

ЛУЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Заболотний Олег Васильович

УДК 621.762.4

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

05.16.06 – Порошкова металургія і композиційні матеріали

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник: к.т.н., проф. Рудь В.Д.

Луцьк – 2003

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОРИСТИХ	
ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ (ППМ).....	12
1.1. Сучасні уявлення про процеси пресування (формування) ППМ.....	12
1.2. Аналіз традиційних способів пресування ППМ.....	25
1.3. Вибір раціональної схеми пресування порошкових матеріалів.....	30
1.4. Вибір матеріалів.....	40
1.4.1. Вибір матеріалу проміжного середовища.....	40
1.4.2. Фільтруючі матеріали (ФМ).....	41
1.4.3. Спрямованість СІП на створення нових матеріалів.....	45
Висновки і постановка задачі досліджень.....	47
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПО	
УТОЧНЕННЮ УМОВИ ПЛАСТИЧНОСТІ ПОРОШКОВИХ	
СЕРЕДОВИЩ, ЩО УЩІЛЬНЮЮТЬСЯ.....	49
2.1. Уточнення моделі пластичності порошкового середовища, що ущільнюється.....	49
2.2. Визначення опорів деформуванню порошкових матеріалів при гідростатичному стиску і осьовому пресуванні в жорсткій прес-формі.....	63
Висновки.....	71
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	
РАДІАЛЬНО-ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ ППМ.....	72
3.1. Визначення напруженого стану в пресовках при радіально- ізостатичному ущільненні порошоків на оправку.....	72
3.2. Визначення роботи ізостатичного пресування при радіальному ущільненні порошоків на оправку.....	76

3.3. Експериментальні дослідження радіально-ізостатичного пресування труб із порошку.....	79
3.3.1. Методика проведення досліджень.....	79
3.3.2. Результати дослідження радіально-ізостатичного пресування виробів із порошків.....	84
Висновки.....	91
РОЗДІЛ 4. ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ, ІНСТРУМЕНТУ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ППМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУХОГО РАДІАЛЬНО-ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ.....	
4.1. Основні вимоги, що висуваються до ФМ при їх виготовленні.....	92
4.2. Обладнання для сухого радіально-ізостатичного пресування на оправку циліндричних довгомірних пресовок.....	95
4.3. Вдосконалення конструкції еластичного інструменту. Технологія виготовлення.....	99
4.4. Розробка технології отримання одно і багат шарових фільтруючих матеріалів на основі карбіду титану.....	110
4.4.1. Розробка технології отримання ФМ на основі карбіду титану...	110
4.4.2. Технологія отримання двох шарових ФМ на основі карбіду титану.....	118
4.5. Перспективи розвитку процесу пресування проникних та конструкційних матеріалів.....	121
4.5.1. Розвиток процесів еластостатичного пресування.....	122
4.5.2. Розвиток процесів ізостатичного пресування.....	125
Висновки.....	130
ВИСНОВКИ.....	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	136
ДОДАТКИ.....	151

ВСТУП

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 за рахунок зменшення кількості операцій і автоматизації процесів, забезпечує охорону навколишнього середовища та дозволяє розв'язати ряд екологічних проблем. З переходом на ринкову економіку, коли ціни на енергоносії, матеріали стали світовими, порошкова металургія може зберегти свої позиції за умови конкурентоспроможності на всіх або визначених стадіях виробництва, дослідження і використання пористих порошкових матеріалів (ППМ). 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 із важливих напрямків порошкової металургії є створення ППМ, працездатність і область застосування яких визначається наявністю взаємозв'язаної структури пор. Вона забезпечується всіма операціями технологічного процесу, але вирішальний етап технології – пресування (формування) заготовок. Ця структура забезпечує проникність для рідин і газів (фільтрація), здатність до капілярного транспорту рідини і її утримання в порах і т. д. ППМ успішно використовуються в космічній техніці, машинобудуванні, хімічній промисловості, атомній енергетиці, медицині і сільському господарстві. Прогрес у порошковій металургії в значній мірі визначається вдосконаленням процесів пресування і спікання. Вони відносяться до основних етапів виробництва і визначають не тільки розміри, форму, густину, продуктив-

ність, культуру і безпеку праці, але і впливають на ряд найважливіших властивостей готового продукту. Вдосконалення процесів пресування в основному здійснюється за трьома напрямками: розвиток теоретичних основ; створення і дослідження нових технологічних процесів; вдосконалення традиційних способів шляхом створення нового обладнання та інструменту.

