

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА
ІМ. І.М. ФРАНЦЕВИЧА НАН УКРАЇНИ

ПОВСТЯНОЙ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ

УДК 624.131.67+ 532.546+620.284:669.018.24:621.762.4/.5

**БАГАТОШАРОВІ ПОРИСТІ ПРОНИКНІ МАТЕРІАЛИ З РЕГУЛЬОВАНОЮ
ПОРИСТІСТЮ З ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Луцькому національному технічному університеті Міністерства освіти та науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Рудь Віктор Дмитрович,
Луцький національний технічний університет,
кафедра прикладної механіки,
Заслужений діяч науки і техніки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, член-кореспондент
НАН України
Майстренко Анатолій Львович,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН
України, завідувач відділу комп'ютерного
моделювання та механіки композиційних матеріалів;

доктор технічних наук, професор
Ковальченко Михайло Савич,
Інститут проблем матеріалознавства
ім.І.М.Францевича НАН України, головний науковий
співробітник, відділ термомеханічної обробки
тугоплавких матеріалів,
Заслужений діяч науки і техніки України;

доктор технічних наук, професор,
Роїк Тетяна Анатоліївна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», в.о. завідувача кафедри технології
поліграфічного виробництва.

Захист відбудеться “ 22 ” березня 2021 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.207.03 Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України за адресою: 03142, м. Київ, вул. Кржижановського, 3.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України за адресою: 03142, м. Київ, вул. Кржижановського, 3.

Автореферат розісланий “ 19 ” лютого 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.207.03

К.Т.Н.



О.В. Хоменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Ефективність виробництва в Україні та світі в сучасних економічних умовах істотно залежить від раціонального підбору дешевих матеріалів і застосування ресурсозберігальних технологій. Конкурентоспроможність промислових корпорацій, підприємств, заводів, фірм формується за рахунок регулювання собівартості продукції. Завдяки сучасним технологічним інноваціям можна розглядати вторинні промислові відходи як додаткове джерело сировини і матеріалів.

Сучасне маловідходне виробництво визначається потребою у створенні нових та вдосконаленні наявних методів отримання пористих проникливих матеріалів (ППМ) способом застосування прогресивних технологій пресування порошків. Як свідчить вітчизняний та світовий досвід останніх десятиріч, прогнозування, оптимізація та моделювання в порошковій металургії потребують подальшого вдосконалення теоретичних уявлень та їх втілення як нових методів та алгоритмів, що реалізуються за допомогою сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій.

Проблеми пресування пористих середовищ вирішуються за допомогою застосування комп'ютерного моделювання, яке дозволяє оптимізувати технологію отримання пористих проникливих матеріалів. Дане впровадження стало можливим завдяки істотному прогресу в останні десятиліття в розумінні основних особливостей порошкових матеріалів у процесі їх деформаційної обробки. Значний внесок у розвиток цих уявлень внесли такі вітчизняні й закордонні вчені: Г.А. Баглюк, Я.Е. Бейгельзімер, Л.С. Богінский, В.М. Горохов, Ю.Г. Дорофеев, Б.А. Друянов, Г.М. Жданович, Р.М. Кадушніков, В.М. Капцевич, М.С. Ковальченко, А.Г. Косторнов, І.Ф. Мартинова, В.З. Мідуков, О.В. Михайлов, А.М. Ніколенко, А.М. Лаптев, В.Е. Перельман, Г.Л. Петросян, І.Д. Радомисельский, О.А. Розенберг, О.В. Роман, В.Д. Рудь, Г.Г.Сердюк, В.В. Скороход, М.Б. Штерн, Shima S., Oyane M., Green A., R.M. German, H. Kuhn, A. Gurson, P. Doremus, D. Bouvard, A. Cocks, R. McMeeking, A. McMillan та ін.

Однак, вибір оптимальних параметрів технологічного процесу пресування ППМ є складним завданням. Тому з традиційними методами досліджень в даний час все більше застосовується метод попереднього комп'ютерного моделювання та прогнозування. Це стало можливим завдяки істотному прогресу в розумінні основних особливостей поведінки порошкових матеріалів в процесі їх ущільнення, створення відповідних математичних моделей.

