

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

ЗАБОЛОТНИЙ ОЛЕГ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.762.4

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ
ПРЕСУВАННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ПОРИСТИХ
ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

05.16.06 – Порошкова металургія та композиційні матеріали

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2004

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Луцькому державному технічному університеті,
Міністерство освіти і науки України

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, професор
Рудь Віктор Дмитрович, Луцький
державний технічний університет,
професор кафедри сучасних технологій
в машинобудуванні

Офіційні опоненти:

Член кореспондент НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Бондаренко Володимир Петрович**, інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України, заступник директора з наукової роботи

кандидат технічних наук, доцент **Юрченко Олег Сергійович**, Національний педагогічний університет ім. М.П.Драгоманова, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін

Провідна установа: Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, м. Київ

Захист відбудеться « 03 » березня 2004 року о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.002.12 Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, Київ-56, просп. Перемоги, 37, корп. № 9, ауд. 203

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « 15 » січня 2004 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Л.М.Сиропоршнев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасних умовах при виробництві виробів необхідно прагнути до підвищення ефективності на всіх стадіях виготовлення і використання продукції. Цю задачу вирішує порошкова металургія, яка дозволяє вести безвідходне виробництво, зберігати енергію і матеріали, скорочувати трудові витрати, забезпечує охорону навколишнього середовища та дозволяє розв'язати ряд екологічних проблем. На сучасному етапі розвитку економіки України роль порошкової металургії оцінюється неоднозначно. З одного боку, при виготовленні деталей конструкційного призначення вона втрачає свої позиції через значну енергоємність отримання вихідної сировини – порошків. З другого боку, при виготовленні виробів з унікальними властивостями її роль зростає і в багатьох випадках це єдино можливий шлях їх отримання.

Одним з важливих напрямків порошкової металургії є створення проникних порошкових матеріалів, працездатність та область застосування яких визначається наявністю взаємозв'язаної структури пор. Ця структура забезпечується всіма операціями технологічного процесу, але вирішальний етап технології – це формування заготовок, який визначає не тільки розміри, форму, густину, продуктивність, безпеку і культуру праці, але й впливає на ряд найважливіших властивостей готового продукту.

Розвитку уявлень про деформаційні процеси, що проходять в порошкових середовищах присвятили свою увагу такі відомі вітчизняні і закордонні вчені як М.Ю.Бальшин, Л.С.Богінський, В.П.Бондаренко, П.А.Вітязь, В.М.Горохов, Р.Дж.Грін, П.Доремус, Е.А.Дорошкевич, Г.М.Жданович, Л.А.Ісаєвич, А.Кокс, А.Г.Косторнов, О.М.Лаптев, Е.М.Макушок, В.З.Мідуков, П.Е.Перельман, Л.Г.Петросян, О.П.Реут, О.В.Роман, В.Д.Рудь, В.В.Скороход, А.М.Степанчук, Т.Табата, С.Шима, М.Б.Штерн та багато інших. Аналіз цих робіт показує, що опис багатофакторного процесу ущільнення порошкових середовищ може ґрунтуватися на вивченні контактної взаємодії частинок середовища або використанні континуальних уявлень про його реологічні властивості. Перспективним напрямком є розробка континуальних моделей з врахуванням структурної будови пористого тіла.

При виготовленні довгомірних осесиметричних виробів найбільш раціональним методом формування є сухе радіально-ізостатичне пресування (СР-ІІ). Найбільш детально і повно цей метод досліджувався Мінською науковою школою під керівництвом професора Л.С.Богінського. Поряд із беззаперечними перевагами застосування СР-ІІ для отримання порошкових матеріалів (ПМ), як відмічають і самі автори, не вдалося уникнути деяких негативних моментів: проблема отримання ПМ з рівномірним розподілом густини по об'єму, низька надійність робочого інструменту, додаткові енерговитрати на деформацію робочого середовища та ін.

Тому комплексне дослідження закономірностей ущільнення ПМ, спрямоване на створення і впровадження вдосконалених технологій, обладнання та інструменту є актуальною науковою і практичною задачею в області порошкової металургії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота є складовою частиною планів науково-дослідної роботи, яка виконувалась за замовленням Державного Комітету України з питань науки і технології. Номер державної реєстрації 05.55.05 / 004Б-92 “Розробка технологій холодного і гарячого ущільнення конструкцій та виробів з порошкових матеріалів” за напрямком 04.07 “Економічні порошкові технології в металургії, металообробці та інших галузях виробництва”. Є складовою частиною робіт згідно з міжнародною програмою INTAS – 96-2343 “Основи і експериментальне дослідження формоутворення, спікання і ущільнення в сучасних порошкових технологіях”; договором про науково-технічну співпрацю № 127/н між Луцьким державним технічним університетом (ЛДТУ) та Інститутом підвищення кваліфікації кадрів за новими напрямками розвитку техніки і технології при Міністерстві Освіти республіки Білорусь (ІПК МО РБ).

Мета і задачі дослідження. *Мета роботи* – підвищення ефективності процесів радіально-ізостатичного пресування порошкових середовищ за рахунок створення та впровадження нових технологічних схем, вдосконалення обладнання, інструменту та технологій.

Для реалізації мети поставлені наступні задачі:

- з врахуванням реальної поведінки порошкового середовища при його деформуванні встановити зв'язок густини пресовки з тиском пресування;
- уточнити модель пластичності порошкових середовищ з врахуванням їх механічних та структурних характеристик та оцінити її адекватність для вибраних схем пресування;
- за допомогою уточненої моделі пластичності виконати комплекс теоретичних досліджень по визначенню напружень, густин пресовок, енергосилових параметрів процесу та провести експериментальну оцінку точності розрахунків;
- на основі теоретичних і експериментальних досліджень вдосконалити і впровадити у виробництво обладнання, інструмент та технології для виготовлення фільтруючих матеріалів (ФМ) на основі металів та кераміки.

Об'єктом дослідження є процес радіально-ізостатичного пресування при ущільненні порошків на оправку.

Предмет дослідження – підвищення ефективності радіально-ізостатичного пресування за рахунок використання оптимальних схем пресування, вдосконалення обладнання та інструменту, зниження матеріальних і трудових витрат, підвищення продуктивності процесу.