Розвиток теоретичних уявлень про деформаційні процеси в порошкових середовищах, що ущільнюються необхідний для розробки на їх основі нових і вдосконалення існуючих процесів пресування, устаткування та інструменту. Ущільнення ППМ слід розглядати як процес деформування порошкового середовища, властивості якого визначаються не тільки густиною, але і механічними і структурними характеристиками. В працях вітчизняних та закордонних вчених М.Ю.Бальшина, Л.С.Богінського, В.П.Бондаренко, П.А.Вітязя, В.М.Горохова, Р.Дж.Гріна, П.Доремуса, Е.А.Дорошкевича, Г.М.Ждановича, Л.А.Ісаєвича, А.Кокса, А.Г.Косторнова, О.М.Лаптева, Е.М.Макушка, В.З.Мідукова, П.Е.Перельмана, Л.Г.Петросяна, О.П.Реута, О.В.Романа, В.Д.Рудя, В.В.Скорохода, А.М.Степанчука, Т.Табата, С.Шима, М.Б.Штерна та багатьох інших встановлено, 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. Як незалежний розвиток обох напрямків так і використання їх у сукупності дозволить одержати найбільш достовірну картину поведінки порошкового середовища і всієї пресовки в цілому.

Серед прогресивних напрямків одержання ППМ особливе місце займає сухе радіально-ізостатичне пресування (СР-ІІ) – пресування при якому форма з порошком ізольована від робочої рідини еластичним середовищем, що дозволяє одержувати багат шарові довгомірні вироби з рівномірним розподілом густини і забезпечує економію енергетичних та матеріальних ресурсів, знижен-

ня матеріаломісткості і вартості устаткування, підвищення продуктивності, безпеки, культури праці і поліпшення експлуатаційних властивостей виробів із ППМ. Найбільш детально і повно цей метод досліджувався Мінською науковою школою під керівництвом професора Л.С.Богінського. Поряд із беззаперечними перевагами застосування СР-ІІ для пресування порошкових матеріалів ця технологія, як відмічають і самі автори, має ряд обмежень: проблема отримання порошкових матеріалів з рівномірним розподілом густини по об'єму, висока трудомісткість виготовлення інструменту та низька його надійність, додаткові енерговитрати на деформацію робочого середовища та ін.

Традиційні процеси спікання ППМ потребують наявності пічного устаткування і захисної атмосфери. Істотним резервом зниження енерговитрат у порівнянні з існуючими технологіями одержання ППМ на основі металів може стати використання саморозповсюджуючогося високотемпературного синтезу (СВС) для спікання пресовок із сумішшю порошків на основі титану без підводу зовнішнього джерела тепла.

Тому комплексне дослідження закономірностей ущільнення ППМ, спрямоване на створення і впровадження вдосконалених технологій, обладнання, інструменту, а також ППМ із поліпшеними властивостями, 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:

1. З врахуванням реальної поведінки порошкового середовища при його деформуванні встановити зв'язок густини пресовки з тиском пресування.

2. Уточнити модель пластичності порошкових середовищ з врахуванням їх механічних та структурних характеристик та оцінити її адекватність для вибраних схем пресування.

3. За допомогою уточненої моделі пластичності виконати комплекс теоретичних досліджень по визначенню напружень, густин пресовок, енергосилових параметрів процесу та провести експериментальну оцінку точності розрахунків.

4. 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'єкт дослідження – 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 досліді 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 контактного 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 багатошарові ФМ на основі сумішей порошків $Ti+C$ із наступним спіканням в режимі 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, які 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 багатошарових ФМ на основі металів та кераміки. Визначено перспективи розвитку СР-ІІІ матеріалів в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва.

