

# ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.762:004

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/01>**Казмиренко Ю.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Матюшин В.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГАРЯЧЕПРЕСОВАНИХ ПОРШКОВИХ ВИРОБІВ

Гаряче пресування є одним з енергоефективних методів одержання порошкових виробів, який уможливує у одному технологічному циклі реалізувати процеси їх формо- і структуроутворення. Проте складність процесу пов'язано із застосуванням спеціального обладнання для термодформаційного ущільнення формувальної суміші. Одержання порошкового виробу з високою розмірною точністю та заданою структурою не завжди реалізується варіюванням технологічних параметрів, а залежить від конструкції і виду прес-форми, комплектації і типу пресуючого пристрою та іншого устаткування. Організація технологічного процесу вимагатиме детальної проробки питань щодо матеріально-технічного забезпечення, зокрема стосовно вибору матеріалів, з яких виготовляється устаткування, що являє собою актуальну тематику для дослідження.

Мета роботи полягатиме у ґрунтовному аналізі переваг і недоліків матеріалів технологічного устаткування як важливої частини матеріально-технічного забезпечення організації процесу виготовлення гарячепресованих виробів.

В основу методології дослідження покладено ситуаційний підхід, запропоновано модель задачі, для чого сформульовано проблемні питання та визначені шляхи їх вирішення. Дослідження проведені на прикладі авторського зразку установки з механічним пресуючим пристроєм. Наводиться технічна характеристика устаткування: комплекту сталевих, керамічних, графітових прес-форм; керамічних штоків для передачі тиску пресування та технологічної кришки, яка застосовується під час термометрування температурного поля печі. Розглянуто вимоги та критерії вибору матеріалів для їх виготовлення. Визначено види бракування заготовок через дефекти технологічного устаткування; проаналізовано причини їх виникнення та заходи щодо усунення.

Результати роботи спрямовані на вирішення важливої науково-практичної проблеми матеріально-технічного забезпечення процесу виготовлення гарячепресованих порошкових виробів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з комп'ютерним моделюванням температурних полів технологічного циклу гарячого пресування.

**Ключові слова:** порошкова металургія, прес-форма, обладнання, ущільнення, формувальна суміш, організація технологічного процесу, ситуаційний підхід.

**Постановка проблеми.** Гаряче пресування є одним з енергоефективних методів одержання порошкових виробів, який уможливує у одному технологічному циклі реалізувати процес їх формо- і структуроутворення. Консолідація компонентів відбувається від впливом прикладання певного тиску до попередньо розігрітої формувальної суміші. Якість і властивості майбутніх виробів залежить від обладнання, що забезпечує рівномірний розподіл температури і тиску, та тех-

нологічного устаткування, за допомогою якого здійснюються процеси спікання і пресування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Метод гарячого пресування застосовується для виготовлення високощільних виробів нескладної конфігурації. Це можуть бути плоскі деталі (диски, сегменти, пластини тощо), антифрикційні, фрикційні матеріали та біметалеві з'єднання [1, с. 101–107]. Поєднання процесів спікання з прикладанням зовнішнього навантаження

вимагатимуть застосування печей, зокрема зі спеціальним середовищем, обладнаних пресувальним пристроєм гідравлічного або механічного типу, вибір якого залежить від пластичних характеристик металевих і неметалевих порошків, структури та фізико-механічних властивостей майбутнього матеріалу. Проблематика розробки експериментального обладнання для технологій порошкової металургії висвітлена у монографії [2]. Автори аналізують процес ущільнення частинок непластичного матеріалу в контейнері прес-форми закритого типу з використанням різних видів пресування [2, с. 30–35], де за критерії обрано умови зберігання заготівкою пружних властивостей. Гаряче пресування тврдосплавних пластин розглянуто в роботі [3, с. 80–85], для їх виготовлення застосовуються порошки ВК8, Т5К10 та системи  $Al_2O_3-TiC-ZrO_2$ . Оригінальність технології полягатиме у оснащенні системою індукційного нагрівання графітової прес-форми, у яку укладаються попередньо спресовані холодним способом заготовки. Складний технологічний цикл завершує спікання тврдосплавних пластин у вакуумі. В статті [4, с. 70–74] розглянуто підготовчі етапи перероблення фторполімерів (політетрафторетилену, кополімеру тетрафторетилену з етиленом, полівінілденфториду) на прес-порошки різного гранулометричного складу з наступним брикетуванням при тисках до 50 МПа за допомогою гідравлічного пресу із зусиллям 5 т. Авторами визначена доцільність застосування відносно невеликих тисків пресування: оптимальні значення становлять 25–30 МПа з витримкою протягом 60–90 с. Це свідчить про нерентабельність використання складних потужних пресувальних пристроїв для пластичних матеріалів. Результати роботи [5, с. 983–993] показали ефективність застосування тиску близько 30 МПа для гарячого пресування керамічних матеріалів системи  $ZrB_2-SiC$ , які отримують із суміші порошків дибориду цирконію  $ZrB_2$ , карбиду бору  $B_4C$ , карбиду цирконію  $ZrC$ . Авторами встановлено, що прикладання тиску уможливило ефект скорочення ізотермічної витримки.

