Метод пресування порошків титану у закритих прес-формах

Традиційний метод формування заготовок пресуванням у закритих прес-формах є основним за обсягами виробництва порошкової металургії титану. На цьому методі засновано серійне виробництво ряду виробів: найпростіших (типу кілець Рашига) та деталей приладобудування [1].

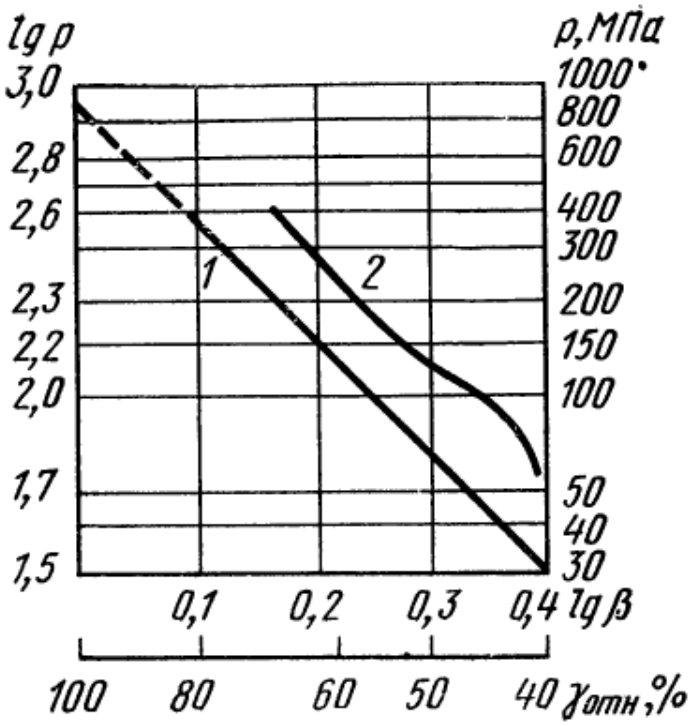
Огляд результатів досліджень процесів пресування та спікання порошків металів наведено у роботах Б. А. Борок із співавторами [14] . У роботах досліджували ущільнення гідриднокальцієвих порошків титану при холодному пресуванні. Результати зіставлення наведених на рис. 3.1 та 3.2 даних про залежність властивостей брикетів від тисків пресування Отримані результати дозволили авторам зазначеної роботи віднести порошковий титан до групи добре пресуються порошків.

Виходячи із встановленої залежності між відносним об'ємом і тиском пресування, автори визначили тиск пресування, необхідне досягнення теоретичної щільності брикету.

Для характеристики процесу ущільнення використовували [14] коефіцієнт пресування і величину ступеня ущільнення Z. Характер залежностей цих величин виражається рівняннями:

$$K = \frac{d\gamma}{dp}; \quad Z = \frac{\gamma_m}{\gamma_n},$$

де dγ - відносна зміна густини; dp - збільшення тиску; γn і γm - густини брикетів при тисках pn і pm відповідно.



1 – титан, гідростатичне пресування; 2 – титан пресування у сталевий прес-форме.

Рисунок 3.1 – Залежність логарифму щодо об'єму (lg β) від логарифму тиску пресування (lg p)

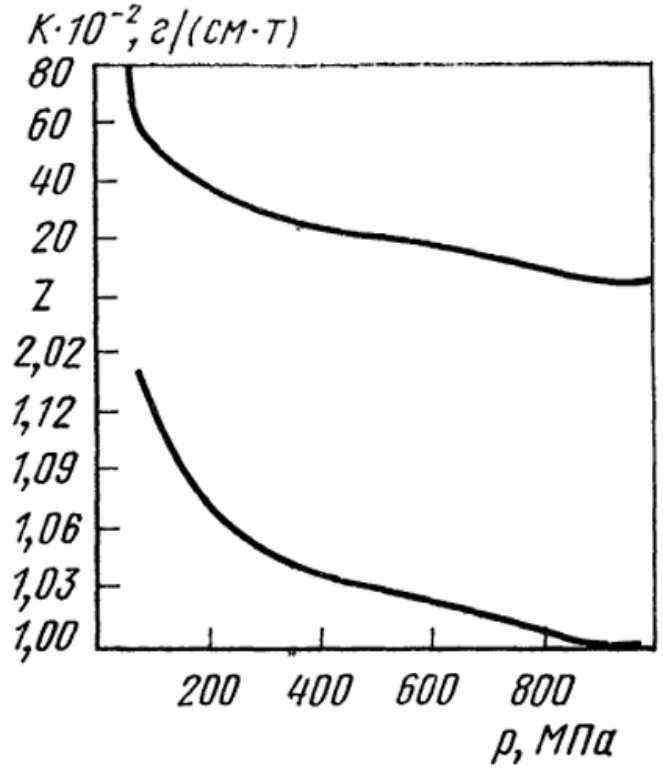
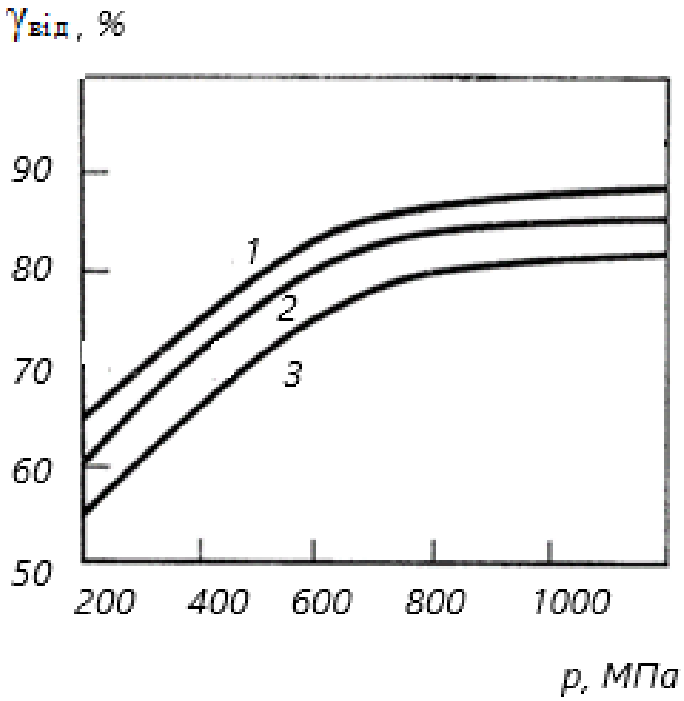


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта пресування К та ступеня ущільнення Z від питомого тиску p

У цій же роботі наведено графічну залежність коефіцієнта пресування та ступеня ущільнення від тиску пресування.

Згідно з літературними даними, для холодного пресування слід рекомендувати тиск пресування, що не перевищує 800 – 900 МПа. Це відноситься до порошків, отриманих в лабораторних умовах, або до порошків, які не випускаються в нашій країні. Для практичних цілей цікавить дослідження тих порошків титану, які виробляються серійно або підготовлені до впровадження. Результати порівняльних досліджень ущільнення різних типів порошків титану, що використовуються в машинобудуванні, наведено на рис. 3.3.



1 - натрієтермічного; 2 - гідридно-кальцієвого; 3 - отриманого гідруванням - дегідруванням

Рисунок 3.3 – Залежність відносної густини брикету від тиску пресування порошків титану фракції -0,63+0,18 мм (H : D = 1)

Характерна особливість натрієтермічних порошків – підвищений вміст сольових включень. Ще в роботі [10] встановлено, що титан губчастий активно поглинає вологу з повітряної атмосфери через присутність в губці залишків хлористого магнію. Цю вологу видаляють вакуумтермічною

обробкою з нагріванням від 20 до 400°С. При випробуванні натрієтермічних порошків виявлено, що вміст мінералогічних включень (в основному хлоридів) в 1,5-3 рази вище, ніж в електролітичних порошках. Це спричиняє більший шлюб при виготовленні з натрієтермічних порошків конструкційних деталей, що піддаються механічній обробці за вищими класами точності та чистоти поверхні.

У табл. 3.1 наведено результати дослідження залежності залишкової пористості брикетів, одержаних холодним пресуванням у закритих прес-формах, порошків системи Ті - А1 від тиску пресування (порошки отримані методом електролізу розплавів з розчинним анодом).

Таблиця 3.1 – Залишкова пористість брикетів, спресованих з електролітичних порошків титану, легованих алюмінієм

Фракція, мм	Зміст А1,%	Насипна маса, г/см8	Маса «утряски», г/см3	Плинність, г/с	Залишкова загальна пористість, %, при тиску пресування, МПа				
					300	500	600	800	1000
-0,63 +0,18	1,2	1,42	1,75	0,28	25	17	10	10	9
	3,4	1,47	1,62	0,32	26	19	13	11	10
	5,3	1,30	1,73	0,34	28	22	16	13	11
	7,2	1,34	1,55	0,27	30	25	19	15	13
-0,63 +0,08	1,03	1,55	1,78	0,33	20	14	8	6	5
	2,99	1,56	1,84	0,35	21	16	10	7	5
	4,80	1,44	1,70	0,30	24	19	12	8	6
	6,70	1,45	1,82	0,28	26	22	15	11	9
-0,18 +0,08	0,98	0,56	1,84	0,33	15	8	5	3	3
	3,10	1,42	1,78	0,36	16	9	6	4	3
	5,01	1,35	1,80	0,34	17	9	8	6	6
	7,10	1,40	1,63	0,31	20	11	9	7	6

Залежності механічних та фізичних властивостей зразків з нелегованого титану та сплаву Ti-2A1 та Ti-6Al-4V від тиску пресування представлені в табл. 3.2. Ці дані показують, що тиск пресування в інтервалі 800-900 МПа оптимальний при пресуванні порошків титану і сплавів на його основі з отриманням щільних конструкційних виробів.

У табл. 3.3 наведено властивості спечених виробів з порошків титану та сплаву системи Ti-A1-V, вироблених рядом фірм США холодним пресуванням з подальшим спіканням та в окремих випадках куванням.