Експериментальні дослідження властивостей ППМ проводилось спільно з ІПК 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акопов В.С., Мымрин Ю.Н., Постников В.И. Методика технико-экономического анализа применения радиоизотопных средств контроля в технике. – М.: Атомиздат, 1974.– 200 с.
2. Аксенов Г.И., Виноградов Г.А., Ложечников Е.Б., Тихонов Г.Ф. Теория и практика прокатки металлических порошков в Советском Союзе // Порошковая металлургия. – 1967. – № 11. С. 9-17.
3. Аксенов Г.И., Семенов Ю.Н. Прокатка металлических порошков в валках. – М.: 1957. – 23 с.
4. Александров В.М., Скугарь А.А., Богинский Л.С., Реут О.П., Загайгора И.Г. Новая технология изготовления многофункциональных проницаемых сетчатых материалов // 7-я Международн. выставка и симпозиум «Новые материалы и технологии порошковой металлургии», Минск, 19-20 марта 1997 г., С. 103-104.
5. Амосов А.П., Федотов А.В. Вариант условия пластичности порошковых тел // Порошковая металлургия. – 2000. – № 3/4. – С. 4-10.
6. Андриевский Р.А. Пористые материалы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
7. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
8. Бальшин М.Ю., Кипарисов С.С. Основы порошковой металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с.
9. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 335 с.
10. Бальшин М.Ю. Порошковая металлургия. – М.: Машгиз, 1948. – 286 с.
11. Бальшин М.Ю. Порошковое металловедение. – М.: Металлургия, 1948. – 332 с.

12. Бальшин М.Ю. Принцип контактного уравнивания и основы консолидации порошковых тел // Порошковая металлургия. – 1973. – № 10. – С. 37-44.
13. Бальшин М.Ю. Теория и практика прессования металлических порошков // Порошковая металлургия. – 1974. – № 6. – С. 37-39.
14. Барабанов В.М., Зайцев Г.Г. О механизме деформирования и разрушения графита // Конструкционные материалы на основе графита: Сб. трудов. – М.: Металлургия, 1983. – № 17. – С. 55-64.
15. Бейгельзимер Я.Е., Гетманский А.П., Алистратов Л.И. Условие пластичности для порошков твердосплавных смесей // Порошковая металлургия. – 1986. – № 12. – С. 11-15.
16. Белов С.В., Витязь П.А., Шелег В.К. и др. Пористые проницаемые материалы. Справочник. – М.: Металлургия, 1987. – 332 с.
17. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
18. Богинский Л.С., Богинская Т.Ф. Расчет времени и скорости уплотняемости при ударном прессовании порошков // Металлургия, литейное производство и порошковая металлургия. – Минск: Вышэйшая школа, 1972. – С. 86-90.
19. Богинский Л.С., Васильев Л.Л., Романенков В.Е., Реут О.П., Петюшик Е.Е. Пористые материалы для капиллярного массопереноса жидкости // «Материалы, технологии, инструмент», № 2, т.3, апрель-июнь 1998 г. Тез. докл. III-й Республ. НТК «Новые материалы и технологии», Минск, 21-22 мая 1998 г., – С. 143.
20. 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 общей редакцией академика НАН Беларуси П.А.Витязя. – Минск: «Технопринт», 2002. – Т.2. – С. 255-258.
21. Богинский Л.С., Павловская А.Ф., Реут О.П. Получение и применение полиуретановых оболочек для прессования металлических порошков // Информ. листок. – Минск: БелНИИТИ, 1985. – № 24, сер. 55.21.01.
 22. Богинский Л.С., Петюшик Е.Е., Реут О.П., Котковец С.Л., Романенков В.Е. Разработка эффективных фильтрующих устройств для доочистки питьевой воды с использованием порошковых проницаемых материалов // Тез. докл. Международной научн. конф. «Проблемы промышленной экологии и комплексная утилизация отходов производства» 3-4 октября 1995 г. Витебск, – С. 54-55.
 23. Богинский Л.С., Петюшик Е.Е., Реут О.П. Энергосберегающие технологии получения порошковых изделий широкого целевого назначения // Тез. докл. Международного семинара на базе 1-й Международной выставки "Энергоресурсосбережение 95" 27-29 марта 1995 г. Минск, – С. 124-125.
 24. Богинский Л.С., Реут Л.Е., Петюшик Е.Е., Богинский А.Л. Новая технология радиально-изостатического прессования изделий из СВС-продуктов // Тез. докл. отрасл. НТК "Прогрессивные технологические процессы изготовления деталей и узлов ГТД и агрегатов из композиционных порошковых материалов по СВС-технологии", 20-22 сент. 1989 г. – Куйбышев, С. 5-7.
 25. Богинский Л.С. Теоретическое обоснование, разработка и внедрение новой технологии радиального прессования длинномерных изделий из металлических порошков: Автореф. дисс....докт. техн. наук. – Минск, 1988. – 36 с.
 26. Богоявленский К.Н., Кузнецов П.А., Мартенс К.К., Подгорный В.В. Принципы классификации процессов формования порошковых материалов // Порошковая металлургия. – 1985. – № 6. С. 89-95.