Таким чином, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на отримання виробів конструкційного призначення, у тому числі багат шарових фільтрувальних пористих проникливих матеріалів із відходів промислового виробництва (порошку сталі ШХ15) з урахуванням розмірів структурних елементів шихти, встановлення фізичних зв'язків між складовими, будовою та властивостями готового виробу, їх експлуатаційними властивостями, а також пристрої для очищення води та повітря на їх основі, є *актуальною проблемою матеріалознавства*, вирішенню якої присвячено дану роботу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота є складовою частиною планів науково-дослідних робіт, які виконувались на замовлення Міністерства освіти та науки України:

1. Використання відходів промислового виробництва для виготовлення деталей конструкційного та триботехнічного призначення» за напрямком 04.07 “Економічні порошкові технології в металургії, металообробці та інших галузях виробництва” (номер державної реєстрації № д/р: 0112U00286), 2012 – 2013 рр;

2. Розробка технологій одержання матеріалів конструкційного та триботехнічного призначення на основі відходів промислового виробництва» напряму “Матеріали і вироби з порошків; конструкційні, інструментальні, порошкові матеріали зі спеціальними властивостями” (номер державної реєстрації № д/р: 0117U000631), 2017 – 2018 рр.

3. Дослідження процесів виготовлення виробів конструкційного та триботехнічного призначення з комплексом керованих властивостей»(номер державної реєстрації № д/р 0116U001941), 2016 – 2020 рр.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – вирішити важливу науково-прикладну проблему в галузі матеріалознавства, що стосується прогнозування структури, технології, експлуатаційних характеристик на етапі створення нових та вдосконаленні існуючих технологій отримання пористих проникних матеріалів із відходів промислового виробництва за рахунок чисельних та комп'ютерно-імітаційних моделей в умовах радіально-ізостатичного пресування.

Для досягнення сформульованої мети досліджувались такі завдання:

1. Створення нової, на основі наявних, технології отримання порошкових виробів із підвищеними механічними та функціональними властивостями на засадах моделювання процесів, які відбуваються при отриманні порошкових та гранульованих матеріалів.

2. На основі континуальної теорії пластичності пористого тіла, виготовленого методом радіально-ізостатичного пресування, розроблення теорії прогнозування розподілу пористості за перерізом пористих проникних матеріалів (ППМ).

3. Розроблення методології розрахунку моделей випадкових пор у ППМ на етапі засипання матеріалу в бункер, зважаючи на фізичну основу складових компонентів вихідного матеріалу.

4. Визначення факторів, які сприяють неоднорідності розподілу густини при радіально-ізостатичному пресуванні ППМ та становлення взаємозв'язку між технологічним режимами отримання ППМ і експлуатаційними характеристиками готового продукту.

5. Розроблення комп'ютерно-імітаційних моделей для оптимізації технологій отримання виробів із порошків на всіх етапах їх виготовлення для створення складових пористих циліндрів методом радіально-ізостатичного пресування.

6. Експериментальне дослідження та перевірка розробленої пористої структури ППМ, яка має відповідати оптимальному поєднанню експлуатаційних характеристик у процесі роботи.

7. Розроблення та впровадження у виробництво технологічних способів створення багатошарових ППМ із відходів промислового виробництва для очищення рідин та газів.

Об'єкт дослідження – процеси прогнозування, моделювання та створення порошкових пористих проникних матеріалів.

Предмет дослідження – формування та створення багатошарових ППМ з відходів промислового виробництва з використанням комп'ютерно-імітаційних моделей визначення нерівномірного розподілу густини по перерізу та вплив їх на експлуатаційні властивості готових виробів.

Методи дослідження. Під час виконання дисертаційної роботи застосовувалися сучасні методи імітаційного й аналітичного моделювання та експериментальних досліджень. Результати роботи базуються на континуальних уявленнях про поведінку пористих середовищ, використанні нової реологічної моделі пластичності пористого тіла і методів скінчених елементів. При дослідженні процесів пресування пористих порошкових матеріалів (вкладених циліндрів) застосовувався метод моделювання, що поєднує методи дискретних і скінчених елементів. Сухе радіально-ізостатичне пресування та формування фільтрувальних ППМ досліджували на оригінальних експериментальних і дослідних установках, які розроблені і виготовлені в Луцькому НТУ.