Методи дослідження. При виконанні роботи використовувались сучасні методи, прилади та обладнання. Радіально-ізостатичне пресування на оправку та досліди при складному навантаженні проводили на оригінальних експериментальних і дослідних установках, які розроблені і виготовлені в ЛДТУ. Дослідження топографії поверхні та мікроструктури порошків і матеріалів проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопу “Нанолаб-7” (“Оптон”, Німеччина) і на металографічному

мікроскопі моделі MeF-2 (“Рейхерт”, Австрія). Гранулометричний склад порошків визначали на автоматичному аналізаторі частинок моделі ТА (“Культронікс”, Франція) і за допомогою телевізійного мікроскопу “Квантімет-720” (“Метал Рісеч”, Англія). Пористість, максимальний і середній розміри пор, коефіцієнт проникності ППМ визначали за ГОСТ 25281-82 і ГОСТ 25283-82. Вимірювання густини по товщині виробу здійснювали на телевізійному мікроскопі “Квантімет-720”. Для обробки результатів досліджень використовувався сучасний математичний апарат і програмне забезпечення.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше висунуті або удосконалені такі наукові положення:

1. Для аналітичного опису процесу пресування запропоновано уточнене рівняння пресування, яке враховує властивості порошкового матеріалу, його зміцнення в процесі пресування, схему навантаження, що дозволяє у цілому достовірно описати деформаційну поведінку матеріалу.

2. З позицій континуальної теорії уточнена модель пластичності порошкових середовищ, яка базується на умові текучості з поверхнею навантаження у вигляді центрального еліпсоїда і відрізняється тим, що встановлює зв'язок компонент тензору напружень не тільки з густиною та механічними характеристиками матеріалу, але й враховує параметри, які містять інформацію про структурні особливості порошкового тіла та зміцнення порошкового матеріалу в процесі пресування. Показано, що явний вид поверхні навантаження при пресуванні порошкових матеріалів може бути визначено на базі аналізу результатів їх статичного та гідростатичного пресування.

3. На основі уточненої моделі пластичності розроблені принципи визначення напружено-деформованого стану в пресовках для радіальної схеми навантаження, що дозволяє при розрахунках прогнозувати розподіл фізико-механічних характеристик по об'єму пресовки, а також проводити силовий розрахунок обладнання та оснастки для СР-ІІІ.

4. Вивчено вплив на роботу пресування при радіальній схемі навантаження густини, геометрії пресовки та фізико-механічних характеристик порошкового матеріалу. Останнє дозволяє прогнозувати енергосилові параметри СР-ІІІ.

5. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень вперше запропоновано нові технологічні схеми і конструктивні рішення обладнання та інструменту для реалізації СР-ІІІ, які дозволяють, за рахунок створення умов квазіізостатичного пресування та зниження контактної тертя між порошком і елементами оснастки, отримувати порошкові вироби (як простої так і складної в поперечному перерізі форми) з рівномірним розподілом густини по об'єму і стабільними експлуатаційними характеристиками.

Практичне значення одержаних результатів. Результати проведених досліджень є основою для оптимізації процесу СР-ІІІ.

Запропоновано нову конструкцію армованого еластичного вкладиша прес-блоку, яка за рахунок зменшення об'єму проміжних середовищ і формування в ньому манжет високого тиску на етапі відливання зменшує енерговитрати при пресуванні та підвищує надійність його роботи.

Для отримання рівномірного розподілу густини по об'єму пресовки рекомендується використовувати наладки з використанням еластичних втулок та еластичної пробки, що герметично заповнена рідиною.

З метою забезпечення максимальної продуктивності та гнучкості виробництва рекомендується використовувати групові наладки і набір еластичних оболонок.

Для підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів (коефіцієнт проникності, брудомісткість) пропонується використовувати багат шарові ФМ на основі сумішей порошків $Ti+C$ із наступним спіканням в режимі саморозповсюджуючого високотемпературного синтезу (СВС).

Практична спрямованість проведених досліджень підтверджена впровадженням конкретних результатів роботи на ряді підприємств:

- На ВАТ “Електротермометрія”, м. Луцьк впроваджено двохшарові ФМ на основі суміші порошку титану марки ПТС з вуглецем технічної марки ПМ-16Е і порошку титану марки ПТК для доочищення води від механічних забруднень і використання їх у водолічильниках.

- На ВАТ “Луцький підшипниковий завод”, м. Луцьк впроваджено для очищення змащувально-охолоджувальних рідин та мастил двохшарові ФМ із суміші порошку титану марки ПТС з вуглецем технічної марки ПМ-16Е (тонка очистка) і порошку титану марки ПТК (груба очистка).

- На кафедрі сучасних технологій в машинобудуванні ЛДТУ спроектована та виготовлена дослідна установка для СР-ІІІ на оправку та організовано на її основі дослідну ділянку по виготовленню ФМ.

Основні результати роботи, методики досліджень використані в навчальних курсах: “Технологічні основи одержання виробів з порошкових матеріалів”, “Порошкові та композиційні матеріали”, “Маловідходні технології в машинобудуванні” ЛДТУ.

Особистий внесок здобувача. Основні положення, висновки і рекомендації належать автору, який визначив мету і поставив задачі досліджень, вдосконалив обладнання та інструмент для СР-ІІІ ПМ на оправку.

З позицій континуальної теорії здобувачем уточнена модель пластичності порошкових середовищ, яка базується на умові текучості з поверхнею навантаження у вигляді центрального еліпсоїда. При цьому було використано нові розрахункові залежності опорів деформуванню порошкових середовищ, які враховують зміцнення порошкового матеріалу в процесі пресування для різних густин і властивостей ППМ. Основна відмінність моделі полягає у тому, що вона встановлює зв'язок компонент тензору напружень не тільки з густиною і механічними характеристиками матеріалу

середовища, а й з параметрами, що містять інформацію про структурні особливості порошкового тіла та зміцнення матеріалу в процесі пресування.

Автором проведено теоретичні та експериментальні дослідження радіально-ізостатичного пресування порошків на оправку в результаті яких визначено напружено-деформований стан в пресовках для радіальної схеми навантаження, отримано рівняння для визначення енергосилових параметрів залежно від густини, структурних, фізико-механічних та геометричних характеристик порошкового тіла, що стало основою для розрахунку технологічних параметрів обладнання та інструменту.

Розроблено технологію, оснастку, дослідну і напівпромислову установки для пресування ізотропних і багат шарових ФМ на основі металів та кераміки. Визначено перспективи розвитку СР-ІІІ матеріалів в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва.