Аналіз робіт [1–5] показав складність процесу отримання порошкових виробів методом гарячого пресування, що пов'язано із застосуванням спеціального обладнання, яке дає можливість здійснювати термодформаційне ущільнення формувальної суміші. Проте в роботах недостатньо висвітлюються питання вибору та проектування технологічного устаткування, за участю якого порошкова заготівка перетворюється на виріб.

В роботі [6, с. 24–31] наводиться порівняльний аналіз конструкцій різних типів прес-форм (для одно- та двобічного пресування, ізостатичного пресування); автори статті формулюють вимоги до прес-форм за критеріями ущільненості порошкових матеріалів, їх тиску на бічну поверхню. Проаналізовані міцнісні характеристики і вартісні показники прес-форм з елементами, виготовленими з металевих, керамічних та вуглецевих матеріалів, але не дослідженим залишається вплив температури на їх окислювання та зносостійкість.

Метою гарячого пресування є одержання порошкового виробу з високою розмірною точністю та заданою структурою, що не завжди можна реалізувати лише варіюванням технологічних параметрів. Організація технологічного процесу вимагатиме детальної проробки питань щодо матеріально-технічного забезпечення, зокрема стосовно вибору матеріалів, з яких виготовляється технологічне устаткування, що являє собою **актуальну тематику** для дослідження.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягатиме у ґрунтовному аналізі переваг і недоліків матеріалів технологічного устаткування як важливої частини матеріально-технічного забезпечення організації процесу виготовлення гарячепресованих виробів.

**Виклад основного матеріалу.** На підставі проведеного огляду літератури [1–7] авторами статті сформульовано (табл. 1) проблемні питання щодо організації технологічного процесу гарячого пресування порошкових виробів та визначені шляхи їх вирішення.

В основу методології досліджень покладено ситуаційний підхід, що описує розв'язання окремих управлінських ситуацій, які впливатимуть на організацію робочого, зокрема технологічного процесу [9]. На рис. 1 у графічному вигляді наведено модель задачі, яка описує організацію технологічного процесу отримання матеріалів певної структури і властивостей як систему матеріально-технічного забезпечення.

Об'єктом досліджень є процеси гарячого пресування металевих, неметалевих порошків та їх сумішей із застосуванням обладнання з механічним пресуючим пристроєм. Як приклад розглянуто авторський зразок установки (рис. 2а), за допомогою якої виконувались експериментальні роботи з формування стеклокомпозитів для глибоководної техніки [7] та біметалевих з'єднань, які складаються з бронзобабітового порошкового шару, напресованого на підготовлену певним чином сталеву підкладку [8].