Таблиця 3.2 - Залежність властивостей металокерамічного титану та його сплавів від тиску пресування

Тиск пресування, МПа	Щільність зразка, %		σВ, МПа	σт, МПа	Ψ, %
	до спікання	після спікання			
Технічний титан					
500	87,0	90,5	400	310	15
800	93,5	95,0	490	370	24
900	94,7	97,0	510	390	25

Таблиця 3.3 -Механічні властивості спечених титанових виробів фірм «Фенстил» та «Дайнамет»

Метод виготовлення	σВ, МПа	δ, %	Ψ, %	γвід, %
Сплав Ti-6Al-4V «Дайнамет»				
П+С+К	920	11,5	24,7	100
П+С	830	5,0	8,0	99
Сплав Ti-6Al-4V «Фенстил»				
П+С	890	5,0	5,0	95
П+С+К+У	890	10,0	16,0	100
П+С+Т	1100	3,0	-	95

П – пресування; С – спікання; К – кування; В – відпав; Т - термообробка

Значна кількість титанових конструкційних виробів - мало навантажені, і застосування титану для їх виготовлення обумовлено його специфічними властивостями - легкістю, високою корозійною стійкістю, демагнітністю і т.п.

У виробництві серійних конструкційних виробів схемою користуються холодне пресування в закритих прес-формах + спікання [1]. На шихтопідготовку надходять порошки титану, що пройшли вхідний хімічний контроль сит. Обов'язковою операцією цьому переділі є магнітна сепарація порошків, що дозволяє відокремити сторонні магнітні включення. Магнітний сепаратор, вбудований в одну технологічну лінію з віброситом, забезпечує необхідний для виробництва ступінь очищення порошку від можливих включень заліза. Залишок магнітних частинок на сепараторі становить 0,1-0,3% від маси вихідного порошку.

3.2 Вплив пластифікаторів та оксидних плівок на пресування брикетів із порошків титану

Пластифікаторами є крохмальний клейстер, розчин полівінілового спирту у воді, розчин каучуку або парафіну в бензині, розчин бакеліту в спирті та ряд інших. Застосування пластифікаторів спричиняє збільшення вмісту в титані вуглецю (від 0,05 до 0,6%) та кисню. Зазвичай використовується для снівання забруднення вуглецем «випалювання» пластифікатора (відпал пресування при 400-500 ° С) у випадку титану застосовне мало.

Висока пластичність порошків технічного титану призводить до того, що вплив типу та складу пластифікатора малопомітний. При формуванні порошків сплавів титану (особливо високолегованих) використання пластифікаторів є доцільним при всіх схемах формування. Наприклад, отримуючи фільтри пресуванням магнієвих відсівів губчастого титану, застосовували [144, 145] 40%-ний розчин гліцерину в спирті; пластифікатор

видаляли за 400°С. При мундштучному пресуванні відсівів титана губчастого для виготовлення вихідних заготовок пресуванням в закритих прес-формах в якості пластифікатора використовували парафін.

Окисні плівки на частинках титану перешкоджають схоплювання поверхні частинок (сили міжатомного взаємодії перестають діяти з відривом порядку 1 нм). Використовувану в порошковій металургії схему пресування з попереднім видаленням окисної плівки з поверхні частинок (термічна обробка у відновлювальному газовому середовищі) для титану не застосовують - при відомих режимах термообробки титану оксиди не відновлюються.

Теплота утворення двоокису титану дорівнює 950 кДж/моль; пружність дисоціації при 1000 ° С становить 1,6 · 10-18 Па. Таким чином, видалити окисну плівку практично можна лише розчиненням кисню в металі. Тривалість цього процесу визначають із залежності:

$$\Delta\gamma = \frac{2}{\pi\left(\frac{\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{ок}}}\right)}\left(\frac{M}{m}\right)\sqrt{D\tau},$$

де Δγ - товщина розчинної окисної плівки; рм і рок - щільність металу та його оксиду; M і m - маса кисню в одиниці об'єму, насиченого киснем металу та його оксиду; D – коефіцієнт дифузії кисню при температурі реакції; τ - тривалість процесу.

Коефіцієнт дифузії кисню в титані дорівнює для

α-титану

$$D = 16 \exp(-52\,000/RT);$$

для β-титану

$$D = 0{,}45 \exp(-36\,000/RT);$$

Відповідно до розрахунку, проведеного з використанням наведеної формули, плівка оксиду товщиною 2 нм розчиняється при 800 °С за 6·10-4 с (при 600 °С - за 0,12 с, при 500 °С - за 5,6 с).

Висока швидкість дифузії кисню в титані забезпечує усунення окисної плівки поверхні часток за дуже короткий час отжига. Це дозволило створити безперервний процес високотемпературного відпалу порошку титану, у якому частки металу перебувають у зоні високої температури менше секунди. Те, що під час відпалу роль процесів дисоціації оксидів дуже мала, дозволяє вести відпал без застосування вакууму. Отримані порошки відрізнялися підвищеною ущільнюваністю (щільність пресування підвищувалася на 3-8%) і формованістю. Однак у цих зразках вміст кисню було дещо вищим, ніж у зразках з невипалених порошків.

Окислення порошкового титану при відпалі можливе навіть за розрідження 1,3-0,013 Па. Помітною швидкість окислення у вакуумі стає при 500-600°С, а при 700-900°С приріст вмісту кисню (при розрідженні лише на рівні 1,3 Па) має майже лінійну залежність від тривалості витримки. Для запобігання порошку від окислення при відпалі необхідно створення розрідження 1,3 · 10-3 ... 1,3 · 10-5Па. У лабораторних умовах застосовували дегазацію з використанням титанових гетерних вставок у реторті відпалу.

Порошок титану після вакуумного відпалу реагує з киснем повітря із дуже високою швидкістю. За даними роботи, поверхні металу утворюється мономолекулярний шар газу за $2{,}4 \cdot 10^{-6}$с при атмосферному тиску, за $1{,}8 \cdot 10^{-4}$с - при тиску 1,3 Па і за 18 с - при тиску $1{,}3 \cdot 10^{-5}$Па. Таким чином, високотемпературний відпал дозволяє усунути вплив окисної плівки на процес пресування порошків, проте неминуче зростає вміст кисню в металі.

3.3 Вплив гранулометричного складу порошків на процес пресування

Гранулометричний склад порошків помітно впливає ущільнюваність. Щільність брикетів за інших рівних умов зростає з підвищенням дисперсності порошків та зі збільшенням рівномірності розподілу частинок по крупності всередині досліджуваної фракції. Отримані нами експериментальні дані щодо пресування порошків титану добре узгоджуються з даними досліджень, проведених Г. А. Меєрсон для порошків інших металів. Встановлено, що добуток експериментальних значень коефіцієнта бічного тиску на коефіцієнт зовнішнього тертя залишається практично постійним досить широкому інтервалі тисків пресування при H : D = 1:2.

До збільшення тиску пресування веде підвищення мікротвердості порошку та зменшення величини контактної поверхні. Ущільнюваність змінюється не тільки залежно від гранулометричного складу порошку титану, а й при підшийтуванні порошків легуючих металів та сплавів. Ущільнюваність сумішей порошків погіршується, якщо міцність добавок вища за міцність основного металу. Зміна ущільнюваності порошків титану при підшихтуванні до них порошків легуючих металів, а також зміна дисперсності порошків досліджено С. С. Кіпарисовим із співробітниками. Дані щодо впливу гранулометричного складу електролітичних порошків на їх ущільнюваність наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Ущільнюваність електролітичних порошків титану різного гранулометричного складу

Фракція, мм	Щільність, г/см^3		Фракція, мм	Щільність, г/см^3	
	після пресуван-ня при тиску 800 МПа	Після спікання у вакуумі, 1200 ^{0}С, 5 год		після пресування при тиску 800 МПа	після спікання у вакуумі, 1200 ^{0}С, 5 год
-1,20 +0,50	3,10	3,42	-0,18 +0,10	3,63	4,20
-1,20 +0,18	3,18	3,51	-0,16 +0,04	3,81	4,32
-0,50 +0,18	3,32	3,82	-0,10+0,04	3,78	4,38
-0,50 +0,04	3,45	4,0	-0,06	3,78	4,43

Залежність щільності брикетів від тиску пресування електролітичних порошків фракції -0,63+0,18 мм, що містять 1; 3 та 5% А1, аналогічна залежності для нелегованих порошків титану.

При впровадженні виробництва деталей приладобудування з електролітичних порошків титану була встановлена необхідність при постачанні порошків з гранулометричним складом, ширшим, ніж обумовлений технологічною картою даний тип деталей, а також при виявленні сторонніх механічних включень в порошках проводити додатковий розсів. Для запобігання пиловиділенню при розсіві можна використовувати сита з рідинним зрошенням (продуктивність по титановому порошку 50-100 кг/год), які застосовують при гідрометалургійній переробці електролітичних порошків.

Для розсіву сухих порошків титану використовують вібраційні сита закритого підвісного типу. Порошок з бункера надходить на сита по гумовому рукаву; швидкість подачі регулюється вбудованим у рукав корковим краном. (Корпус сита підвішений до кронштейну на чотирьох

спіральних пружинах. Джерело коливань - вібромотор марки С-273 (частота 2800 коливань в хвилину). Продуктивність сита по титановому порошку 80 -100 кг/год. розсів порошків фракції -0,63 + 0,18 мм (марки ПТЕС) дає залишок на ситі 063 не більше 1%; 0,5 - 2,0% порошку;

Операції змішування та усереднення проводять у конусних змішувачах та змішувачах типу «п'яна бочка». Застосування відцентрових змішувачів є недоцільним.

Багатокомпонентну шихту можна змішувати в лопатевому змішувачі, обладнаному пристроєм для підігріву бункера. Після сухого перемішування компонентів протягом 1-1,5 год отриману суміш додають 5%-ний водний розчин полівінілового спирту (10% від маси шихти) і змішують при температурі 90-95°С до появи ознак пилення. Подальше перемішування може призвести до сегрегації шихти.

Відома технологія мокрого змішування компонентів шихти, що складається з нелегованого електролітичного титанового титанового порошку фракції -0,18 мм, порошків лігатури сплаву Ті - А1 і Мо. Щоб уникнути сегрегації частинок з різною щільністю, шихту змішували в мішалці лопаті з додаванням 50-60 % води по масі шихти. Отриману пульпу фільтрували через полотно, вакуумували і сушили в струмі аргону, нагрітого до 80-100 °С.