Експериментальні дослідження властивостей ППМ проводились спільно з ПК МО РБ, згідно договору про науково-технічну співпрацю.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідались з 14-ї по 18-ту науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ЛДТУ протягом 1999-2003 рр., V-й Міжнародній науковій конференції “Математичні проблеми механіки неоднорідних структур” – Львів, 2000 р., “15 International Plansee Seminar”. Powder Metallurgical. High Performance Materials. – Austria, Reutte, 2001, Міжнародному семінарі “Комп’ютерне проектування технологій сучасного матеріалознавства” – Запоріжжя, 2002 р., I-й Міжнародній науково-технічній конференції “Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления” – Мінськ, 2002 р.

Публікації. Основні наукові результати, що отримані у дисертаційній роботі опубліковані у 12 наукових роботах, з них 6 статей у провідних фахових виданнях та один патент.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота за структурою складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Роботу викладено на 176 сторінках машинописного тексту, що містить 62 ілюстрації та 5 таблиць, список використаних джерел із 148 найменувань наведено на 15 сторінках та додатки на 26 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито сутність та стан наукової проблеми та її значущість, обґрунтовано актуальність та необхідність проведення дослідження.

У **першому** розділі аналізуються сучасні уявлення про процеси пресування і традиційні способи виготовлення ППМ, обґрунтовується вибір раціональних схем пресування, які дозволять комплексно реалізувати сучасні вимоги до виробництва і якості виробів.

Аналітичний огляд досліджень і розробок прогресивних технологій дозволив встановити, що в даний час визначено два основних підходи до теоретичних досліджень процесів пресування: контактний і континуальний. Встановлено, що існуючі теоретичні закономірності для опису процесів ущільнення металевих порошків з одного боку мають загальний характер, базуються на взаємозв'язку тензора напруг, тензора деформацій, та параметрів пористості і не враховують структурні особливості матеріалів. З другого боку, існує велика кількість моделей на базі структурного підходу, основним обмеженням яких є утрудненість практичного застосування, оскільки вони містять значну кількість структурних параметрів, врахувати які досить складно. Аналіз існуючих типів поверхонь навантаження показав, що поверхні текучості у вигляді еліпсоїда обертання розширюють уявлення про механізм деформаційної поведінки пористих середовищ [2, 9]. Отже очевидно, що модель пластичності ПМ має бути багатопараметричною і повинна враховувати особливості порошкового середовища, що ущільнюється.

Аналіз сучасних технологічних процесів порошкової металургії показує, що процеси консолідації порошкових матеріалів на етапі формування заготовок, мають вирішальний вплив на якість та економічні характеристики при виготовленні готових виробів. Традиційні процеси пресування такі як гідростатичне, гідродинамічне, магнітно-імпульсне, еластостатичне, осьове, мундштучне формування, прокатування та ін. володіючи перевагами, мають ряд обмежень і тому повністю не вирішують проблему виготовлення якісних ППМ [3]. Раціональні технології повинні комплексно задовольняти сучасні вимоги, що висуваються до властивостей виробів, їх виготовлення, безпеки та культури праці і повинні забезпечувати відносно мінімальні енергосилові параметри, гнучкість виробництва і т.д. Крім цього, метод формування у значній мірі залежить від складності форми та геометричних розмірів виробу, від його експлуатаційних властивостей. При виготовленні довгомірних ППМ цим вимогам найбільше відповідають радіальна схема пресування і схема усестороннього стиску (рис. 1), тому вони можуть бути основою для створення нових і вдосконалення існуючих технологій, обладнання та інструменту [1].

Оптимальним процесом для реалізації радіальної схеми ущільнення є СР-ІІ, коли форма з порошком ізольована від робочої рідини еластичним середовищем, що дозволяє більш ефективно механізувати та автоматизувати процес, підвищити культуру виробництва та зменшити енерговитрати за рахунок зменшення об'єму проміжних середовищ [1]. Малі об'єми проміжних середовищ при СР-ІІ дозволяють зменшити, металомісткість, габарити і вартість обладнання в порівнянні з гідростатичним пресуванням.

Оцінка ефективності сухого ізостату в порівнянні з гідростатом з позицій габаритних розмірів (металоємність) і вартості обладнання показує, що коефіцієнт зменшення габаритів k_z установок, що порівнюються для реальних пресовок $d_{np}=60...80$ мм складає $k_z=2..2,1$, а коефіцієнт зменшення металомісткості $k_m=3,7...4,1$.

Зрозуміло, що з врахуванням вартості матеріалу і витрат на механічну обробку, вартість виготовлення основних деталей установок, що порівнюються буде відрізнятись у 6...8 разів. Реальні рідкі та еластичні середовища при тисках, необхідних для пресування ущільнювальних матеріалів, володіють здатністю до стискування, що обумовлює збільшення енерговитрат при здійсненні процесів пресування і зниження їх продуктивності. При гідростатичному пресуванні, наприклад, втрати енергії по цій причині складають 40...60% залежно від об'єму середовищ, які передають тиск. Для створення робочого тиску зазвичай використовують гідравлічні станції високого тиску. На жаль, пристрої такого типу, як правило, мають невисоку продуктивність. Тому установки для СР-ІІІ, які відрізняються малими об'ємами проміжних середовищ, при інших рівних умовах дозволять зменшити енерговитрати і підвищити продуктивність процесів пресування.

У **другому** розділі викладено теоретичні та експериментальні дослідження по уточненню умови пластичності порошкового середовища, що ущільнюється. Проблема вивчення форми поверхні текучості в процесі деформування пов'язана з визначенням закономірностей ущільнення порошків з врахуванням структурних характеристик ППМ і є актуальною для подальшого вдосконалення теорії та практики СР-ІІІ. Експериментальні дослідження проведені В.Д.Рудем і В.З.Мідуковим свідчать про те, що форма поверхні навантаження в площині p - T представляється еліпсом зсунутим вздовж гідростатичної осі. Для схем ущільнення порошків від осьового пресування в жорстких прес-формах без зовнішнього тертя до гідростатичного стиску пропонується використовувати моделі пластичності у вигляді центрального еліпсоїда. Це дозволить отримати з достатньою точністю для практичних розрахунків технологічних параметрів і властивостей ППМ більш прості залежності, які не містять параметр зміщення центру еліпсоїда вздовж гідростатичної осі.