27. Борок Б.А. Технология и оборудование для гидростатического прессования. – М.: ВИНТИ, 1959. – 25 с.
28. Ботян В.В., Колос В.К., Лузгин В.Н., Катперко В.А. Гидроударные прессы для листовой штамповки // Импульсные методы обработки материалов. – Минск: Наука и техника, 1977. – С. 139-148.
29. Виноградов Г.А., Каташинский В.П. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул. – М.: Metallurgy, 1979. – 224 с.
30. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. – Л.: Химия, 1977. – 438 с.
31. Витязь П.А., Девис Р. Использование высокоскоростных машин «Petro-Forge» в порошковой металлургии // Порошковая металлургия. – 1975. – № 4. С. 102-105.
32. Витязь П.А., Капцевич В.М., Шелег В.К. Пористые порошковые материалы и изделия из них. – Минск,: Вышэйшая школа, 1987. – 161 с.
33. Витязь П.А., Перельман В.Е., Роман О.В. Распределение пористости в изделиях сложной формы и методы ее определения // Порошковая металлургия. – 1971. – № 3. С. 26-29.
34. Витязь П.А., Шелег В.К., Капцевич В.М., Кусин Р.А., Гуревич А.А. Условие пластичности анизотропных высокопористых порошковых материалов // Порошковая металлургия. – 1984. – № 9. – С. 1-5.
35. Вишняков Л.Р., Чижаньков Е.Ю., Мороз В.П., Юга А.И., Костенко А.Д. Триботехнические свойства термически расширенного графита, армированного металлотрикотажными сетками // Порошковая металлургия. – 1997. – № 7/8. С. 33-37.
36. Волошенко-Климовицкий Ю.Я. Динамический предел текучести. – М.: Наука, 1965. – 179 с.
37. Воробьев Б.Я., Олесов Ю.Г., Дрозденко В.А. Производство изделий из титановых порошков. «Техніка», 1976. – 174 с.

38. Гораздовский Г.Я., Сонькин М.А. Средства контроля качества проката физическими неразрушающими методами. – М.: НИИинформтяжмаш, 1968. – 88 с.
39. Гоффман О., Закс Г. Введение в теорию пластичности для инженеров. – М.: Машгиз, 1957. – 279 с.
40. Грин Р.Дж. Теория пластичности пористых тел // Механика. – 1973. – Т. 4, № 140. – С. 11.
41. Дегтярев И.С., Колмогоров В.Л. Диссипация мощности и кинематические соотношения на поверхности разрыва скоростей в сжимаемом жесткопластическом материале // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1972. – № 5. – С. 167-173.
42. Джонс В.Д. Основы порошковой металлургии. Свойства и применение порошковых материалов. – М.: Мир, 1965. – 390 с.
43. Дьяченко И.М. Экономика порошковой металлургии. – Челябинск, Металлургия, Челябинское отделение. – 1990. – 152 с.
44. Жданович Г.М. О коэффициенте бокового давления // Порошковая металлургия. – 1969. – № 5. С. 24-27.
45. Жданович Г.М., Сидоров В.А., Якубовский Ч.А. Теоретическое исследование поперечного прессования порошковых материалов // Порошковая металлургия. – 1982. – № 7. С. 8-12.
46. Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков. М.: Металлургия, 1969. – 260 с.
47. Заболотний О.В. Вдосконалення еластичного інструменту для сухого радіально-ізостатичного пресування порошкових матеріалів // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – Випуск 10. – С. 77-84.
48. 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.