**Аналіз шляхів вирішення проблемних питань організації технологічного процесу гарячого пресування порошкових виробів**

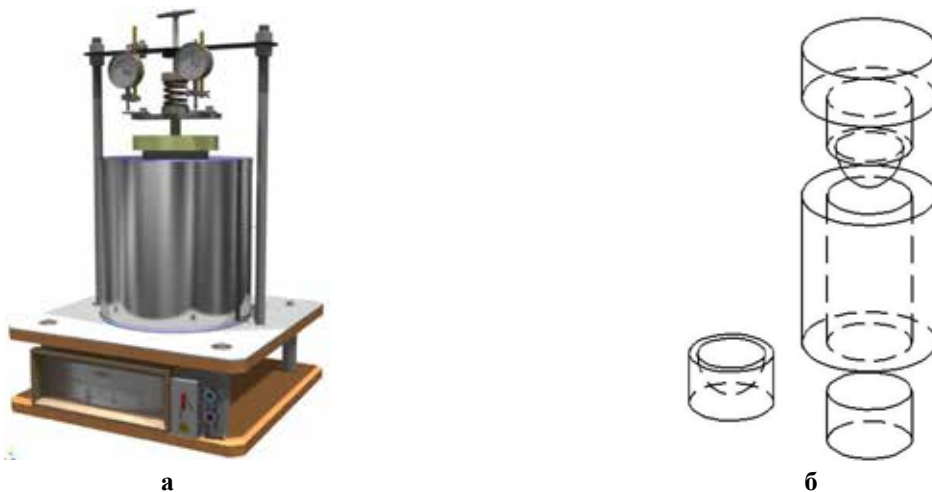
Проблемні питання	Шляхи вирішення
Рівномірне прогрівання формувальної суміші	Застосування розбірної конструкції прес-форми; розрахунок товщини стінок, виходячи з теплофізичних властивостей матеріалу прес-форми; термометрування печі
Контроль і вимірювання усадочних процесів	Оснащення індикатором переміщення пуансону прес-форми, за допомогою якого проводяться вимірювання усадочних процесів за кожну хвилину; побудова кінетичних кривих усадки
Вимірювання та підтримка тиску пресування протягом всього технологічного процесу	Передача навантаження від механічного пристрою до прес-форми через шток
Контроль структури і лінійних розмірів виробів	Можливість зупиняти процес гарячого пресування

Джерело: складено авторами



**Рис. 1. Модель задачі організації технологічного процесу виготовлення гарячепресованих виробів**

Джерело: складено авторами



**Рис. 2. Експериментальна установка (а) і прес-форма (б)**

Установка включає у себе шахтну лабораторну піч електроопору вертикального завантаження з номінальною температурою до 900 °С та окиснювальною атмосферою, блок управління та механічний пресуючий пристрій, який, у свою чергу, складається з траверси, що опирається на силові штанги і в якій розміщується навантажувальний гвинт, шток і силова пружина. Зусилля пресування передається через відтаровані силові пружини, які виготовлені зі сталей марок 60С2А і 65Г.

Процеси деформування і спікання порошків здійснюються у прес-формі (рис. 2б), у яку засипають формувальну порошок суміш. Прес-форма матиме рознімну конструкцію і складається з матриці, підставки та верхнього пуансона. Основним призначенням матриці (рис. 3а, в, г) є формування бокової поверхні виробу, підставки – нижньої поверхні та усунення висипання формувальної суміші. Прес-форма розташовується

у робочому просторі печі, закривається верхнім пуансоном (рис. 3б), через який на формувальну суміш передається навантаження від механічного пресуючого пристрою, як це показано на рис. 4.

Тиск пресування передається через пристрій з силовою пружиною на шток і пуансон прес-форми. Величина стискання пружини контролюється за допомогою спеціальної лінійки, що дає змогу підтримувати певну величину тиску або змінювати його протягом всього процесу спікання. Замість лінійки можна використовувати індикатор часового типу, як це показано на рис. 2а.

Шток для передачі зусилля крім осьового механічного навантаження зазнає термічного впливу та тертя з пуансоном прес-форми. Як показали експериментальні роботи, заклінювання штоку може призвести до поверхневої деформації виробу та нерівномірного розподілу щільності пресовки. У більшості випадків це заважатиме здійснювати процес прикладання тиску до розігрітої порошок суміші.



а  
( $d = 50$  мм;  $H = 50$  мм;  
 $\delta = 35$  мм)



б



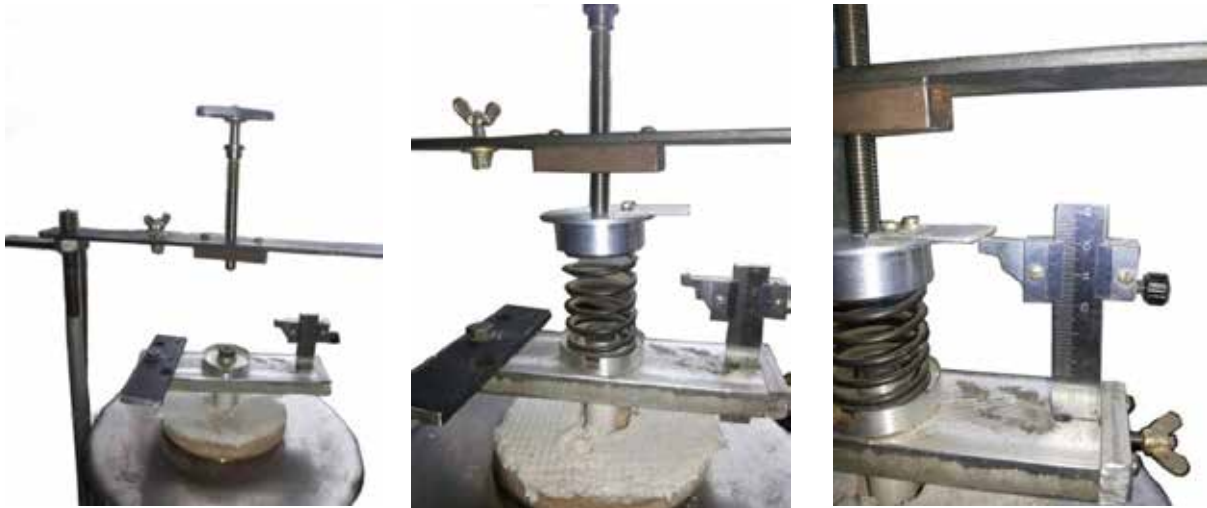
в  
( $d = 50$  мм;  $H = 60$  мм;  
 $\delta = 10$  мм)