Для визначення математичної та фізичної природи критерію пластичності використано непрямий метод, при якому вибирається науково обґрунтований критерій пластичності, а характерні значення параметрів середовища встановлюються розрахунково чи експериментально. Оскільки в роботі розглядаються схеми ущільнення, які лежать в діапазоні від осьового пресування в жорсткій матриці без зовнішнього тертя до гідростатичного стиску, то при інтерполяції критерію текучості розглядалися саме ці дві схеми. Наведені схеми ущільнення найбільш точно описуються уточненим рівнянням К.А.Конопицького-С.Торре, яке враховує властивості порошку і його зміщення в процесі пресування [3]:

$$p = 2\sigma_{T_0} \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^k \ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu}, \quad (1)$$

де σ_{T_0} – границя текучості матеріалу частинок порошку у вихідному стані; ν і ν_0 – поточна і початкова відносна густина формовки відповідно; k – показник зміщення, що залежить від властивостей матеріалу порошку і схеми пресування.

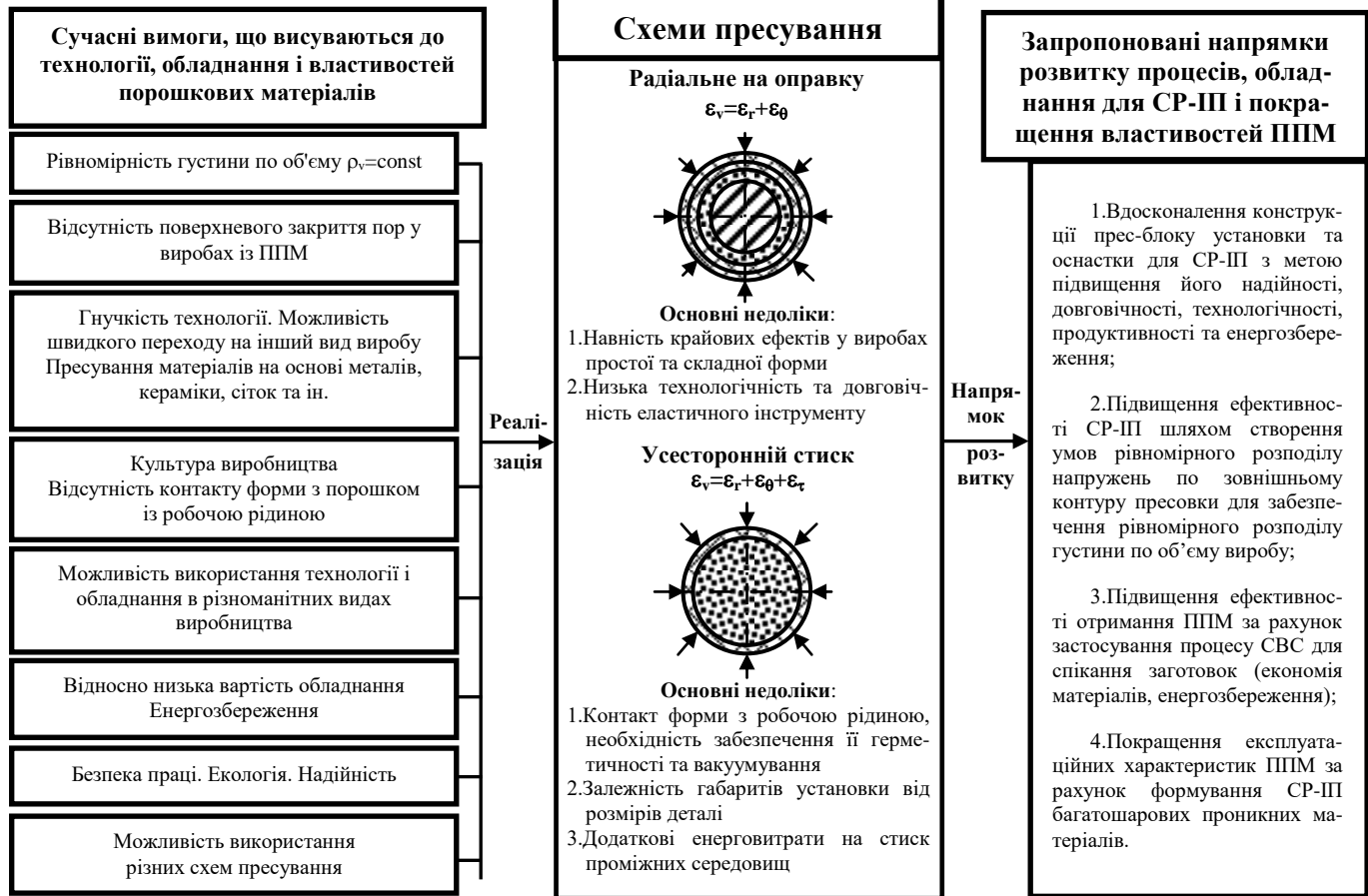


Рис. 1. Схема реалізації вимог до технології, обладнання і властивостей ППМ

Поверхня навантаження у вигляді центрального еліпсоїда обертання має вид:

$$\frac{3p^2}{\psi^2} + \frac{2T^2}{\varphi^2} = 1, \quad (2)$$

де p – гідростатичний тиск; T – інтенсивність дотичних напружень; ψ і φ – функції механічних і структурних характеристик матеріалів, що ущільнюються.

В результаті спільного розв'язку рівняння (2) і розрахункових залежностей по визначенню опорів деформуванню у вибраних схемах навантаження уточнено критерій текучості, що визначається залежностями:

$$\psi = 2\sqrt{3}\sigma_{T_0} \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^m \ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu}, \quad \varphi = \frac{2\sqrt{6}\sigma_{T_0} (1-\xi) \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{m+l} \ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu}}{\sqrt{9\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2m} - (1+2\xi)^2 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2l}}}, \quad (3)$$

$$p^2 \left(\frac{\nu_0}{\nu}\right)^{2m} + \frac{T^2 \left[9\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2m} - (1+2\xi)^2 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2l} \right] \left(\frac{\nu_0}{\nu}\right)^{2(m+l)}}{3(1-\xi)^2} = 4\sigma_{T_0}^2 \left(\ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu}\right)^2, \quad (4)$$

де ξ – коефіцієнт бічного тиску, який залежить від густини та властивостей матеріалу порошку і пресовки, тобто, в певному ступені, є носієм інформації про структурні особливості порошкового тіла (форму частинок, спосіб отримання порошку, зміцнення матеріалу і т.д.); m і l – показники зміцнення при гідростатичному і осьовому пресуванні відповідно.

Уточнена модель пластичності (4) є багатопараметричною. Вона встановлює зв'язок компонент тензора напружень σ_{ij} з густиною, механічними і структурними характеристиками пресовки і використовувалася для розрахунку технологічних параметрів СР-ІІІ [3, 12].

У **третьому** розділі викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень радіально-ізостатичного пресування трубчатих заготовок із порошкових матеріалів в замкнутому об'ємі.