Дозування порошків і заповнення прес-форм виконують, як правило, вручну, так як автоматичне пресування порошків титану до теперішнього часу (через відсутність відпрацьованої конструкції пристрою для автоматичного змащення стінок прес-форми) застосовують тільки при виробництві найпростіших виробів типу кілець Рашига і малогабаритних пористих виробів, наприклад. У серійному виробництві [1] об'ємне дозування порошків титану поширене найбільш поширених типів деталей масою до 50 р. Для дозування використовують об'ємні мірки, мають у дні різьбові пробки, службовці зміни обсягу мірки залежно від величини насипної маси порошків. У виробництві більших деталей застосовують свій

метод дозування.

Наважку для пресування розраховують за такою формулою:

$$P = V\gamma\left(1 - \frac{\text{П}}{100}\right)k_1 k_2,$$

де V – обсяг виробу, см3;

γ - щільність порошку або шихти, г/см3;

П - задана пористість спеченого пресування; %;

k1, - коефіцієнт, що враховує втрати порошків при пресуванні (для титану 1,005 ... 1,007);

k2 - коефіцієнт при спіканні титану враховує втрати маси переважно через часткове видалення сольових включень у порошках.

На відміну від спікання залізних, мідних та інших порошків, у яких втрати маси відбуваються внаслідок відновлення оксидів, у титану вміст кисню у процесі спікання збільшується. Проведені дослідження показали, що для окремих типів високодисперсних порошків титану через окислення їх у процесі спікання може виявитися навіть менше 1. У серійному виробництві для електролітичних порошків його приймають 1,005-1,010. Цим враховується сублімація солей, що містяться в порошках, а також винесення титану в результаті хімічних транспортних реакцій.

У порошковій металургії титану при отриманні сплавів поряд з легованими порошками титану використовують для підшихтування серійні порошки легуючих металів - алюмінію, нікелю, вольфраму, молібдену, заліза.

Застосування як змащення стінки прес-форми спиртовоглицеринових сумішей ефективне тільки при пресуванні деталей з низьким співвідношенням H:D і при невеликих (до 300-400 МПа) тиск пресування. З підвищенням тиску пресування зростають втрати зусиль пресування та розпресування та прискорюється знос прес-форм.

Введення мастил у шихту крупнозернистих порошків не виправдало

себе, тому що вони при тиску пресування 800-900 МПа не знижують втрат на зовнішнє тертя і не запобігають налипанню титану на стінки матриць. Для пресування заготовок з тиском пресування 800 МПа досліджено можливість застосування як змащення суспензії фторопласту. Розведену бензином марки Б70 (ГОСТ 1012-54) у співвідношенні 1: 1 суспензію щіточкою наносять на робочі поверхні прес-форм. У процесі спікання (при t = 400 ° С) фторопласт розкладається, продукти розкладання евакуюються з робочого об'єму печі.

При тисках пресування 800-1000 МПа, що застосовуються для виробництва високощільних виробів, ці мастила не ефективні (частки порошку продавлюють плівку фторопласту). Для таких тисків найбільш ефективним виявилося застосування як мастила водного препарату колоїдного графіту марок В0 та В1. Перед нанесенням на деталі прес-форм, що труться, його розбавляють технічним спиртом (у співвідношення 1:1).

3.4 Вплив виду прес-форм, схеми пресування та характеристик пресів на пористість брикетів

Прес-форми з попутною конусністю у поєднанні із застосуванням як мастило водного препарату колоїдного графіту дозволили робити з електролітичного порошку втулки з величиною відношення висоти втулки Н до товщини стінки 6 до 8. При цьому стійкість прес-форми зросли в 1,7 рази.

Принципових відмінностей у поведінці порошків титану при пресуванні порівняно з пресуванням найпоширеніших типів порошків із заліза, міді, нікелю немає. Порошки титану та багатокомпонентні шихти на їх основі можна пресувати на механічних та гідравлічних пресах.

При виборі типу преса слід керуватися не тільки його можливістю забезпечити заданий тиск пресування при виготовленні певних типів виробів, а й необхідністю отримати високу продуктивність пресувальника

та достатню відтворюваність властивостей пресувань. Остання вимога обмежує застосування механічних пресів-автоматів, у яких передбачається робота прес-форми «до упору», оскільки величина насипної маси порошків титану, що нині випускаються, може коливатися (в стані поставки) в інтервалі ±20% від середньої величини. Крім того, зазначено, що в процесі пресування порошків через постійну вібрацію преса додатково змінюється насипна маса.

Застосування схеми пресування "до упору" при отриманні щільних виробів не дозволило домогтися відтворюваності властивостей пресувань і спечених виробів з титанових порошків. Даний спосіб пресування застосовують лише під час виготовлення виробів простої форми. Однак обсяг виробництва таких виробів дуже значний: деталі типу кілець Рашига, пористі газопоглиначі, фільтри редукторів ацетиленів.

Пресування високопористих виробів із порошків титану ведуть при тисках трохи більше 400 МПа. Тиск виштовхування в цьому випадку невеликий. Через високу продуктивність механічні преси-автомати знайшли широке застосування в порошковій металургії для виготовлення таких виробів. Можуть бути використані також різного типу таблетувальні машини, що застосовуються у фармацевтичній промисловості, а також при виготовленні пластмасових виробів.

Необхідне зусилля преса РН розраховують за такою формулою:

$$P_н = k\,p\,s,$$

де k = 1,25 – коефіцієнт запасу;

p - тиск пресування обраного типу деталі;

s – площа горизонтальної проекції деталі.

При виборі преса підбирають прес найближчої марки із великим номінальним зусиллям пресування. Одночасно необхідно враховувати такі додаткові умови: зусилля виштовхування преса має забезпечувати

випресування виробу, а хід верхнього пуансону та відстань між столом та повзуном – задану висоту виробу. Хід верхнього пуансону підраховують за такою формулою:

$$H_{в.п} = h_1 - h_2$$

де h_1 - відстань від нижнього торця верхнього пуансона до верхнього торця матриці; h_2 – величина шляху пресування.

Методики вибору преса залежно від дозування, конструкції прес-форми та інших факторів наведено у роботі І. Д. Радомисельського.

Отримання щільних пресувань з титанових порошків на всіх описаних пресах-автоматах можливе лише при відпрацюванні заходів, що запобігають можливості адгезії частинок титану до стінок матриці. До таких заходів належать, наприклад, нанесення водного препарату колоїдного графіту.

За способом переміщення прес-інструменту існуючі преси можна поділити на групу із системою «виштовхування», коли при роботі верхнього та нижнього пуансонів (або блоків) стіл з матрицею залишається нерухомим, і групу із системою «стягування», коли переміщуються верхній пуансон і матриця, а нижній пуансон залишається нерухомим.

Переваги схеми зі «стягуванням» матриці полягають у можливості налагодження пресуючого вузла окремо від преса та скорочення тим самим часу простою обладнання, спрощення пресуючого інструменту, підвищення надійності роботи пресового обладнання та якості пресувань.

У роботі закриті прес-форми холодного пресування класифіковані таким чином: 1) за експлуатаційними особливостями - стаціонарні та знімні; 2) за типом дозування порошків - з об'ємним та ваговим дозуванням; 3) за принципом пресування - одностороннє та двостороннє; 4) по конструкції матриці - із суцільною, складовою, збірною матрицею; 5) за кількістю формують гнізд - одногніздні та багатогніздні; 6) за родом застосовуваних

пресів - для спеціалізованих та неспеціалізованих пресів; 7) за методом пресування - для автоматичного та неавтоматичного пресування; 8) за кількістю шарів - для пресування одношарових та багатошарових виробів; 9) щодо контролю за ходом пресування - для пресування «до упору» та «по тиску»; 10) за складністю зміни пресованого виробу - для пресування виробів певної групи складності.

Група складності даного типу виробів є важливою характеристикою, що дозволяє попередньо оцінити (шляхом підбору аналога) трудомісткість процесу виготовлення спечених виробів і ступінь складності пресуючого інструменту конструкції.

Умовно спечені вироби з порошків можна віднести до однієї із семи груп:

I. Вироби простої геометричної форми без отвору з незмінним перетином у напрямку пресування, обмежені двома паралельними площинами.

II. Те саме, що і група I, але з одним або декількомами отворами у напрямку пресування з відношенням висоти виробу до найменшої товщини стінки не більше 8-10.

III. Те саме, що і група II, але з відношенням висоти виробу до товщини стінки більше 8-10.

IV. Те саме, що і група II, але мають перехід від одного перерізу до іншого (наприклад, зовнішній або внутрішній бурт).

V. Те саме, що й група IV, але із ставленням висоти виробу до товщини стінки більше 8-10.

VI. Вироби, що мають по висоті кілька перехідних діаметрів за перерізами.

VII. Вироби, що мають кілька зовнішніх і внутрішніх переходів по перерізах та отворах, а також вироби, обмежені непаралельними площинами або криволінійними поверхнями.

Стаціонарні, автоматичні прес-форми застосовуються при пресуванні

пористих виробів із титану II та III груп складності, а також невідповідних щільних деталей I та II груп складності. При отриманні високощільних конструкційних виробів III і IV груп складності порошки титану пресують у знімних прес-формах, що забезпечують можливість нанесення мастила на робочі поверхні прес-форм після кожного циклу пресування. Контроль пресування у разі неавтоматичних прес-форм ведуть «по тиску», що зменшує небезпеку руйнування прес-форм.

При пресуванні втулок з відношенням їх висоти H до товщини стінки більше двох виникає арочний ефект, що призводить до різкого збільшення необхідних тисків пресування і особливо розпресування. Для запобігання цьому ефекту при пресуванні втулок із співвідношенням $H/\delta \geq 2$, а також для зниження тиску випресування в матрицях у напрямку випресування вводять попутний конус, який повинен бути не менше 0,03% [1].

3.5 Формування матеріалу на основі титану методами порошкової металургії

Метою роботи є вивчення впливу структурних та технологічних параметрів на властивості зразків з порошкового титану.