г  
( $d = 50$  мм;  $H = 60$  мм;  
 $\delta = 30$  мм)

Рис. 3. Комплектуючі для прес-форми: матриця (а, в, г) і графітові пуансони (б):  
 $d$  – внутрішній діаметр;  $H$  – висота;  $\delta$  – товщина стінки

Джерело: світлини зроблено авторами



**Рис. 4.** Етапи прикладання тиску пресування

*Джерело: світлина зроблено авторами*

При виборі матеріалу для виготовлення штоку слід також враховувати різницю у термічних коефіцієнтах лінійного розширення (ТКЛР) з елементами прес-форми. Якщо технологічний процес виготовлення порошкового виробу включає у себе додаткові динамічні, зокрема вібраційні навантаження, то шток доцільно виготовляти з титанового деформуємого сплаву, наприклад, ВТ14. Для додаткового підвищення зносостійкості та коефіцієнту розсіювання енергії рекомендується нанесення плазмового покриття. Результати експериментальних досліджень, наведених у роботі [10], показали позитивний вплив технології нанесення плазмових покриттів з порошку ПН55Т45 на поверхню титанового сплаву марки ВТ14 на його деформувальну здатність та міцнісні властивості. Задля утворення мартенситної структури покриттів зразки загартовано при температурі 820 °С протягом 1 год з охолодженням у воді. Для технологій гарячого пресування з використанням

керамічних або графітових прес-форм (рис. 3а, в) доцільно застосовувати штоки, які виготовлені з корундової кераміки (рис. 5).

Вибір матеріалу прес-форми для виготовлення гарячепресованих порошкових виробів здійснюється на основі критеріїв складності їх конфігурації, бокового тиску порошку на стінки матриці. Крім того, прес-форма повинна забезпечувати рівномірне прогрівання формувальної суміші та чистоту поверхні майбутнього виробу. Експериментальні роботи включали у себе дослідження процесу гарячого пресування у графітовій (рис. 3а), сталевій (рис. 3б) та керамічній (рис. 3в) прес-формах з графітовим (рис. 3б) пуансоном. Сталеву форму виготовлено із нержавіючої сталі марки Х18Н9Т. Застосування цієї форми забезпечує рівномірний розподіл щільності і пористості формувальної суміші по всьому об'єму, форма матиме високу міцність та зносостійкість. Проте в процесі спікання порошок прилипає



**Рис. 5.** Комплект штоків для передачі тиску

*Джерело: світлина зроблено авторами*

до внутрішньої поверхні, що може призвести до великої кількості бракованих виробів та вимагатиме застосування спеціального змащування.

Для спікання металевих порошків, зокрема порошків сталі, алюмінію, нікелю доцільно застосовувати керамічні (корундові, алундові) прес-форми. Переваги їх застосування полягатимуть у хімічній стійкості та низькому ТКЛР. Але через високі статичні навантаження тонкостінні матриці можуть зазнавати руйнування. Тому керамічні прес-форми переважно використовуються для гарячого пресування пластичних порошків, процес структуроутворення яких не вимагатиме прикладання великого тиску (для даної установки це 2 МПа).