Спільний розв'язок системи рівнянь (умови пластичності, рівняння рівноваги і асоційованого закону течії при граничних умовах $\tau_{rz}=0$, $\varepsilon_z=0$) дозволив встановити значення компонент тензору напружень для радіальної схеми навантаження [10, 11]:

$$\sigma_r = p_{np} = 2\sigma_{T_0} \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^m \ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu} \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2l} (1-\xi)^2}{9\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2m} - (1+2\xi)^2 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2l}}}, \quad (5)$$

$$\sigma_z = \frac{2(\psi^2 - \varphi^2)}{\sqrt{6(2\psi^2 + \varphi^2)}}. \quad (6)$$

Осьові напруження σ_z (6) необхідно знати для розрахунку на міцність деталей оснастки і установки. Рівняння (5) не враховує силові витрати на радіальну деформацію еластичних оболонок. Однак, в роботах Л.С.Богінського показано, що для реальних розмірів оболонок товщиною 5-30 мм із поліуретану марки *СКУ – 7Л* ($G = 10$ МПа), додаткові силові витрати на деформування оболонок складають 2-4% від робочого тиску пресування, при чому, із збільшенням тиску пресування частка витрат на деформування оболонки зменшується. Це дозволяє рахувати, що для оболонок $\bar{\sigma}_r \approx \bar{\sigma}_t \approx \bar{\sigma}_z$, тобто оболонка як рідина рівномірно передає тиск. Разом з тим, зміна тиску на 2-4% приводить до зміни густини до $0,3 \div 0,5\%$, що гарантує стабільність властивостей пресовок.

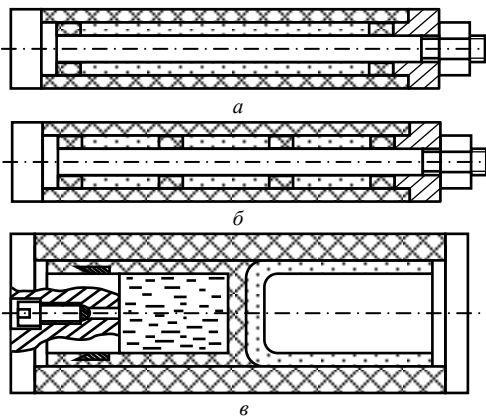
Крім силових параметрів, важливо знати енерговитрати на процес пресування. Розв'язок основних рівнянь дозволив визначити роботу пресування при радіальній схемі навантаження [6]:

$$A = \frac{2}{(1-k)} V \sigma_{T_0} \left(\frac{v_0}{v} \right)^{1-k} \left[\frac{1}{1-k} \left(1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^{1-k} \right) - \ln \frac{1-v_0}{1-v} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{v^n - v^{1-k} v_0^{n-(1-k)}}{n-(1-k)} \right], \quad (7)$$

де $V = \pi(D_0^2 - d_0^2)l/4$ – початковий об'єм формовки; l – довжина пресовки; D_0 – початковий діаметр формовки; d – поточний діаметр формовки внаслідок прикладання тиску; d_0 – діаметр оправки; k – коефіцієнт зміцнення.

Рівняння (7) дозволяє визначити енерговитрати при радіально-ізостатичному пресуванні залежно від початкової і кінцевої густини, геометрії пресовки і фізико-механічних властивостей порошку.

Основним параметром ППМ, що визначає їх експлуатаційні характеристики є густина і рівномірність її розподілу по об'єму виробу. В результаті проведених аналітичних і експериментальних досліджень встановлено, що зміна густини по радіусу



знаходиться в межах точності експерименту (1-1,5%). Густина по довжині виробів розподіляється при традиційній схемі СР-ІІ рівномірно, але спостерігається певний “крайовий” ефект в області торців пресовки, що пов’язаний з наявністю зовнішнього тертя і є негативним явищем. Тому в роботі пропонується технічне рішення (спеціальні еластичні втулки – рис.2 а, б), використання яких дозволяє отримувати рівномірний розподіл густини по всій довжині виробу [5]. При СР-ІІ виробів з ненаскрізним осьовим отво-

Рис. 2. Наладки для пресування порошкових виробів

ром типу “стакан” спостерігається нерівномірність густини в області денця виробу, що приводить до браку як на стадії пресування так і спікання. Запропоноване технічне рішення (еластична пробка, яка герметично заповнена рідиною – рис.2 в) за рахунок створення умов квазіізостатичного пресування дозволяє отримувати вироби складної форми з рівномірним розподілом густини по всьому об’єму виробу [8].

Результати розрахунку силових параметрів з достатньою точністю узгоджуються з експериментальними даними (рис. 3). Таким чином, СР-ІІ із

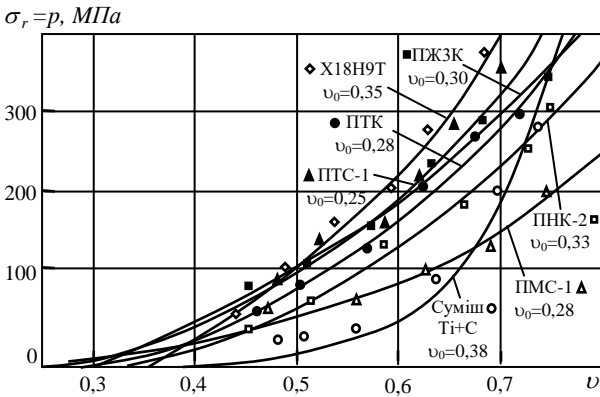


Рис. 3. Залежність тиску від відносної густини при радіальному пресуванні за рівнянням (5). Точки – експериментальні дані

застосуванням запропонованих технічних рішень (рис. 2), набору еластичних оболонок та інструменту багаторазового використання вирішує проблему отримання якісних виробів з рівномірно розподіленою густиною по об’єму як у виробах простої

так і складної в поперечному перетині форми і дозволяє зменшити об’єми проміжних середовищ, енерговитрати процесу, габарити, металомісткість і вартість обладнання, підвищити продуктивність і культуру праці.

В четвертому розділі викладено основні аспекти практичного використання результатів досліджень, подано розроблені технологічні процеси, обладнання, інструмент для СР-ІІІ та показано перспективи його розвитку.