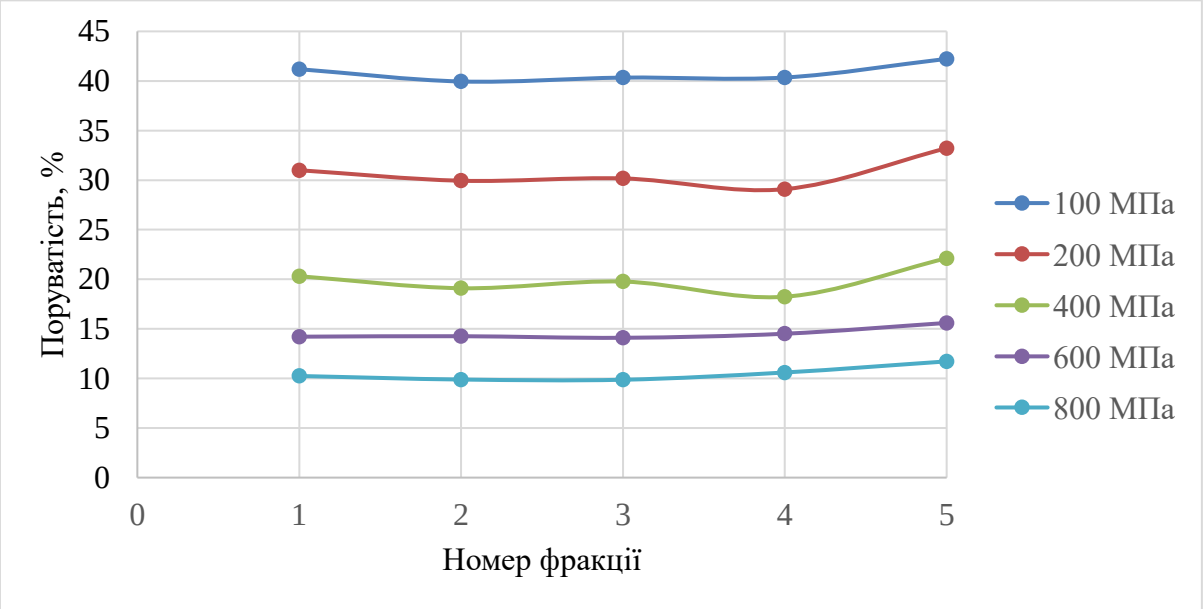
Для отримання брикетів використали титановий порошок марки ПТЕС, який побут розсіяний на фракції -063; -063 +05; -05 +0315; -0315 +02; -02+01. Властивості вихідних порошків представлені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Властивості порошків титану

Фракція	Щільність, г/см^3	
	насипна	утряски
-0,63	1,4	1,68
+-0,63 +0,05	1,32	1,58
-0,05+0,0315	1,31	1,63
-0,0315+0,02	1,32	1,63
-0,02+0,01	1,24	1,58

Для механічних випробувань з порошку кожної фракції шляхом

холодного двостороннього пресування були виготовлені зразки двох видів: циліндри заввишки 9,6-14,7 мм і діаметром 11 мм, які використовуються для випробувань на стиск одновісне; паралелепіпеди 5х7х45 мм для випробувань на чотириточковий вигин. У процесі пресування фіксували напругу пресування, а після випресування вимірювали пористість зразків. Ці параметри для циліндричних пресовок представлені на рис. 3.4. Наведені значення пористості є усередненими даними для 10 зразків, спресованих під тим самим тиском. Пористість пресування дещо збільшується зі зменшенням розміру частинок порошку.



Номер фракції	1	2	3	4	5
Характеристичний розмір, мкм	-063	-063-05	-05-0315	-0315-02	-02+01

Рисунок 3.4 - Пористість зразків, одержаних в результаті визначення ущільнюваності порошку титану різних фракцій

Наступним етапом досліджень була побудова кривої ущільнюваності, побудовані в координатах напруга σ-пористість (рис. 3.5), а також аналітичний опис цієї залежності.

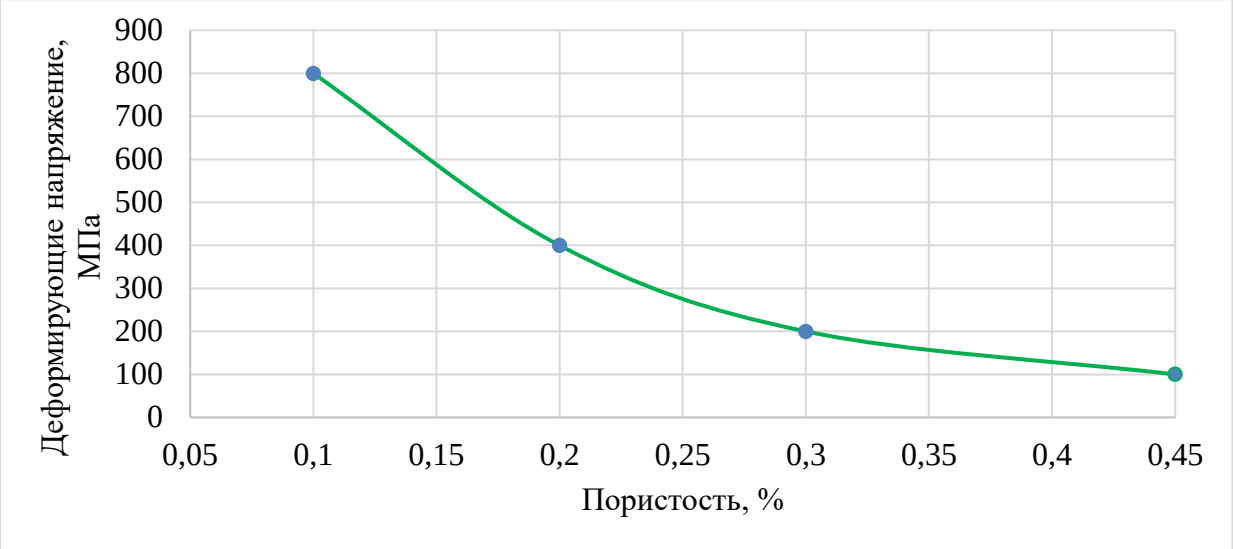


Рисунок 3.5 – Крива ущільнюваності титанового порошку марки ПТЕС

Криву ущільнюваність пористого матеріалу можна представити як криву деформаційного зміцнення. На відміну від компактного матеріалу, координата деформації в цьому випадку асоціюється зі зміною пористості, оскільки деформація не йде за рахунок зміни форми зразка, а за рахунок зміни обсягу. Координата напруги, як і у разі компактного матеріалу, характеризує напругу, необхідну для перебігу твердої фази. Для пористого тіла ця напруга визначається наявністю в матеріалі пір, які впливають на розподіл напруги. Очевидно, що, як і в компактному матеріалі, деформуюча напруга повинна бути достатньою для подолання дислокаціями опору, що рухаються, з боку всіх структурних елементів матеріалу.

Щоб визначити залежність напруги течії від ступеня деформації в деформованому виконали серію додаткових експериментів на компактних зразках титанових марки ВТ1-0, попередньо продеформованих до різних ступенів. Досліджено параметри зміцнення при стисканні титану, деформованого прокаткою до ступенів деформації e = 0,2–1,7.

За усередненим для трьох напрямків значенням напруги течії було побудовано криву деформаційного зміцнення титану (рис. 3.6).

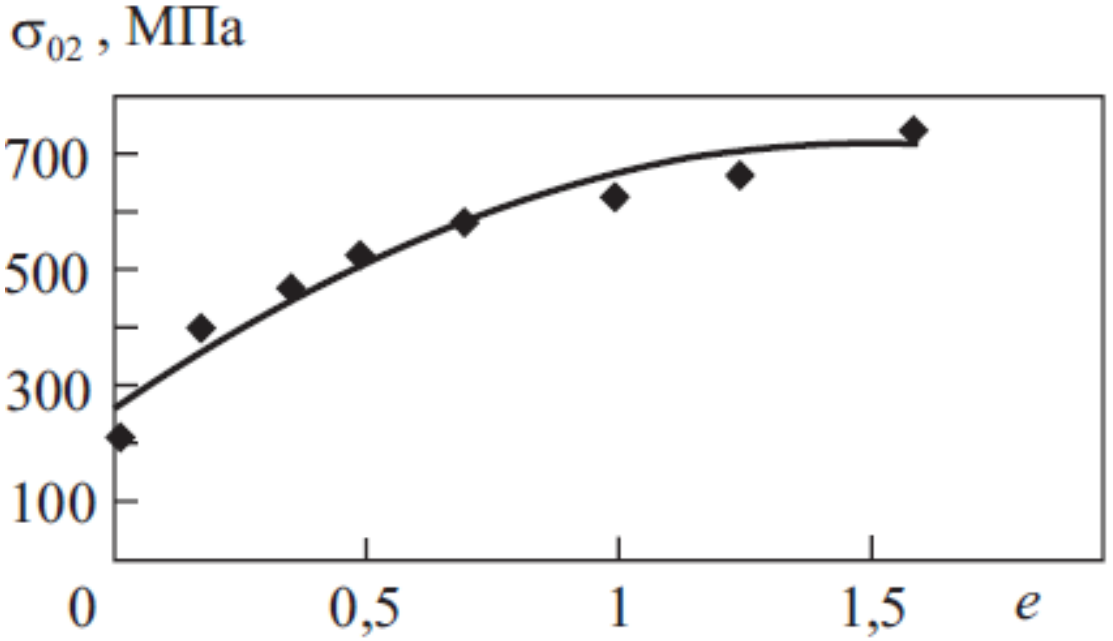


Рисунок 3.6 - Залежність межі плинності від ступеня деформації деформованого титану: точки експериментальні значення; крива – апроксимація за рівнянням (1)

Відповідно до теорії зміцнення, запропонованої Людвігом, вид цієї кривої описується показовою функцією σт = σ0 + Ken, де σ0 – межа плинності недеформованого матеріалу; K – коефіцієнт зміцнення; n показник деформаційного зміцнення.

Експериментальна залежність деформуючого напруження від ступеня деформації добре апроксимується виразом:

$$\sigma_m = \sigma_0 + Ke^{0,7}$$

де σ_0 = 250 МПа; K = 380 МПа.

Приймаючи, що при ущільненні порошкового матеріалу на деформування твердої фази до еквівалентного ступеня деформації (розрахованої через зміну щільності) витрачається те саме зусилля, що й у компактному матеріалі, продеформованому до такого ж ступеня, криву на рис. 3.6 можна взяти як основу до розрахунку кривої ущільнюваності.