49. Заболотний О.В. Работа ізостатичного пресування при радіальному ущільненні порошків на оправку // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – Випуск 11. – С. 150-154.
50. Заболотний О.В. Розвиток процесів пресування порошкових матеріалів // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2001. – Випуск 8. – С. 135-141.
51. Заболотний О.В., Усиченко С.Ю. Дослідження процесу деформування порошку при тривісному стиску. // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур: В 2-х т. – Львів, 2000. – Т.2. – С. 365-367.
52. Заболотний О.В. Уточнення умови пластичності ущільнювального порошкового середовища з частинками складної форми // Вісник ЖІТІ. – 2001. – № 19 / Технічні науки. – С. 14-17.
53. Пат. № 52227 А Україна, МПК 7 B22F3/04. Пристрій для сухого радіально-ізостатичного пресування порошкових матеріалів / О.В.Заболотний; Заявл. 20.03.2002; Опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12.
54. Качалов В.А., Хина Б.Б., Петюшик Е.Е. Изготовление изделий из огнеупорной керамики способом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // 7-я Междун. выставка и симпозиум "Новые материалы и технологии порошковой металлургии", Минск, 19-20 марта 1997 г., С. 87.
55. Каширеников П.Е. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез. / Под. ред. проф. Мержанова А.Г. Оперативная аналитическая информация, ГКНТ. Всесоюзный научно-технический информационный центр, Москва, 1984.
56. Кипарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П. Карбид титана, получение, свойства, применение. М.: Металлургия, 1987. – 216с.
57. Кислый П.С., Самсонов Г.В. Основы процесса мундштучного прессования труб и стержней из порошков тугоплавких соединений // Порошковая металлургия. – 1962. – № 3. – С. 31-48.
58. Кобрин В.Н., Мещеряков А.Н., Гречка В.Д. Высокоскоростное формование плакированного графитового порошка // Порошковая металлургия. – 1982. – № 3. С. 21-25.

59. Кузянов В.Г. Изостатическое прессование порошковых материалов. – М.: ЦНИИ “Электроника”, 1976. – 42 с.
60. Кунин Н.Ф., Юрченко Б.Д. Закономерности прессования порошков различных материалов // Порошковая металлургия. – 1963.– № 6. – С. 3-10.
61. Кунин Н.Ф., Юрченко Б.Д. О рациональном уравнении прессования металлических порошков // Порошковая металлургия. – 1964. – № 2. – С. 3-10.
62. Лаптев А. М. Критерий пластичности пористых металлов // Порошковая металлургия. – 1982. – № 7. С. 12-18.
63. Либенсон Г.А. Основы порошковой металлургии. – М.: «Металлургия», 1975. – 200 с.
64. Липатов Ю.С., Керча Ю.Ю., Сергеева Л.М. Структура и свойства полиуретана. – Киев: Наукова думка, 1970. – С. 279.
65. Максименко Л.А., Радомысельский И.Д., Сердюк Г.Г. Кинематические параметры процесса ударного прессования металлических порошков // Порошковая металлургия. – 1974. – № 11. С. 21-24.
66. Максименко Л.А., Радомысельский И.Д., Сердюк Г.Г. О расчете давлений при ударном неизэнтропическом прессовании металлических порошков // Порошковая металлургия. – 1974. – № 12. С. 22-26.
67. Максименко Л.А., Радомысельский И.Д., Сердюк Г.Г, Штерн М.Б. О существовании сильных ударных волн при высокоскоростном прессовании металлических порошков // Порошковая металлургия. – 1972 – № 4. С. 17-20.
68. Макушок Е.М., Реут О.П. Усложняющаяся контактная модель прессования порошковых материалов // Докл. НАН Беларуси, Т. 44, № 4, июль-август 2000 г., – С. 116-199.
69. Мартенс К.К. Теория и технология высокоэффективных способов прессования порошков подвижными средствами: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Ленинград, 1987. – 28 с.

70. Мартынова И.Ф., Штерн М.Б. Уравнения пластичности пористого тела, учитывающие истинные деформации материала основы // Порошковая металлургия. – 1978. – № 1. – С. 20-24.
71. Меерсон Г.А. О некоторых вопросах процесса прессования порошков // Порошковая металлургия. – 1962. – № 5. – С. 3-14.
72. Мержанов А.Г., Карюк Г.Г. и др. Карбид титана, полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза – высокоэффективный абразивный материал. // Порошковая металлургия, 1981, № 10, С. 50-59.
73. Мержанов А.Г., Рогачев А.С., Мукасьян А.С., Хусид Б.М. Макрокинетика структурных превращений при безгазовом горении смесей порошков титана и углерода // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т. 226, № 1. – С.104-114.
74. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких соединений. // Вестник АН СССР, 1976, № 10, С. 76-84.
75. Мидуков В.З. Исследование закономерностей пластического деформирования материалов с необратимой объемной сжимаемостью: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Томск, 1975. – 18 с.
76. Мидуков В.З., Рудь В.Д. О состоянии экспериментальных исследований пластических деформаций пористых металлов // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. – Киев: Наукова думка, 1985. – С. 62-67.
77. Миронов В.А. Магнитно-импульсное прессование порошков и его применение в технологических процессах: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Рига, 1985. – 32 с.
78. Никитин Ю.А., Пятковский М.Л. Формование и механические свойства материалов на основе терморасширенного графита // Порошковая металлургия. – 1997. – № 1/2. С. 43-49.