Еластичний інструмент (вкладиш, оболонки, пробки), який розміщений в прес-блоці, виконує чільну роль в процесі пресування. До нього висувається сукупність вимог направлених на забезпечення надійності роботи, технологічності конструкції (мінімум витрат праці) і забезпечення необхідних властивостей ППМ. В зв’язку з цим розроблено конструкцію і технологію отримання армованого еластичного вкладиша (рис. 4) [4, 5]. Армуюча вставка 1 дозволяє формувати манжети високого тиску еластичного вкладиша 2 ще на стадії його відливання без виготовлення їх різанням [4]. Це підвищує його якість, надійність та довговічність, забезпечує герметичність при високих тисках, зменшує об’єми проміжних середовищ, економить еластичний матеріал і підвищує технологічність за рахунок скорочення трудовитрат на його виготовлення.

Розроблено конструкцію і технологію отримання наладок для СР-ІІІ ПМ з еластичними втулками (рис. 2 а, б) для отримання трубчатих виробів і наладок з

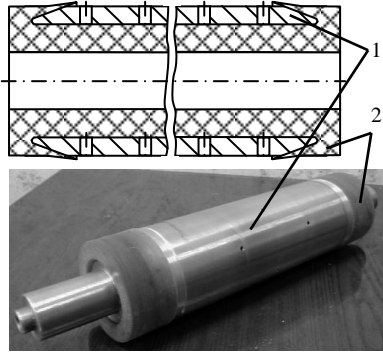


Рис. 4. Схема конструкції та загальний вигляд армованого еластичного вкладиша: 1 – вставка армуюча; 2 – вкладиш еластичний

які дозволяють отримувати вироби із матеріалів, що ущільнюються різної природи і форми з граничними розмірами $\varnothing 40 \times 320$, ($p \leq 150$ МПа) та $\varnothing 90 \times 650$, ($p \leq 250$ МПа) відповідно.

Розроблено технологію отримання ФМ на основі карбіду титану [7], яка дозволяє скоротити енергосилові витрати на стадії пресування в 2 рази, на стадії спікання – в 1,3-1,5 рази за рахунок відсутності зовнішніх енерговитрат на спікання (СВС-спікання). Встановлено, що запропоновані заходи по вдосконаленню методу СР-ІІІ із застосуванням розробленої технології підвищують рівномірність поророзподілу одношарових ФМ на основі карбіду титану на 20...35% і збільшують локальну проникність на 20...25% в порівнянні з аналогічними ФМ на основі чистого титану за рахунок більш рівномірного розподілу пористості по об'єму і відсутності поверхневого закриття пор. На базі даної технології пропонується технологія отримання двошарових ФМ методом пошарового СР-ІІІ [7], яка дозволяє підвищити проникність при заданому розмірі пор на 35...50% в порівнянні з ФМ, що виготовлені пресуванням в сталій прес-формі.

В результаті виконання роботи виявлено та показано перспективи розвитку СР-ІІІ і його використання для отримання виробів широкого цільового призначення [7]:

- запропоновано вдосконалені схеми еластостатичного пресування на оправку та матрицю, які дозволяють уникнути контактної тертя між еластичним елементом і порошком, створити умови для рівномірного прикладання тиску по контуру пресовки, що дозволяє отримати якісні ППМ з рівномірним розподілом густини по об'єму;
- На кафедрі сучасних технологій в машинобудуванні ЛДТУ спроектована та виготовлена дослідна установка для СР-ІІІ на оправку та організовано на її основі дослідну ділянку по виготовленню ФМ.

Основні результати роботи, методики досліджень використані в навчальних курсах: “Технологічні основи одержання виробів з порошкових матеріалів”,

використанням еластичної пробки, герметично заповненої рідиною (рис. 2в) для отримання виробів складної форми, використання яких дозволяє забезпечити постійність робочого тиску по всій поверхні виробу, що значно зменшує кількість браку, економить вартісний порошковий матеріал і дозволяє отримувати якісні ППМ з рівномірним розподілом густини по об'єму виробу і стабільними експлуатаційними характеристиками [5, 8].

Для здійснення процесу ізостатичного пресування, з врахуванням нових технічних рішень, спроектовано і виготовлено експериментальну та напівпромислову установки для СР-ІІІ,

“Порошкові та композиційні матеріали”, “Маловідходні технології в машинобудуванні” ЛДТУ.

Сумарний річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень складає 31500 грн.

ВИСНОВКИ

1. В результаті інформаційних і патентних досліджень, аналітичного аналізу традиційних процесів ущільнення порошків встановлено, що при виготовленні довгомірних порошкових виробів найбільш раціональною є радіальна схема пресування, яка у своєму розвитку дозволяє комплексно задовольнити потреби до виробництва і якості виробів.

2. З позицій континуальної теорії уточнено модель пластичності порошкових середовищ, яка базується на умові текучості з поверхнею навантаження у вигляді центрального еліпсоїда, орієнтованого вздовж гідростатичної осі і відрізняється тим, що в рівняннях моделі крім компонент тензора напружень, густини і механічних характеристик матеріалу присутні параметри, які містять інформацію про структурні особливості порошкового тіла та зміцнення матеріалу в процесі формування.

3. На базі уточненої моделі пластичності проведено комплексні теоретичні та експериментальні дослідження радіально-ізостатичного пресування на оправку в результаті яких визначено напружено-деформований стан в пресовках для радіальної схеми навантаження і отримано рівняння для визначення енергосилових (роботи пресування) параметрів процесу. Дані залежності відображають зв'язок не тільки з густиною, але й структурними, механічними та геометричними характеристиками порошкового тіла. Вони покладені в основу розрахунків технологічних параметрів обладнання та інструменту.

4. Проведено комплекс досліджень по експериментальному визначенню технологічних та експлуатаційних характеристик виробів (здатність до ущільнення, розподіл густини по об'єму, розподіл пор за розмірами, коефіцієнт проникності), що отримані методом СР-ІІ на оправку. Відмічається добре співпадання теоретичних і експериментальних результатів.