Результати експериментів, наведені у табл. 3.6 свідчать про те, що значення Hμ/σт для центральної частини порошинки практично збігаються з величиною σт компактного зразка, продеформованого до такої ж еквівалентної деформації. Вид залежності твердості від глибини відбитка свідчить про те, що в більш щільних пресування деформація розподілена по всій порошинці більш рівномірно, ніж у пористих, де вона зосереджена переважно в приповерхневих шарах. Наслідком цього є зміна твердості у високопористих пресування від поверхні в глиб порошинки. Таким чином, порівняння параметрів зміцнення твердої фази пресування з властивостями деформованого титану свідчить про гарну згоду теорії та експерименту.

Таблиця 3.6 - Значення межі плинності деформованого титану та твердості порошинок після пресування

Пористість пресування, %	еекв	σт, МПа	Hμ, МПа
40,28	0,281	495	1000
30,62	0,377	582	1600
20,03	0,525	619	1700
9,95	0,714	630	1950

Відмінність механічної поведінки деформованого компактного титану, випробуваного на одновісне стиснення, та пресування, продеформованої до того ж ступеня деформації, проявляється під час аналізу кривих деформаційного зміцнення цих матеріалів. На рис. 3.7 представлена крива зміцнення пресування, ущільненого до пористості 20%, що відповідає еквівалентній деформації е = 0,7.

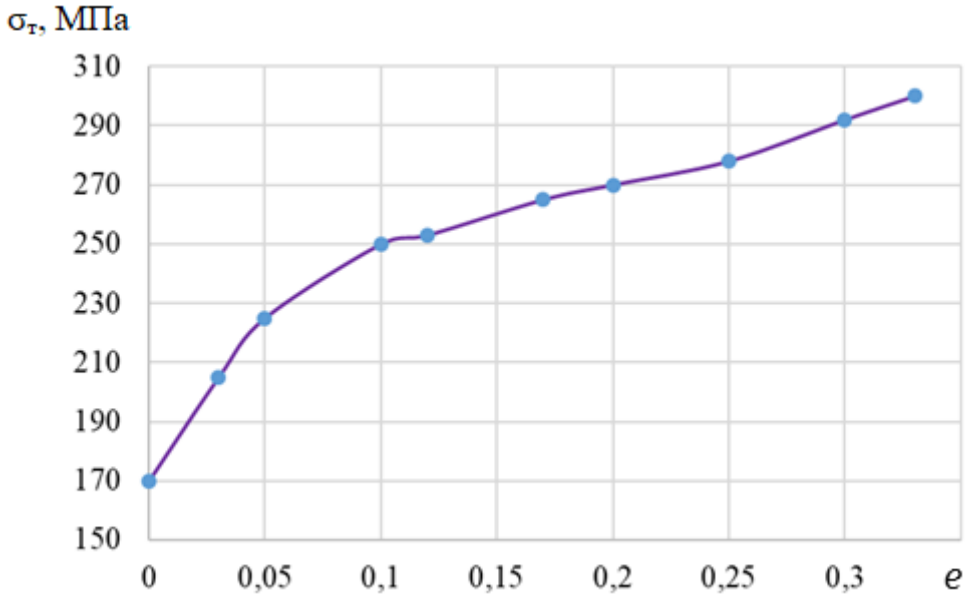


Рисунок 3.7 – Криві зміцнення пресування титанових зразків з вихідною пористістю 20%

Якщо деформований титан має дуже низькі параметри зміцнення з причин, пов'язаних з особливостями еволюції дислокаційної структури, то неспечене пресування, продеформоване еквівалентною деформацією, має значно нижчу межу плинності і зміцнюється значно швидше.

Високі значення параметрів зміцнення пресування є наслідком особливих механізмів зміцнення її твердої фази, та пов'язані з особливостями еволюції порового простору. Сформована під час пресування морфологія пір помітно спотворюється при розвантаженні зразка внаслідок пружного післядії. При повторному навантаженні зразка пластична деформація розвивається на різних поверхнях одночасно. Цей процес виявляється "розмазаним" по деформації, що призводить, з одного боку, до зниження ефективної межі плинності, а з іншого - до підвищення ефективних властивостей зміцнення.

Висновки до розділу 3

Побудовано криву ущільнюваності порошкового титану технічної чистоти та проведено теоретичний розрахунок цієї кривої з урахуванням закону зміцнення твердої фази та еволюції порового простору.

При ущільненні високопористих матеріалів, коли практично відсутня зміна поперечних розмірів пресування, точнішим є розрахунок.

Проаналізовано зміну твердості за глибиною порошинок у пресуваннях з різною пористістю. Встановлено, що в щільних пресування деформація розподілена більш рівномірно по всьому перерізу порошинки, ніж в пористих, де вона зосереджена переважно в приповерхневих шарах. Наслідком цього є різка зміна твердості від поверхні вглиб порошинки у високопористих пресування.

Аналіз кривих зміцнення експериментального пресування, продеформованої до еквівалентної деформації, показав, що пресування має значно нижчу межу плинності, але значно вищий коефіцієнт зміцнення. Це особливостями еволюції порового простору пресування при повторному навантаженні.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Небезпека порошкового титану

Випадки займання титанового пилу, що утворюється в процесі виробництва та обробки металевого титану, послужили поштовхом до вивчення пожежо- та вибухонебезпечних властивостей порошкового титану.

Здатність до займання визначається як функція температури займання, мінімальної енергії займання та мінімальної вибухонебезпечної концентрації пилу. Вибухова інтенсивність є функцією максимального вибухового тиску та максимальної швидкості зростання тиску. Як зразок для відносної оцінки даних показників використовують порошок пітсбурзького вугілля.

Залежно від величини запропоновано п'ять категорій відносної небезпеки вибуху:

Відносна небезпека вибуху	Величина
Не небезпечний	0
Слабка	0,1
Помірна	0,1- 1,0
Сильна	1,0- 10,0
Дуже сильна	10,0

Результати досліджень кількох типів порошкового титану наведено у табл. 4.1.

Пожежно- та вибухонебезпечність металевих порошків досліджують за методиками Інституту проблем матеріалознавства ім. Францевича. В ІПМ розроблено методики та створено лабораторні установки для дослідження характеристик вибуху порошків, температури займання у шарі та у

суспензії, а також комплекс приладів для визначення концентрації та дисперсного складу твердої фази газодисперсних систем. Також в інституті створено установку для визначення температури самозаймання та мінімального пожежонебезпечного вмісту кисню для гелів та встановлення для дослідження займистості порошків при контакті з іскрами тертя.

Таблиця 4.1 - Залежність займистості від властивостей різних порошків

Порошок	Величина, мм	Коефіцієнт вибуху	Температура займання, °С		Мінімальна вибухо-вонебезпечна концентрація, г/м^3
			шар	завись	
99%-ний Ti	-0,150	10,0	510	330	45
96,9%-ний Ti	-0,044	10,0	480	470	45
Молотий 97%-ний Ti	-0,074	0,4	-	-	55
	-0,074	0,1	470	530	30,5
68,7% Ti; 8,0% Al; 2,5% Si; 3,5% Fe; 1% O	-0,044	4,9	500	440	80
	-0,044	6,0	540	480	70
97% Ti; 2,8% H					
95% Ti; 3,8% H					

Літературні дані за температурами самозаймання та займання титану вкрай суперечливі, що пояснюється не лише невідповідністю методик, а й різницею в хімічних та гранулометричних складах досліджуваних порошків. При цьому в більшості випадків повна характеристика досліджуваних порошків далеко не завжди ясна, так як автори публікацій обмежуються повідомленням середнього діаметра частинок порошку або навіть розміром сита, через яке проходить основна маса частинок. Інтервал

значень температур самозаймання, за даними різних авторів, величезний і коливається від кімнатної температури до 600 - 650 ° С.

У діючих довідниках як нормативна прийнята величина НКПВ, що дорівнює 45 г/м3. За даними досліджень властивостей серійних електролітичних порошків титану, НКПВ їх може бути набагато вищим і досягати кількох сотень грамів на кубічний метр.

Великий розбіг значення показників займистості не може пояснюватися лише різницею методик досліджень. Виходячи із загальних уявлень про механізм окислення титану і фактори, що визначають швидкість протікання цього процесу, можна з впевненістю сказати, що, крім крупності та форми частинок, на показники займистості значною мірою впливають стан поверхні (ступінь окислення) досліджуваного порошку, вміст домішок та легуючих елементів матеріалу, частинок і частинок.

Міркування про механізм горіння порошків не викликають важливих заперечень. Однак для практичних цілей важливіше з'ясувати причини, що зумовлюють початок процесу неізотермічного окислення порошку, що веде надалі до виникнення процесу горіння. Вплив різних факторів на швидкість взаємодії металевого титану та сплавів на його основі з киснем, азотом, повітрям та водяними парами вивчено досить докладно.

Якщо кількість тепла, що виділяється в результаті окислення металу, починає перевищувати верхню допустиму межу, при якій забезпечується достатня швидкість тепловідведення, виникає загальний або локальний перегрів порошку, що впливає на залежність швидкості окислення реакцій від температури. Спонтанне наростання кількості тепла, яке не встигає відводитися із зони реакції, може призвести до досягнення температури плавлення металу, розчинення окисної плівки в розплавленому металі та спалаху. Як зазначалося, для порошкового металу характерне різке збільшення реакційної поверхні та погіршення умов тепловідведення, що й зумовлює можливість виникнення вогнища локального перегріву за рахунок тепла реакції окислення. Цим пояснюється сам факт початку проходження

реакції окислення за лінійним законом при температурах набагато нижчих, ніж у випадку компактного металу.

Окрім згаданих факторів, на кінетику окиснення значно впливає швидкість взаємної дифузії кисню та титану, яка різко змінюється із підвищенням температури. Нижній температурний рівень початку помітного перебігу дифузійних процесів у чистому титані знаходиться в області 500 °С. Така температура в осередку або у всій масі порошку може бути досягнута завдяки теплу, що підводиться ззовні, або теплу реакції окиснення. Це підтверджується даними роботи, де спостерігали саморозігрів та займання вельми чистого дисперсного титану, що знаходиться в ексікаторі.