79. Никитин Ю.А., Пятковский М.Л., Черныш И.Г. Экспериментальное исследование деформирования материала на основе терморасширенного графита // Порошковая металлургия. – 1998. – № 5/6. С. 18-23.
80. Никитин Ю.А., Черныш И.Г. Пятковский М.Л. Оценка процесса формования терморасширенного графита деформационно-спектральным методом // Цветные металлы. – 1992. – № 3. – С. 38-40.
81. Николаев В.А. Определение пористости на электромагнитном дефектоскопе ЭМИД-4 // Порошковая металлургия. – 1968. – № 1. С. 104-105.
82. Павловская Е.П., Шибряев В.Ф. Металлокерамические фильтрующие элементы. – М.: Недра, 1967. – 164 с.
83. Павловская Л.Ф. Разработка методов последовательного прессования длинномерных изделий из металлических порошков: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Минск, 1985. – 18 с.
84. Паринов И.А. Критерии пластичности и законы течения для процесса уплотнения ВТСП порошкообразных прекурсоров. Веб-страница НИИ механики и прикладной математики Ростовского госуниверситета, май 2003. – С. 1-9.
85. Перельман В.Е. Формование порошковых материалов. – М.: Металлургия, 1979. – 232 с.
86. Петюшик Е.Е., Богинский Л.С., Реут О.П., Романенков В.Е., Макарчук Д.В. Технология изготовления многослойных проницаемых сетчатых изделий // «Материалы, технологии, инструмент», № 2, т.3, апрель-июнь 1998 г. Тез. докл. III-й Республ. НТК «Новые материалы и технологии», Минск, 21-22 мая 1998 г., – С. 143.
87. Петюшик Е.Е., Качалов В.А. Разработка технологии получения изделий из высокотемпературной керамики // «Материалы, технологии, инструмент», № 2, т.3, апрель-июнь 1998 г. Тез. докл. III-й Республ. НТК «Новые материалы и технологии», Минск, 21-22 мая 1998 г., – С. 24.

88. Петюшик Е.Е. Разработка теории и технологии ударного прессования пористых изделий из металлических порошков: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Минск, 1991. – 20 с.
89. Петюшик Е.Е., Реут О.П., Богинский Л.С., Загайгора И.Г. Технология получения изделий со специальным поверхностным слоем // Сб. Современные материалы, оборудования и технологии упрочнения и восстановления деталей машин. – Вып. 3. Новополоцк, – 1997. – С. 88-89.
90. Петюшик Е.Е., Шелехина В.М., Реут О.П., Богинский Л.С. Технология и оборудование для получения термостойких керамических изделий // «Материалы, технологии, инструмент» № 2, 1996. II Конференция «НОМАТЕХ-96», Минск, 15-17 мая 1996 г., – С. 50.
91. Петюшик Е.Е., Якубовский А.Ч. Пламегасители на основе уплотненных сеток и проволоки // Материалы международной конференции «Прогрессивные технологии обработки материалов», Минск, 17-18 сентября 1998 г., – С. 203.
92. Плющ Г.В., Прядка Г.А., Слезко А.И. Изготовление трубчатых фильтрующих элементов прокаткой и сваркой // Порошковая металлургия. – 1971. – № 10. – С. 82-87.
93. Прагер В., Ходж Ф.Г. Теория идеально-пластических тел. – М.: ИЛ, 1956 – 398 с.
94. Прокудина В.К., Маслов В.М. и др. Технология карбидов титана. // В сб. “Процессы горения в химической технологии и металлургии”, Черногоровка, 1975, С. 136-141.
95. Радомысельский И.Д., Пелентковский Е.Л., Сердюк Г.Г. Прессформы для порошковой металлургии. – Киев: Техника 1970. – 170 с.
96. Радомысельский И.Д., Сердюк Г.Г. Формование металлических порошков // порошковая металлургия. – 1970, – № 1. – С. 11-19.
97. Реут Л.Е. Разработка теории и технологии радиально-последовательного прессования металлических порошков в эластичных оболочках: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Минск, 1984. – 20 с.