5. На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблені обладнання, інструмент та технологічні процеси для СР-ІІ ППМ:

– експериментальна та напівпромислова установки для СР-ІІ, які дозволяють отримувати вироби із матеріалів, що ущільнюються різної природи і форми з граничними розмірами $\varnothing 40 \times 320$, ($p \leq 150$ МПа) та $\varnothing 90 \times 650$, ($p \leq 250$ МПа) відповідно;

– армований еластичний вкладиш, використання якого дозволило суттєво підвищити якість, надійність та довговічність інструменту, зменшити об'єми проміжних середовищ і підвищити технологічність обладнання за рахунок скорочення трудовитрат на його виготовлення;

– набір багатощарових еластичних оболонок, використання яких для пресування

ППМ дозволяє при переході на новий вид виробів, за рахунок оптимального їх набору при збереженні зовнішнього діаметру, економити еластичний матеріал на основі поліуретану у 2,5...3 рази;

- наладки для СР-ІІІ ПМ з еластичними втулками, використання яких дозволяє економити порошковий матеріал і отримувати якісні ППМ з рівномірним розподілом густини по об'єму виробу і стабільними експлуатаційними характеристиками;

- наладки для СР-ІІІ ПМ з використанням еластичної пробки, герметично заповненої рідиною, використання яких для отримання виробів складної в поперечному перетині пресовки форми з ненаскрізним осьовим отвором типу „стакан” дозволило забезпечити постійність робочого тиску по всій поверхні виробу, що зменшило кількість браку (економія матеріалів) і дало змогу отримувати якісні ППМ з рівномірним розподілом густини по об'єму виробу;

- технологія отримання ФМ на основі карбіду титану, яка дозволила скоротити енергосилові витрати на стадії пресування в 2 рази, на стадії спікання – в 1,3-1,5 рази за рахунок відсутності зовнішніх енерговитрат на спікання (СВС-спікання). Встановлено, що запропоновані заходи по вдосконаленню методу СР-ІІІ в поєднанні із розробленою технологією підвищують рівномірність поророзподілу одношарових ФМ на 20-35% і збільшують локальну проникність на 20-25% в порівнянні з аналогічними ФМ на основі чистого титану за рахунок відсутності “крайових” ефектів, поверхневого закриття пор і більш рівномірного розподілу пористості по об'єму;

- технологія отримання двошарових ФМ на основі карбіду титану методом СР-ІІІ на оправку, яка дозволяє підвищити проникність при заданому розмірі пор на 35...50% в порівнянні з ФМ, що виготовлені пресуванням в сталій прес-формі.

6. В результаті виконання роботи виявлені та показані перспективи розвитку сухого радіально-ізостатичного пресування:

- запропоновано вдосконалені схеми еластостатичного пресування на оправку та матрицю, які дозволяють уникнути контактної тертя між еластичним елементом і порошком, створити умови для рівномірного прикладання тиску по контуру пресовки, що дозволяє отримати якісні ППМ з рівномірним розподілом густини по об'єму;

7. Основні результати і методики досліджень використані в навчальних курсах: “Технологічні основи одержання виробів з порошкових матеріалів”, “Порошкові та композиційні матеріали”, “Маловідходні технології в машинобудуванні” ЛДТУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Заболотний О.В. Розвиток процесів пресування порошкових матеріалів // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2001. – Випуск 8. – С. 135-141.

2. Усиченко С.Ю., Заболотний О.В., Рудь В.Д. Деформування пористих осесиметричних заготовок в еластичних оболонках // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2001. – Випуск 8.– С. 249-258.

Персональний внесок здобувача – розробка методики проведення експериментів, підбір матеріалу (властивостей) проміжного еластичного середовища, встановлення раціонального співвідношення початкових розмірів пресовки, встановлення впливу осевого зусилля і виду матеріалу пористого тіла на закономірності його деформування.

3. Уточнення умови пластичності ущільнювального порошкового середовища з частинками складної форми / О.В.Заболотний // Вісник ЖІТІ. – 2001. – №19 / Технічні науки. – С. 14-17.

4. Заболотний О.В., Повстяной О.Ю., Рудь В.Д. Розвиток процесів ізостатичного пресування ущільнювальних порошкових середовищ // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2001. – Випуск 9. – С. 152-156.

Персональний внесок здобувача – розробка технології отримання армованого еластичного вкладиша прес-блоку пристрою для радіально-ізостатичного пресування на порошоків оправку.

5. Заболотний О.В. Вдосконалення еластичного інструменту для сухого радіально-ізостатичного пресування порошкових матеріалів // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – Випуск 10. – С. 77-84.

6. Заболотний О.В. Робота ізостатичного пресування при радіальному ущільненні порошоків на оправку // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – Випуск 11. – С. 150-154.

7. Заболотний О.В., Рудь В.Д., Богінський Л.С. Виготовлення фільтруючих матеріалів із застосуванням сухого радіально-ізостатичного пресування // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2003. – Випуск 12. – С.106-123.

Персональний внесок здобувача – розробка технології отримання одно- та багатошарових ФМ на основі карбіду титану методом СР-ІІІ на оправку; вдосконалення схем еластостатичного пресування на оправку та матрицю.

8. Пат. № 52227 А Україна, МПК 7 В22F3/04. Пристрій для сухого радіально-ізостатичного пресування порошкових матеріалів / О.В.Заболотний; Заявл. 20.03.2002; Опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12.

9. О.В.Заболотний, С.Ю.Усиченко. Дослідження процесу деформування порошку при тривісному стиску. // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур: В 2-х т. – Львів, 2000. – Т.2. – С. 365-367.

Персональний внесок здобувача – розробка методики проведення експериментів, встановлення впливу траєкторії навантаження і виду матеріалу порошкового тіла на закономірності його деформування.

10. Богинский Л.С., Заболотный О.В., Божко Д.И. Энергосиловые затраты при радиально-изостатическом прессовании порошковых материалов на оправку // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления: Выпуск 1. – В 3-х т. Сборник трудов первой Международной научно-

технической конференции г. Минск, 11-13 декабря 2002 г. / Под общ. ред. академика НАН Беларуси П.А.Витязя. – Минск: «Технопринт», 2002. – Т.2. – С. 255-258.

Персональний внесок здобувача – експериментальні та теоретичні дослідження напружено-деформованого стану в пресовках для радіальної схеми навантаження; встановлення залежності тиску пресування та осьового напруження від густини, механічних та структурних характеристик та їх експериментальна перевірка.

11. Рудь В.Д., Заболотный О.В. Энергосиловые затраты при радиально-изостатическом прессовании порошков на оправку. // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сборник научных трудов / Под. ред. С.А.Астапчика, П.А.Витязя. – Минск: «Технопринт», ПГУ, 2001. – С. 209-212.

Персональний внесок здобувача – теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану в пресовках для випадку радіальної схеми навантаження; встановлення та експериментальне підтвердження залежностей тиску пресування та осьового напруження при радіально-ізостатичному пресуванні від густини, механічних та структурних характеристик.

12. L.Boginsky, O.Reut, Y.Piatsiushyk, O.Zabolotny, I.Kupryianov. The Development of Processes of Pressing of Articles from Powders on the Bases of Metals, Ceramics and Graphite // 15 International Plansee Seminar. Austria, Reutte, 2001, V. 3. – P. 197-209.