Швидкість перебігу дифузійних процесів визначається як температурою реакції, а й станом. кристалічних ґрат. У цьому випадку особливого значення набуває вибір оптимальних технологічних режимів виробництва порошків (насамперед температурних) та правильний вибір апаратурно-технологічної схеми загалом. Так, наприклад, змінюючи температуру електролізу, можна регулювати властивості катодного металу. Ця ж залежність спостерігається і при дослідженні показників займистості електролітичних порошків.

Зниження температури електролізу призводить до збільшення займистості. Зниження НКПВ, температур самозаймання і займання пояснюється тут сумарним впливом кількох факторів, що залежать від температури процесу (газонасиченість і величина питомої поверхні порошку і т. д.), у тому числі й підвищеною поверхневою енергією кристалів, обумовленої веденням процесу електролізу при температурах нижче рівноважних. При отриманні гідридних порошків титану також можна регулювати параметри їх займистості, змінюючи температуру та тривалість процесу дегідрування. Відомо, наприклад, пропозиція отримувати порошки титану з підвищеною активністю, перериваючи процес дегідрування при досягненні залишкового вмісту в титані 0,4% Н,

чим забезпечується часткове збереження вакансій кристалічних решітці титану. Зменшення займистості дегідрованого матеріалу може бути забезпечене високотемпературним вакуумним відпалом порошку після досягнення рівноважного вмісту в ньому водню, тобто фактично подовженням процесу дегідрування. Це з посиленням процесу дегідрування. Це пов'язано з посиленням процесу спікання частинок та зміною гранулометричного складу порошків, зі зменшенням продуктивності апаратури та збільшенням енергоємності виробництва.

На кінетику окислення легованих порошків титану впливають тип, кількість елементів, що легують, а також мікроструктура сплаву.

Для поліморфних металів температура початку активного перебігу дифузійних процесів пов'язана із температурою поліморфного перетворення. Це становище експериментально підтверджено у роботах ІПМ щодо впливу легуючих добавок на температуру рекристалізації титану. За характером на характеристики міцності хімічного зв'язку легуючі елементи можна умовно розділити втричі основні групи.

До першої групи відносяться елементи, що підвищують температуру поліморфного перетворення і є а-стабілізаторами (наприклад, азот, кисень, вуглець і алюміній), до другої групи - елементи, що знижують міцність хімічного зв'язку та розширюють сферу існування γ-фази. До них відносяться хром, марганець, залізо, ванадій та деякі інші елементи.

Метали – аналоги титану (цирконій, гафній), що практично не впливають на міцність хімічних зв'язків, відносяться до третьої групи. Винятком із загального правила є кремній, який, хоч і незначно, але знижує температуру.

При підвищенні вмісту легуючого елемента характер залежності повинні впливати властивості самого матеріалу. Так, при дослідженні самозаймання литих сплавів Ti-A1 у кисні було показано зростання стійкості до займання сплаву на інтерметалідній основі (30% A1).

Наведені вище дані досліджень займистості відносяться до порошків,

вироблених у лабораторних умовах спеціально для цих досліджень, або до порошків, у яких передісторія їх отримання невідома. Для освоєних останнім часом у промисловому виробництві типів порошків даних у літературі не було. У табл. 4.2 наведено деякі результати дослідження займистості електролітичних порошків, отриманих в дослідно-промислових умовах за встановленого технологічного режиму.

Таблиця 4.2 – Пожежно- та вибухонебезпечні властивості електролітичноз порошків титану

Фракція, мм	Температура, ^{0}C		НКПВ, г/см^3
	самозаймання	займання	
-0,5+0,18	650	840	450
-0,5+0,18	650	835	440
-0,18	640	830	150
-0,18 +0,08	650	840	200
-0,18 +0,04	600	800	220
-0,08	600	790	60
-0,04	530	720	25

Визначено, що електролітичні порошки мають більш високу нижню концентраційну межу вибуховості та температури самозаймання та займання порівняно з відомими в літературі величинами та існуючими нормами. Це пояснюється відносно великим середнім розміром частинок, менш розвиненою поверхнею та досить рівноважною мікроструктурою електролітичних порошків. Виняток становлять лише високодисперсні порошки фракцій – 0,08 мм і особливо – 0,04 мм. Ці фракції за своїми властивостями можна порівняти з дослідженими в роботі порошками титану, середній діаметр частинок яких становив 10 мкм.

Були проведені попередні дослідження властивостей електролітичних порошків сплавів титану системи Ti-A1. Незважаючи на те, що, згідно з

літературними даними, алюміній дещо підвищує стійкість титану проти окислення, електролітичні порошки системи Ti—A1 виявилися активнішими, ніж чисті порошки тієї ж фракції. Це пояснюється, зокрема, зсувом гранулометричного складу у бік збільшення виходу дрібних фракцій порівняно з нелегованими електролітичними порошками титану через специфічний вплив алюмінію на кристалізацію титану при електролізі. Чим більше уповільнюються процеси дифузії при зміні типу та вмісту легуючого компонента, тим, очевидно, більший зсув гранулометричного складу у бік дрібних фракцій, тим більша питома поверхня порошку та нестабільність його мікроструктури. Це певною мірою знижує захисну дію елементів, що збільшують сили хімічного зв'язку (алюміній, кисень, азот та ін.). Елементи, що зменшують міцність хімічного зв'язку під час кристалізації, сприяють укрупненню частинок катодного металу. Встановлено, наприклад, укрупнюючу дію невеликих домішок марганцю при електрокристалізації титану.

Висловлені міркування підтверджуються, зокрема, відхиленнями у діаграмах склад сплаву - температура самозаймання. Різке зниження температури самозаймання системи Ti-Al за змістом 20% Al важко пояснити з урахуванням даних діаграми стану. Однак якщо зіставити зміну залишкового вмісту водню в дегідрованому порошку Ti - Al і температуру самозаймання, то можна помітити, що різке відхилення ходу кривої температури займання при вмісті 20% Al пропорційно одночасному підвищенню вмісту в цьому сплаві водню (а в порошку та нестабільності мікроструктури.

При отриманні металокерамічних сплавів на основі титану з використанням механічних сумішей порошків титану і легуючого елемента займистість суміші порошків, визначається займистістю порошку металу, що володіє великою спорідненістю до кисню. Температура самозаймання механічних сумішей Ti-Mn і Ti-Si дорівнює приблизно температурі самозаймання чистого титану (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 - Займистість порошків металів, що входять до складу сплавів на основі титану

Метал	Середній розмір частинок, мкм	Самозаймання		Запалення	
		t, ^{0}C	Характер горіння	t, ^{0}C	Характер горіння
Nb	3	290	Без полум'я	390	Тління
Zr	6	270	Спалах	420	Спалахує яскравим
Mo	5	310	Повільне, без полум'я	530	полум'ям Тліє
W	5	410	Те саме	620	
Cr	7	650	» »	-	» Не спалахує до
Ti	10	520	Спалах	720	1000°C Спалахує
Fe	-	630	»	350	яскравим
Fe	-	470	Повільне без полум'я	-	полум'ям Горить
Cu	9	-	До 1000 0C не займається	-	Не займається до 1000 °C
Mn	<40	-	Те ж	-	Те ж
Co	5	-	» »	-	
Ta	-	290	Спалах	420	» » » » Спалах

Для практичних цілей становлять інтерес дані зіставлення температур самозаймання і займання, і навіть дані про характері процесу горіння низки порошкових матеріалів. У табл. 4.3 наведено ці дані для металів, які

зазвичай використовуються для легування титану. За інших рівних умов займистість може бути критерієм при виборі вихідного матеріалу для виробництва сплавів. Так, наприклад, у порошку сплаву Ti-2,5 температура самозаймання дорівнює 120°С, а механічна суміш порошку титану з 2,5% порошку нікелю буде мати, якщо виходити зі сказаного вище, температуру самозаймання не нижче 500-600 °С. Природно, якщо умовами технології не обумовлюється використання порошку сплаву, перевагу в цьому випадку слід віддати механічній суміші порошків.

4.2 Заходи щодо запобігання спалахам і вибухам порошків титану

При виробництві порошкового титану та виробів з нього необхідно передбачати всі заходи безпечного ведення робіт, оскільки обслуговуючому персоналу доводиться працювати з розплавами солей, отруйними рідинами, пожежонебезпечними матеріалами. Заходи з безпеки при роботі в подібних умовах докладно викладені в посібниках. Зокрема, у 2006 введено в дію наказ від 22.08.2006 № 548 Про затвердження Правил безпеки при виробництві та переробці титану, який застосовується і у виробництві порошкового титану.

Для зменшення небезпеки вибуху чи пожежі запропоновано низку методів пасивації порошків. Найбільш простий спосіб - обробка порошків сумішшю інертного газу з невеликою кількістю (3-5%) кисню. Отримані за описаними в цій роботі режимами порошки зазвичай мають на своїй поверхні окисну плівку, що утворюється в процесі отримання. Виняток становлять гідридні порошки, поверхня яких практично вільна від окисних плівок. Ці порошки поступово окислюються і пасивуються в процесі зберігання після чотиримісячного зберігання нижня концентраційна межа вибуху дегідрованого у вакуумі при 800 °С порошку зростає з 48 до 80 г/м3. Таким чином, займистість гідридних порошків може змінюватися в процесі зберігання, і, очевидно, є сенс у вивченні можливості пасивації їх обробкою

за вказаним вище методом. Займистість електролітичних порошків з міцною окисною плівкою зазвичай не змінюється в процесі зберігання. Температура самозаймання електролітичних порошків крупністю менше 0,18 мм не змінюються при зберіганні їх протягом трьох місяців як у вологому, так і в сухому вигляді. Для порошків крупністю менше 0,04 мм відзначено деяке збільшення температури самозаймання (на 10-40 °С) при зберіганні у вологому вигляді (при незмінному НКПВ).

Для зменшення займистості порошків металів на їх поверхні створюють неактивні плівки, що ускладнюють доступ кисню. Для цього можна використовувати силіконовий лак, кислоти жирного ряду, складні ефіри мінеральних кислот тощо.

При обробці порошку титану фракції -0,04 мм сумішшю кремнійорганічної рідини і бензолу можна збільшити НКПВ, знизити тиск вибуху і максимальну швидкість наростання тиску вибуху

Включення до технологічної схеми додаткової операції нанесення захисного шару досить дорогих речовин може підвищити собівартість порошку. Результати проведених досліджень показали можливість нанесення сольового шару без ускладнення технологічної схеми для металотермічних і електролітичних порошків з використанням відносно недорогих солей КС1 і NaCl, що є основою електроліту. Застосування такої схеми дозволило одержати порошки, що містять до 10% сольової фази. Завдяки гігроскопічності солей різко збільшилося комкування порошку і зменшилося пилення, що призвело до значного підвищення нижньої межі концентрації.