Застосування графітової прес-форми зменшує бічне тертя, покращує процес ущільнення, що, у свою чергу, забезпечує рівномірний розподіл порошкових компонентів у складі формувальної суміші. У прес-формі (рис. 2а), виготовленій з термічно необробленого графіту (марки МПГ6), герметично закритої графітовим пуансоном (рис. 2б) утворюється ефект спікання у спеціальній атмосфері СО. В роботі [7, с. 174–170] показана ефективність формування гарячепресованих стеклокомпозитів зі скляних мікросфер у графітових прес-формах. Це пояснюється тим, що дрібнозернистий графітовий пил є активним

відновником кремнезему, який сприяє прискоренню утворення центрів кристалізації SiO<sub>2</sub>. При температурі вище ніж 300 °С графіт окислюється та вступає в реакцію з повітрям, що знаходиться у порах формувальної суміші, що сприятиме спіканню у атмосфері СО. Цей ефект було апробовано в роботі [8, с. 24–27] при гарячому суміші порошків бронзи і бабіту на луджену поверхню сталевого зразку (сталь 20). Застосування графітової прес-форми не вимагатиме додаткового змащування внутрішніх поверхней матриці та запобігає прилипанню порошку.

В табл. 2 наведено основні види дефекти гарячепресованих матеріалів через несправності технологічного устаткування; визначено можливі способи усунення і профілактичні заходи.

Більшість дефектів гарячепресованих матеріалів пов'язано з нерівномірним розподілом температури у робочому просторі печі. Профілактичні заходи включатимуть у себе термометрування температурних полів зі складанням температурних поправок, для чого застосовується технічна кришка, виготовлена з корундової кераміки. Технологічна кришка (рис. 6 а) має два отвори. У центральному отворі розташовується термометр скляний ртутний (ДСТУ 3742-98), призначений для точних вимірювань температури в діапазоні від 0 до 500 °С. Термометр поміщається

Таблиця 2

**Основні види дефектів гарячепресованих матеріалів через несправності технологічного устаткування**

Вид бракування	Технологічна причина	Способи усунення і профілактичні заходи
Деформація поверхні виробу	Заклінювання штоку. Сколи, подряпини та інші пошкодження внутрішньої поверхні матриці прес-форми. Нерівномірний розподіл температурного поля в печі	Спостереження за усадочними процесами дає можливість зупинити спікання у певний час; термометрування робочого простору печі
Нерівномірний розподіл щільності	Заклінювання штоку; перекошення пуансону прес-форми; нерівномірний розподіл температурного поля в печі	Контроль за правильним розташуванням пуансону, штоку; термометрування робочого простору печі
Прилипання порошку до внутрішньої поверхні прес-форми	Низька чистота внутрішніх поверхонь елементів прес-форми	Своєчасне очищення прес-форми; обробка внутрішньої поверхні прес-форми графітовими змазками
Дефекти поверхні виробів	Задирки матриці призводять до виникнення численності рисок на поверхні пресовок, а недостатньо якісна обробка робочої поверхні пуансонів – до відколів на торцях пресовки, особливо на їх кромках	Контроль за шорсткістю внутрішньої поверхні матриці прес-форми; своєчасне очищення прес-форми
Відхилення по щільності в різних перетинах порошкових брикетів	Неправильне зняття навантаження	Для запобігання явищу пружної післядії тиск пресування рекомендується знімати після повного остигання робочого простору печі

Джерело: складено авторами





а



б

**Рис. 6. Технологічна кришка с отвором (а), у який вставляється термопара (б)**

*Джерело: світлина зроблено авторами*

безпосередньо у прес-форму (без пуансона) з формувальною сумішшю. У додатковому маленькому отворі розміщується хромель-алюмелева термопара, яка вимірює температуру у печі. Показники термопари реєструються за допомогою мілівольтметра типу Ш4501, який вбудований у конструкцію установки, як це показано на рис. 2а. Під час контрольних заходів з термометрування піч розігрівається до температури 500 °С зі швидкістю підйому температури 20 °С/хв. За різницями показників термопари і термометра для кожних наступних 50 °С встановлюється температурна поправка, яку далі враховують при складанні технологічного процесу.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з комп'ютерним моделюванням температурних полів технологічного циклу гарячого пресування металевих, неметалевих порошків та їх сумішей з використанням сталевих, графітових і керамічних прес-форм.

Результати роботи спрямовані на вирішення важливої науково-практичної проблеми матеріально-технічного забезпечення процесу виготовлення гарячепресованих порошкових виробів.

**Висновки.** В основу методології дослідження покладено ситуаційний підхід, запропоновано модель задачі, для чого сформульовано проблемні питання та визначені шляхи їх вирішення.

Дослідження проведені на прикладі авторського зразку установки з механічним пресуючим пристроєм і комплектом сталевих, керамічних, графітових прес-форм; керамічних штоків для передачі тиску пресування та технологічної кришки, яка застосовується під час термометрування температурного поля печі. Розглянуто вимоги та критерії вибору матеріалів для їх виготовлення.