Персональний внесок здобувача – встановлення зв'язку компонент тензору напружень з густиною, механічними та структурними характеристиками пресовки; встановлення та експериментальне підтвердження основного рівняння пресування для радіальної схеми навантаження; вдосконалення конструкції еластичного вкладиша прес-блоку для сухого радіально-ізостатичного пресування виробів з порошкових матеріалів на оправку.

АНОТАЦІЇ

Заболотний О.В. Підвищення ефективності процесів пресування і використання пористих порошкових матеріалів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ, 2004.

Об'єктом дисертаційного дослідження є процес радіально-ізостатичного пресування при ущільненні порошків на оправку.

Мета роботи – підвищення ефективності процесів радіально-ізостатичного пресування порошкових середовищ за рахунок створення та впровадження нових технологічних схем, вдосконалення обладнання, інструменту та технологій.

Дисертаційна робота присвячена питанням підвищення ефективності процесів виготовлення і використання пористих порошкових матеріалів, вдосконаленню моделі ущільнення порошкових середовищ, дослідженню напружено-деформованого стану та властивостей пористих середовищ, що являють собою в сукупності нові, науково обґрунтовані розробки в області створення пористих порошкових матеріалів, використання яких сприяє вирішенню важливої проблеми – створення ефективних технологій, обладнання та інструменту для виробництва виробів широкого цільового призначення на основі металів і кераміки.

Ключові слова: ефективність, сухе ізостатичне пресування, проміжне середовище, енергосилові витрати, континуальна і контактна моделі, технологія, обладнання, інструмент.

Заболотный О.В. Повышение эффективности процессов прессования и использования пористых порошковых материалов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, 2004.

Диссертационная работа посвящена вопросам повышения эффективности процессов изготовления и использования пористых порошковых материалов, усовершенствованию модели уплотнения порошковых сред, исследованию напряженно-деформированного состояния и свойств пористых материалов, которые являют собой в совокупности новые, научно обоснованные разработки в области создания пористых порошковых материалов, использование которых способствует решению важной проблемы – создания эффективных технологий, оборудования и инструмента для производства изделий широкого целевого назначения на основе металлов и керамики.

Объектом исследования является процесс радиально-изостатического прессования при уплотнении порошков на оправку.

Целью работы является повышение эффективности процессов радиально-изостатического прессования порошковых сред за счет создания и внедрения новых технологических схем, усовершенствования оборудования, инструмента и технологий.

В результате информационных и патентных исследований, аналитического анализа традиционных процессов уплотнения порошков определены рациональные схемы процессов прессования порошковых материалов. Показано, что основой для создания новых технологий и оборудования является радиальная схема прессования, которая позволяет в своем развитии комплексно удовлетворить требованиям к производству и качеству изделий. На ее основе усовершенствовано существующие способы и устройства для сухого радиально-изостатического прессования порошковых материалов.

Уточнена модель пластичности уплотняемых порошковых сред с позиций континуальной теории, которая базируется на условии текучести с поверхностью нагружения в виде центрального эллипсоида, ориентированного вдоль гидростатической оси и отличающаяся тем, что в уравнениях модели кроме компонент тензора напряжений, начальной и текущей плотностей и механических характеристик материала среды присутствуют параметры, которые содержат информацию о структурных особенностях порошкового тела, форме частиц, способе получения порошка, упрочнении материала в процессе уплотнения, что обеспечивает более высокий уровень достоверности расчетов энергосиловых параметров радиально-изостатического прессования и дает возможность управления свойствами изделий.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования радиально-изостатического прессования порошков на оправку в замкнутом объеме. Путем совместного решения уточненного условия пластичности, уравнения равновесия, ассоциированного закона течения с учетом граничных условий, определено напряженное состояние в прессовках при радиально-изостатическом уплотнении порошков на оправку. Установлена и экспериментально подтверждена связь давления прессования с плотностью, получено уравнение для расчета энергосиловых параметров процесса. Приведенные уравнения устанавливают связь не только с плотностью, но и с механическими, структурными характеристиками прессовки.

Проведены экспериментальные исследования по изучению уплотняемости порошков по радиальной схеме, коэффициента проницаемости, распределения плотности по объему, распределения пор по размерам и показано, что сухое радиально-изостатическое прессование на оправку с учетом новых технических решений позволяет получать прессовки с равномерным распределением плотности по объему в изделиях, как простой, так и сложной формы.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологические процессы, оборудование и инструмент для сухого радиально-изостатического прессования пористых порошковых материалов: экспериментальную и полупроизводственную установки для сухого радиально-изостатического прессования; армированный эластичный вкладыш; набор многослойных эластичных оболочек; наладки для сухого изостатического прессования с эластичными втулками и с использованием эластичной пробки, герметически заполненной жидкостью; технологию получения одно и многослойных фильтрующих материалов на основе карбида титана. В результате исполнения работы выявлены и показаны перспективы развития сухого изостатического прессования и его использования для получения изделий широкого целевого назначения.

Ключевые слова: эффективность, сухое изостатическое прессование, промежуточная среда, энергосиловые затраты, континуальная и контактная модели, технология, оборудование, инструмент.

Zabolotnyi O.V. Efficiency increase in pressing processes and usage of porous powder materials. – Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.16.06 – Powder metallurgy and composite materials. – National technical university of Ukraine “Kyiv polytechnic institute”, Kyiv, 2004.

The object of dissertation research is the process of isostatic pressing at compacting powders for mandrel.

The aim is efficiency increase of pressing processes and usage of porous powder materials due to pressing processes development, creating and introducing new technology schemes, improvement of technologies, equipment and instrument, which ensures attainment of improved quality goods and saves both material and manpower resources, increases labor efficiency.

The dissertation is devoted to the issues of efficiency increase in pressing processes and usage of porous powder materials, upgrading the model of porous medium compacting from the positions simultaneous consideration of continual and contact theories, research of stressed-strained state and porous medium properties, which in aggregate represent new, scientifically substantiated development in the field of porous powder materials making. Usage of these materials facilitates solving an important problem, which is creation of effective technologies, equipment and instrument for commodity goods production on the basis of metals and ceramics.

Key words: efficiency, dry isostatic pressing, inter-medium, energy-power consumption, continuous and contact models, technology, equipment, instrument.

Підп. до друку 05. 01.2004 р. Формат 60×84/16. Папір офс.
Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 0,8 . Обл.-вид. арк. 0,9 .
Тираж 100 прим. Зам. 59

Редакційно-видавничий відділ
Луцького державного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – РВВ ЛДТУ