Захисту порошків можна досягти створенням на поверхні гідридної плівки, стійкою до окислення плівки силіцидів титану, нітридів титану і оксидів, проте досі достатніх рекомендацій щодо застосування цих методів немає.

При поводженні з порошками титану не слід допускати можливості підвищення температури всієї маси або будь-якої частини порошку, що

знаходиться в контакті з повітрям, вище температур 300-400 ° С; необхідно виключити іскріння, застосування відкритого вогню, куріння і т. д. Велику небезпеку дає можливість іскріння при ударах металевих частин та розрядах статичної електрики, слід зберігати порошки у вологому стані. Так, вологість порошку цирконію має бути не менше ніж 15%. Необхідна вологість електролітичних порошків титану крупністю менше 0,18 мм встановлена не більше 15-20%.

Титановий порошок, що горить, можна гасити в залежності від умов різними способами. Загальні вимоги при гасінні - не розпушувати порошок, що горить, і не застосовувати воду. Неприпустимо використовувати піну, вуглекислоту та інші склади на водній основі. Найбільш ефективні для гасіння титанового порошку, що горить, сухі інертні порошкоподібні матеріали. При цьому рекомендують застосовувати окремі порошки та різні суміші - тальк, твердий пек, окис магнію, азбест, порошкоподібний доломіт, графіт, триметоксибороксин B3O3(OCH3)3, суміш вуглекислого кальцію та магнію. Ефективно гасіння палаючих порошків Зазначені матеріали застосовують в основному для гасіння невеликих вогнищ. Для ліквідації великих пожеж слід розробити спеціальні методи та відповідне обладнання. Необхідна також розробка методів гасіння порошку титану в закритих ємностях, де можуть використовувати гелій і аргон за умови повного заміщення повітряного середовища.

4.3 Розрахунок заземлення будівлі

Захисне заземлення будівлі, де розташована лабораторія, знаходиться в одношаровому ґрунті. Опір природного заземлювача складає Re = 10 Ом, допустимий опір заземлювача Rд = 4 Ом, питомий опір ґрунту ρ = 87 Ом·м [8]. Коефіцієнт сезонності ψ = 1,3. Глибина залягання електроду h = 0,5 м.

Контур заземлення виконаний із сталевих стержнів. У траншеї завглибшки до 0,7 м вертикально забиті стержні, а виступаючі з землі верхні

кінці з'єднані зваркою в нахліст сталевим прутком.

Як вертикальні електроди використані прутки діаметром d = 0,02 м і завдовжки l = 3,5 м

Знаходимо допустимий опір штучного заземлювача:

$$R_{и} = \frac{R_{е} \cdot R_{д}}{R_{е} - R_{д}} = \frac{10 \cdot 4}{10 - 4} = 6{,}67 \text{ Ом} \tag{4.1}$$

Відстань від поверхні землі до середини вертикального електроду:

$$t = h + \frac{l_{в}}{2} = 0{,}5 + 1{,}75 = 2{,}25 \text{ м.} \tag{4.2}$$

Приймаємо відстань між вертикальними електродами а = 3,5 м. Опір одиночного вертикального заземлювача [19]:

$$R_{в} = \frac{\rho \cdot \psi}{2 \cdot \pi \cdot l_{в}} \left(\ln \frac{2 \cdot l_{в}}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l_{в}}{4 \cdot t - l_{в}} \right); \tag{4.3}$$

$$R_{в} = \frac{87 \cdot 1{,}3}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 3{,}5} \left(\ln \frac{2 \cdot 3{,}5}{0{,}02} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2{,}25 + 3{,}5}{4 \cdot 2{,}25 - 3{,}5} \right) = 31 \text{ Ом.}$$

Знаходимо орієнтовне число вертикальних заземлювачів:

$$n^{\text{орієнт}} = \frac{R_{в}}{R_{и}} = \frac{31}{6{,}67} = 4{,}6 \text{ шт.}$$

Знаходимо по [19] орієнтовний коефіцієнт використання вертикальних електродів:

$$\eta^{\text{орієнт}} = 0{,}7.$$

Знаходимо число вертикальних заземлювачів:

$$n = \frac{R_в}{R_и \cdot \eta_в} = \frac{31}{6{,}67 \cdot 0{,}7} = 6{,}63. \quad (4.4)$$

Округлюємо число електродів до 7 і знаходимо коефіцієнт використання вертикальних електродів:

$$\eta_в = 0{,}73.$$

Знаходимо довжину горизонтального електроду. При розташуванні електродів в ряд довжина горизонтального електроду:

$$l_г = a \cdot (n - 1) = (7 - 1) = 21 \text{ м}. \quad (4.5)$$

Приймаємо товщину горизонтального електроду b = 0,005 м.

Знаходимо опір горизонтального електроду:

$$R_г = \frac{\rho \cdot \psi}{2 \cdot \pi \cdot l_г} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_г^2}{b \cdot h}; \quad (4.6)$$

$$R_г = \frac{87 \cdot 1{,}3}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 21} \cdot \ln \frac{2 \cdot 21^2}{0{,}005 \cdot 0{,}5} = 11{,}0 \text{ Ом}$$

Знаходимо по [19] коефіцієнт використання горизонтального електроду:

$$\eta_г = 0{,}65.$$

Знаходимо опір штучного заземлювача:

$$R_{и} = \frac{R_{в} \cdot R_{г}}{R_{в} \cdot \eta_{г} + n_{в} \cdot R_{г} \cdot \eta_{г}} = \frac{31 \cdot 11}{31 \cdot 0{,}73 + 7 \cdot 11 \cdot 0{,}65} = 4{,}69 \text{ Ом.}$$

Знаходимо загальний опір заземлювача:

$$R_{и} = \frac{R_{е} \cdot R_{и}}{R_{е} + R_{и}} = \frac{10 \cdot 4{,}69}{10 + 4{,}69} = 3{,}19 \text{ Ом.}$$

Оскільки опір заземлювача менш Rд = 4 Ом, захисне заземлення виконано вірно. На рисунку 4.4 показана схема розташування заземлюючого пристрою.

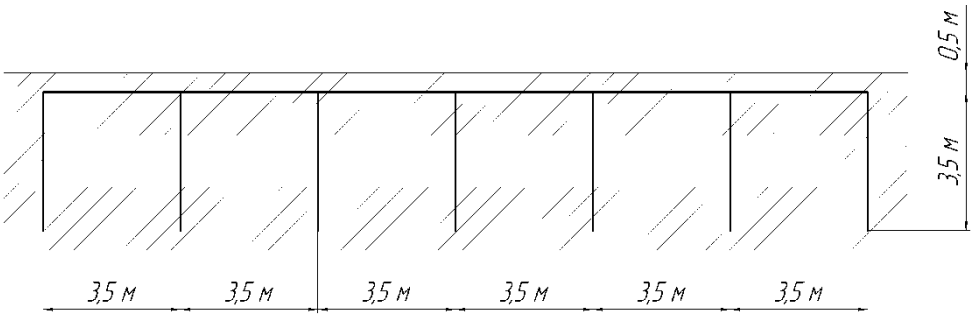


Рисунок 4.4 – Розташування електродів заземлюючого пристрою

Заземленою нейтраллю називається нейтраль електроустаткування, приєднана до заземлюючого пристрою безпосередньо або через малий опір.

Опір заземлення нейтралі джерела струму rо такий, щоб у разі замикання якої-небудь фази на землю через опір rзм напруга, під якою опиниться людина, що доторкнулася до зануленого корпусу або до нульового захисного дроту безпосередньо, не перевищувала деякої допустимої напруги дотику Uпр.доп., В.

$$r_{0} \le r_{зм} \frac{U_{пр.доп.}}{U_{ф} - U_{пр.доп.}} \qquad (4.7)$$

$$r_0 = 4\frac{42}{220-42} = 0{,}94 \text{ Ом.}$$

За умовами безпеки дотику до занулених корпусів в період існування замикання фази на землю rзм, Uпр.доп повинні бути можливо меншого значення. Тому приймається rзм = 4 Ом. Для виключення випадків замикання фази на металеві конструкції з малим опором розтіканню, ці конструкції сполучені з нульовим захисним провідником, тобто занулені.

Приміщення лабораторії відноситься до приміщення без підвищеної небезпеки. Основні ізолюючі захисні засоби для електроустановок і засоби захисту персоналу: діелектричні рукавички, слюсарний-монтажний інструмент з ізолюючими рукоятками, покажчики напруги, захисні окуляри, щитки і т.і.

4.4 Пожежна та техногенна безпека

По пожежній небезпеці будівля, в якій знаходиться лабораторії де збирають і випробують джерела живлення компресора холодильної установки відноситься до категорії Д – матеріали в холодному стані [20].

Можливі причини виникнення пожежі:

несправність електричної проводки;

несправність приладів і устаткування, що живляться від мережі;

несправність захисного заземлення;

необережне поводження з вогнем.

У зв'язку з цим необхідно передбачити наступні заходи по пожежній безпеці:

забезпечити облаштуваннями протипожежних перешкод у будівлі, системі вентиляції, опалювальних і кабельних комунікаціях;

проводити ретельну ізоляцію усіх струмоведучих провідників до робочих місць; періодичний огляд і перевірку ізоляції;

проводити інструктаж співробітників, на випадок виникнення пожежі.

Для гасіння пожеж в приміщенні лабораторії площею 45 м2 передбачений вуглекислотний вогнегасник ОУ–5 – 1 шт. (клас пожежі Е – горіння електроустановок під напругою).

Вогнегасник розташований таким чином, щоб він був захищений від впливу прямих сонячних променів, механічних впливів та інших несприятливих чинників, таких як вібрація, підвищена вологість та інших. Вогнегасник розміщений у легкодоступному і помітному місці. Кожен співробітник в обов'язковому порядку ознайомлений з правилами експлуатації вогнегасників.

У лабораторії застосований димовий оповісник ІП 212, який спрацьовує при скупченні диму в приміщенні.