98. Реут О.П., Богинский Л.С., Петюшик Е.Е., Романенков В.Е. Разработка эффективных устройств для водоподготовки // Инженерно-экологические проблемы курортов Беларуси: Тез. докл. семинара. Под. ред. акад. Г.М.Шутова. – Минск, 1995. – С. 31-32.
99. Реут О.П., Богинский Л.С., Петюшик Е.Е. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов. – Мн.: Дэбор, 1998. – 258 с.
100. Реут О.П., Богинский Л.С., Хартон В.В. Технологии изготовления и применения керамики высокотемпературных электрохимических кислородных мембран // 7-я Международная выставка и симпозиум «Новые материалы и технологии порошковой металлургии», Минск, 19-20 марта 1997 г., – С. 89.
101. Реут О.П. Разработка новых методов и технологии поперечно-последовательного прессования металлических порошков: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Минск, 1983. – 18 с.
102. Роман О.В., Дорошкевич Е.А. Порошковая металлургия // Материалы Всесоюзн. конф. по порошковой металлургии. – Рига, 1968. – С. 53-55.
103. Роман О.В. Импульсное прессование металлических порошков: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Минск, 1971. – 36 с.
104. Роман О.В., Перельман В.Е., Дорошкевич Е.А. Распределение плотности в металлокерамических брикетах // Порошковая металлургия.– 1972.– № 8.– С. 14-15.
105. Роман О.В. Теория и практика прессования металлических порошков // Современные проблемы порошковой металлургии. – Киев: Наукова думка, 1970. – С. 54-61.
106. Роман О.В. Теория и практика процессов формования металлических порошков // Порошковая металлургия. – 1967. – № 10. С. 21-28.
107. 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.
108. Свирщевская М.М., Бородич Л.К. Неразрушающие методы контроля в машиностроении. – Минск: Наука и техника, 1967. – 84 с.
109. Семенцов Ю.И., Пятковский М.Л., Черныш И.Г. Структурные превращения в процессе получения дисперсных форм расширенного графита // Порошковая металлургия. – 1998. – № 9/10. С. 98-106.
110. Сердюк Г.Г., Решетников В.Ф., Свистун Л.И., Михайлов О.В. Ударное прессование латунных порошков // Порошковая металлургия. – 1985. – № 12. С. 25-30.
111. Синельников Ю.И., Третьяков А.Ф., Матурин Н.И., Колесников А.Г., Панов А.Д., Макарович В.И. Пористые сетчатые материалы. – М.: Металлургия, 1983. – 64 с.
112. Степаненко А.В., Богинский Л.С. Определение плотности пористых материалов гамма-просвечиванием // Порошковая металлургия. – 1984. – № 7. С. 42-46.
113. Степаненко А.В., Исаевич Л.А. Непрерывное формование порошковых материалов и гранул. – Минск: Наука и техника, 1980. – 256 с.
114. Степаненко А.В., Исаевич Л.А., Харлан В.Е. Обработка давлением порошковых сред. – Мн.: Навука і тэхніка, 1993. – 167 с.
115. Степанчук А.Н., Билык И.И., Бойко П.А. Технология порошковой металлургии. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 415 с.
116. Тихонов Г.Ф., Сорокин В.К. Изготовление тонкостенных трубчатых фильтров из пористых листов титана // Порошковая металлургия. – 1970. – № 11. С. 97-99.
117. 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.

118. Федорченко И.М., Андриевский Р.А. Основы порошковой металлургии. – Киев: АН УССР, 1961. – 420 с.
119. Федорченко И.М. Пористые металлокерамические материалы // Современные проблемы порошковой металлургии.– Киев: Наукова думка, 1970.– С. 152-162.
120. Харлан В.Е. Разработка теории и технологии новых схем прокатки металлических порошков: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Минск, 1986. – 20 с.
121. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Металлургия, 1980. – 319 с.
122. Черныш И.Г., Карпов И.И., Приходько Г.П., Шай В.М. Физико-механические свойства графита и его соединений. – Киев: Наук. думка, 1990. – 200 с.
123. Черныш И.Г., Никитин Ю.А., Левенталь Н.В. Исследование процесса формирования терморасширенного графита // Порошковая металлургия. – 1991. – № 6. С. 17-20.
124. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика / Перевод с английского В.Я. Сидорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с., ил.
125. Шибряев Б.Ф. Пористые проницаемые порошковые материалы. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
126. Штерн М.Б., Майданюк А.П., Кокс А. Влияние третьего инварианта на эффективную реакцию пластических пористых тел // Порошковая металлургия. – 2002. – № 5/6. – С. 19-27.
127. Штерн М.Б., Майданюк А.П., Кокс А. Влияние третьего инварианта на эффективную реакцию пластических пористых тел // Порошковая металлургия. – 2002. – № 7/8. – С. 15-23.
128. М.Б.Штерн, О.В.Михайлов. Численное моделирование процессов **прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах:**