Визначено види бракування заготовок через дефекти технологічного устаткування; проаналізовано причини їх виникнення та заходи щодо усунення.

#### Список літератури:

1. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Нгуен К. К., Радченко Л. О. Одержання біметалів методами порошкової металургії (Огляд). *Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства*. Київ : ІПМ НАН України. 2011. Вип. 20. С. 101–107.
2. Іцкович-Лотоцький Р. Д., Зелінська О. В., Іванчук Я. В. Технологія моделювання оцінки параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом : монографія. Вінниця : ВНТУ. 2018. 153 с.
1. 3.Кліменко С. А., Прокопів М. М., Створення нових типів конкурентоспроможних різальних пластин та виготовлення дослідної партії інструменту для механічної обробки важкооброблювальних матеріалів. *Наука та інновації*. 2018. № 14 (1). С. 80–85.
3. Пікула І. І., Кабат О. С. Визначення оптимальних технологічних параметрів брикетування полімерів. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2024. № 2. Р. 70–74.
4. Чорнобук С. В., Гончаренко А. О., Попов О. Ю., Макара В. А. Особливості фазо- та структуроутворення при реакційному гарячому пресуванні композитів системи ZrB<sub>2</sub>-SiC. *Металофізика та новітні технології*. 2017. Том 39. Вип. 7. С. 983–993.
5. Навін Кумар, Аджая Бхарті, Маніш Діксіт. Типи прес-форм та стисливість різних матеріалів. *Порошкова металургія*. 2021. № 07/08. С. 24–31.

6. Kazymyrenko Yu., Solomoniuk N., Drozd O. Glass microspheres thermo-deformation sintering processes in the technologies of obtaining materials for underwater technical equipment. *POLISH MARITIME RESEARCH*. 2023. № 3 (119). Vol. 30. P. 174–180.

7. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю. Закономірності формування покриття з порошків бронзи та бабіту методом гарячого пресування. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. 2015. № 5/7 (25). С. 24–27.

8. Полянська А. Формування концепції розвитку підприємств на засадах ситуаційного управління. *Демократичне врядування*. 2012. Вип. 9. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/DeVr\\_2012\\_9\\_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/DeVr_2012_9_33) (дата звернення 24.05. 2024)

9. Kazymyrenko Yu. O., Lebedeva N. Yu., Makrukha T. O. Increasing the Damping Capability of Titanium Alloys by Deposition of Plasma Coatings Made from Titanium Nickelide. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2023. Vol. 45. № 4. P. 457–467.

### **Kazymyrenko Yu.O., Matiushin V.O. SELECTION OF MATERIALS FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR THE MANUFACTURE OF HOT-PRESSED POWDER PRODUCTS**

*Hot pressing is one of the energy-efficient methods of obtaining powder products, which makes it possible to implement the processes of their shaping and structure formation in one technological cycle. However, the complexity of the process is associated with the use of special equipment for thermal deformation compaction of the molding slurry. Obtaining a powder product with high dimensional accuracy and a given structure is not always realized by varying technological parameters, but depends on the design and type of mold, configuration and type of pressing device and other equipment. The organization of the technological process will require a detailed study of issues related to material and technical support, In particular, regarding the choice of materials from which the equipment is made, which is a relevant topic for research.*

*The purpose of the work will be a thorough analysis of the advantages and disadvantages of materials of technological equipment as an important part of the material and technical support of the organization of the process of manufacturing hot-pressed products.*

*The methodology of the study is based on the situational approach, a model of the problem is proposed, for which problematic issues are formulated and ways to solve them are determined. The research was carried out on the example of the author's sample of an installation with a mechanical pressing device. The technical characteristics of the equipment are given: a set of steel, ceramic, graphite molds; ceramic rods for the transfer of pressing pressure and a technological cover, which is used during the thermometry of the temperature field of the furnace. The requirements and criteria for the selection of materials for their manufacture are considered. The types of rejection of blanks due to defects in technological equipment are determined; The defect of their occurrence and measures for elimination are analyzed.*

*The results of the work are aimed at solving an important scientific and practical problem of material and technical support of the process of manufacturing hot-pressed powder products. Prospects for further research are related to computer modeling of temperature fields of the technological cycle of hot pressing.*

**Key words:** powder metallurgy, mold, equipment, compaction, molding mixture, organization of the technological process, situational approach.