З метою попередження прямого удару і другорядних проявів блискавок, будівля обладнана системою блискавкозахисту.

Громовідвід складається з трьох основних частин: приймача блискавки, який безпосередньо приймає удар блискавки; струмовідводу (спуску), що сполучає приймача блискавки з заземлювачем, і заземлення, через яке струм блискавки переходить безпосередньо в землю.

Вертикальна конструкція – частина будівлі, яка призначена для закріплення приймача блискавки і струмовідводу – опора – виготовлена з газових труб і встановлена на даху будівлі.

У разі виникнення пожежі, яку не можливо локалізувати власними силами, треба:

1. Подзвонити по телефону 101, викликати пожежну службу.

2. Знеструмити все устаткування.

3. Зачинити всі вікна.

4. Покинути приміщення.

5. Прикрити за собою двері.

Для запобігання дії на людей небезпечних чинників пожежі, передбачена можливість швидкої евакуації людей з будівлі. Число

евакуаційних виходів два – в протилежних кінцях і ведуть через сходову клітку назовні. Максимальна відстань від найбільш віддаленого робочого місця до евакуаційного виходу і необхідний час евакуації людей з приміщень виробничих будівель при категорії виробництва по пожежній небезпеці Д не обмежується.. В лабораторії евакуація відбувається за планом на випадок виникнення пожежі. Інструкція про заходи пожежної безпеки (план евакуації людей), включає загальну інструкцію будинку і інструкцію для окремого приміщення.

Висновки до розділу 4

В розділі з охорони праці та техногенної безпеки проведено всебічний аналіз основних факторів безпеки при виробництві та використанні порошків титану. Розглянуті заходи щодо запобігання спалахам та вибухам порошків титану.

В розділі проведений розрахунок заземлення будівлі в якому розташована лабораторія де проводились дослідження. Загальний опір заземлювача склав менше 4 Ом, захисне заземлення виконано вірно.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виходячи з аналізу літератури, можна сказати, що пресування порошків титану є перспективним методом виробництва металевих виробів складної або індивідуальної форми, проте поширенню та ефективному застосуванню даної технології перешкоджає слабо розвинена теоретична база та відсутність апарату, що дозволяють коректно описувати та враховувати особливості поведінки системи «жорстка прес-форма – еластична оболонка».

Таким чином, метою роботи є вивчення впливу параметрів пресування порошків титану и на деформацію металевих порошків у процесі пресування.

Побудовано криву ущільнюваності порошкового титану технічної чистоти та проведено теоретичний розрахунок цієї кривої з урахуванням закону зміцнення твердої фази та еволюції порового простору.

При ущільненні високопористих матеріалів, коли практично відсутня зміна поперечних розмірів пресування, точнішим є розрахунок.

Проаналізовано зміну твердості за глибиною порошинок у пресуваннях з різною пористістю. Встановлено, що в щільних пресування деформація розподілена більш рівномірно по всьому перерізу порошинки, ніж в пористих, де вона зосереджена переважно в приповерхневих шарах. Наслідком цього є різка зміна твердості від поверхні вглиб порошинки у високопористих пресування.

Аналіз кривих зміцнення експериментального пресування, продеформованої до еквівалентної деформації, показав, що пресування має значно нижчу межу плинності, але значно вищий коефіцієнт зміцнення. Це особливостями еволюції порового простору пресування при повторному навантаженні.

В розділі з охорони праці та техногенної безпеки проведено всебічний аналіз основних факторів безпеки при виробництві та використанні

порошків титану. Розглянуті заходи щодо запобігання спалахам та вибухам порошків титану.

В розділі проведений розрахунок заземлення будівлі в якому розташована лабораторія де проводились дослідження. Загальний опір заземлювача склав менше 4 Ом, захисне заземлення виконано вірно.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Baoquan H.U.， Peikang B.A. Jun Fabrication of Alloy Parts by Selective Laser Sintering Molybdenum Matrix Composite Powders. *RESEARCH STUDIES ON FOUNDRY EOUIPMENT*, 2008. №5. P. 5-17.

2. Huang Baiyun, Yi Jianhong. Current development of modern powder metallurgy materials and technologies (I) *SHANGHAI METALS,* 2007. Vol 29, No.3 May 2007 10.3969/j.issn.1001-7208.2007.03.001

3. M. Kleiner, M. Geiger, A. Klaus, Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming. *CIRP Annals*, 2003. Volume 52. Issue 2. P. 521-542.

4. Nie Junhui, Fan Jianzhong, Wei Shaohua, Liu Yanqiang Development and application of powder metallurgy particle-reinforced aluminum matrix composite materials for aviation. *Aviation manufacturing technology*, 2017. №16. P 2036-2378.

5. Zhanshan Ma, Qiang Li, Jinfa Wei, Chunyong Liang, Tai Yang, Ge Wang, Chaoqun Xia, Effects of Al-based alloy powders on the mechanical behavior, corrosion resistance and infrared emissivity of polyurethane composite coatings, Colloids and Surfaces A: *Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021. Volume 624. P. 126-782, ISSN 0927-7757.

6. McDanels D. L., Serafini T. T., Dicarlo J. A. Polymer, metal, and ceramic matrix composites for advanced aircraft engine applications [J]. Journal of Materials for Energy Systems, 1986, 8(1). P. 80-91

7. Shakesheff A. J., Purdue G. Designing metal matrix composites to meet their target: particulate reinforced aluminium alloys for missile applications[J]. *Materials Science and Technology*, 1998. P. 851-856.

8. Koli D. K., Agnihotr I. G., Purohit R. Advanced aluminium matrix composites: the critical need of automotive and aerospace engineering fields. *Materials Today: Proceedings*, 2015. № 2(4/5). P. 3032-3041.

9. Adebisi A. A., Maleque M. A., Rahman M. M. Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2011 № 4. P. 471-480.

10. Yashpal K, Sumanka N. T., Jawalkar C. S., et al. Fabrication of aluminium metal matrix composites with particulate reinforcement: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2017. № 4(2). P. 2927-2936.

11. Sivasankaran S., Ramkumar K.R., Hany R. Ammar, Fahad A. Al-Mufadi, Abdulaziz S. Alaboodi, Osama Mohamed Irfan, Microstructural evolutions and enhanced mechanical performance of novel Al-Zn die-casting alloys processed by squeezing and hot extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021. Volume 292. ISSN 0924-0136.

12. Peng Chen, Haosong Cai, Zhaoqing Li, Maoyuan Li, Hongzhi Wu, Jin Su, Shifeng Wen, Yan Zhou, Jie Liu, Congjun Wang, Chunze Yan, Yusheng Shi, Crystallization kinetics of polyetheretherketone during high temperature-selective laser sintering. *Additive Manufacturing*, 2020. Volume 36. 101615, ISSN 2214-8604.

13. Liu Deli The quasi isostatic pressing method of ceramic products. *Shandong Ceramics*, 2003. №26(004). P. 24-28. ISSN 1005 0639

14. Пашинская Е.Г. Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации. Донецк: Изд-во: Вебер, 2009. 352 с.

15. Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации. Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. 87 с.

16. Raab, G.I. Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels. Materials Science and Engineering, 2005. 230 p.

17. Salischev G.A., Galeyev R.M., Malysheva S.P., Myshlyaev M.M. Nanostruct. Mater. 1999. 407 p.

18. Salishchev G.A., Valiakhmetov O.R., Galeev R.M. . *Journal of Materials Science*, 1993. Vol. 28. P. 2898-2902.

19. Salischev G.A., Galeyev R.M., Malysheva S.P., Myshlyaev M.M. Structure and density of submicrocrystalline titanium produced by severe plastic deformation. *Nanostruct. Mater*.,1999. № 3. P. 407 - 414.

20. Salishchev G.A., Valiakhmetov O.R., Galeev R.M. Formation of submicrocrystalline structure in the titanium alloy VT8 and its influence on mechanical properties. *J. Mat. Sci*., 1993. № 28. P. 2898-2902.

21. Воробьев Б. Я., Олесов Ю. Г., Дрозденко В. А. Производство изделий из порошков титана. Киев: Техника, 1976. 174 с.

22. Еременко В. Н. Титан и его сплавы. Киев: Изд-во АН УССР, 1960. 200 с.

23. Рубцов А. Н., Колошцкий Ф. М., Шеховцев М. Г. Проблемы развития металлургической промышленности. Труды Запорожского филиала Днепропетровского металлургического института. Запорожье, Коммунар ,1971. С. 197-199.

24. Гитман Е. Б. Электрохимия титана в .расплавленных солях. Киев: Наукова думка, 1965. 99 с.

25. Федорченко И. М., Андриевский Р. А. Основы порошковой металлургии. Киев: Изд-во АН УССР, 1961. 420 с.

26. Радомысельский И. Д., Печентковский Е. Л., Сердюк Г. Г. Пресс-формы для порошковой металлургии. Киев: Техніка, 1970. 172 с.

27. Федорченко И.М. Огнев Р.К. Райцес В.Б. и др. В кн. Металлакерамические конструкционные материалы. Киев: Изд-во АН УССР, 1976. С. 75-78.

28. Карпинос Д. М. Порошковая металлургия, 1970. №9. С. 99-104.

29. Важенин С.Ф., Крючек В. Г., Максименко В. М. и др. Титан для оборудования пищевой промышленности. Киев: Техніка, 1973. 102 с.

30. Heckel R. W. Perspectives in Powder in Powder Metallurgy // Advanced experimental techniques in powder metallurgy. N.Y.–L., 1970. Vol. 5. 139 p.

31. Bruckpool J. L. Modern Developments in PM. Vol. 5: Materials and Properties. – New York, 1998. P. 201–216.

32. Фирстов С. А., Демидик А. Н., Иванова И. И. и др. Структура и прочность порошковых материалов / Под ред. С. А. Фирстова, М. Шлессара. Киев: Наук. думка, 1993. 175 с.

33. Мартынова И. Ф. Физические особенности пластической деформации пористых тел. *Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов*. Киев: Наук. думка, 1985. С. 98 – 105.

34. Борисовская Е. М., Назаренко В. А., Подрезов Ю. Н., Коряк О. С., Евич Я. И., Горбань В. Ф. Mechanical properties of powder titanium at different production stages. I. Densification curves for titanium powder billets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2008. №7/8. P. 43-52.