- влияние схемы прессования на распределение плотности // Порошковая металлургия. – 2002. – № 11/12. – С. 29-36.
129. Штерн М.Б. Определяющие уравнения для уплотняющих пластичных пористых тел // Порошковая металлургия. – 1981. – № 4. С. 17-23.
130. Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А. и др. Феноменологические теории прессования порошков. – Киев: Наукова думка, 1982. – 140 с.
131. Шулишова О.И., Щербак И.А. Об исследовании распределения плотности в пористых изделиях // Порошковая металлургия. – 1973. – № 8. С. 93-96.
132. Юрковский И.М., Смирнова Г.Ю., Малей Л.С. Структурные особенности расширенного графита // Химия твердого топлива. – 1986. – № 1. – С. 127-131.
133. Юрченко Б.Д., Конов А.Н. Течение порошков, прессуемых с различной скоростью при постоянном давлении // Порошковая металлургия. – 1972. – № 3. – С. 21-24.
134. Bejarano A., Riera M.D., Prado J.M. Simulation of the Compaction Process of a Two-Level Powder Metallurgical Part. Web-site Centre Tecnologic de Manresa, Universitat Politecnica de Catalunya, Spain, 2002. – P. 1-8.
135. Boginskij L.S. Neue Entwicklungsrichtungen dea Irnpulspressens von Pulvern // Planseeberichte fur Pulvermetallurgie. – 1969. – № 17. – S. 225-236.
136. Boginsky L., Reut O., Piatsiushyk Y., Zabolotny O., Kupryianov I. 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.
137. Boginsky L.S., Reut O.P., Sagaigora I.G., Petiyshik E.E., Vasiliev L.L. Jr. Capillary pumped evaporator. // 3 Int. Sem. "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators", Minsk, 15-18 Sept., 1997. S. 198-202.
138. Doremus P., Toussaint F., Alvain O. Simple Tests and Standard Procedure for the Characterisation of Green Compacted Powder // NATO Advanced Research Workshop. Recent Developments in Computer Modeling of Powder Metallurgy

- Processes. – Kiev, Ukraine, IOS Press 2001. – Series III: Computer and Systems Sciences. – Vol. 176. – P. 29-41.
139. Dowwel N.B., Howard R.A. Carbon. 1986. V. 24., № 3., P. 311-323.
140. Kuhn H.A., Downey C.L. Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder materials // Int. J. Powder Met. – 1971. – V. 7, № 1. – P. 15-25.
141. Maximenko A., O. Van Der Biest. Modelling of Damage Development During Cold Pressing of Powders // Proceeding of Powder Metallurgy European Congress. – Nice, France, 2001. – Vol. 3. – P. 291-295.
142. Ogane M., Kamakami T., Shima S. Plasticity theory for porous metals and it's application // J. Jap. Soc. Powder and Met. – 1973. – V. 20, № 5. – P. 142-146.
143. Riera M.D., Prado J.M. Modelling Of the Plasticity in Cold Compaction of Metal Powders. Web-site Centre Tecnologic de Manresa, Universitat Politecnica de Catalunya, Spain, 2002. – P. 1-9.
144. Schneider L.C.R., Cocks A.C.F. Experimental Investigation of Yield Behaviour of Metal Powder Compacts // Powder Metallurgy. – 2002. – Vol. 45, No. 3. – P. 237-245.
145. Secondi J. Modelling Powder Compaction from a Pressure-Density Law to Continuum Mechanics // Powder Metallurgy. – 2002. – Vol. 45, No. 3. – P. 213-217.
146. Suh N.P. A yield criterion for plastic frictional work-hardening granular materials // Int. J. Powder Met., – 1969. – V. 5, N 1. – P. 69-76.
147. Tabata T., Masaki S., Abe Y. A yield criterion for porous materials and analyses of axi-symmetric compression of porous disks // Сосэйто како. Jap. Soc. Technol. Plast. – 1977. – V. 18, № 196. – P. 373-380.
148. Vasiliev L.L., Mishkinis D.A., Antukh A.A., Vasiliev L.L. Jr., Reut O.P., Romanenkov V.E. New solar solid sorption refrigerator. // 3 Int. Sem. "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators", Minsk, 15-18 Sept., 1997. S. 193-198.