Достовірність теоретичних розробок підтверджено результатами експериментальних досліджень, виконаних у лабораторних та виробничих умовах із застосуванням розроблених установок.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. *Вперше* теоретично обґрунтовано та запропоновано узагальнену модель розподілу густини порошкових середовищ за радіусом пористого тіла (циліндра) під дією зовнішнього радіального навантаження; модель описує як деформацію порошку, так і пористого тіла, при деформуванні якого наявний вказаний опір.

2. На підставі застосування запропонованої моделі та методу обчислень, що на ній базується, *вперше* розглянуто ряд технологічних процесів створення пористих проникних матеріалів з одночасним їх формоутворенням та прогнозуванням властивостей.

3. На підставі розроблених теоретичних уявлень *вперше* розроблено метод комп'ютерного моделювання, що дозволяє не тільки визначити розподіл пористості та інших характеристик порошкового проникного матеріалу, але й встановлювати взаємозв'язок між технологічними режимами їх отримання і експлуатаційними характеристиками.

4. *Вперше* удосконалено методологію розрахунку моделі прогнозування розподілу пор у ППМ на етапі засипання матеріалу у бункер з урахуванням фізичної основи складових компонентів вихідного порошку.

5. На основі теорії пластичного деформування матеріалів, що стискаються, *вперше* розроблена комп'ютерна програма, яка дає можливість визначати розподіл густини по радіусу кожного шару ППМ в різний момент часу деформування.

6. Встановлено та підтверджено комп'ютерним моделюванням, що при пресуванні фільтрувальних елементів циліндричної форми зі збільшенням радіуса ППМ величина пористості зростає.

7. Доведено, що при радіально-ізостатичному пресуванні порошкового фільтрувального елемента складної форми розподіл величин пористості та накопиченої пластичної деформації за об'ємом залежить від схеми ущільнення.

8. *Вперше* розроблена нова методика для нанесення комбінованих покриттів для деталей конструкційного призначення з відходів промислового виробництва, що застосована для пористих проникних матеріалів для підвищення корозійностійкості.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані в дисертаційній роботі модель пластичності порошкових і пористих середовищ, методика моделювання, а також встановлені автором закономірності можуть бути використані при дослідженні різних схем деформування, розробці нових й оптимізації існуючих технологічних процесів одержання порошкових виробів.

Розроблено новий спосіб отримання фільтрувального матеріалу (свідоцтво №100743 / Рудь В. Д., Повстяной О. Ю., Самчук Л. М., Савюк І. В., Куц Ю. В.: заявник та правовласник Луцький НТУ; МПК (2015.01) B22F 9/00, B01D 39/00, заявл. 16.02.2015; опубл. 10.08.15, Бюл. №15.) з регульованою пористістю для очищення технічних рідин та газів залежно від умов експлуатації.

Розроблено комп'ютерні програми «Моделювання пресування одношарових фільтрів (Фільтр 1)» (свідоцтво №68843, 29.11.2016 р.) та «Моделювання пресування багатшарових фільтрів (Фільтр N)» (свідоцтво №68842, 29.11.2016 р.), що дозволяють моделювати процес пресування одношарових та багатшарових порошкових проникних матеріалів із заданою пористістю і прогнозувати майбутню пористу структуру одно- та багатшарового фільтрувального матеріалу, які отримані методом сухого радіально-ізостатичного пресування.

Розроблено комп'ютерну програму «Комп'ютерно-імітаційне моделювання для напилення захисних середовищ на деталь» (свідоцтво №71207, 29.03.2017 р.) для розрахунку захисного покриття на ППМ з відходів промислового виробництва.

Основні результати роботи впроваджено у виробництва на Луцькому МПД ДП «Укрспирт» (м. Луцьк) для очищення технічних рідин та палива від механічних забруднень. Використання розроблених одношарових фільтрувальних ППМ із порошку сталі ШХ15, які отримані методом радіально-ізостатичного пресування, підвищує рівномірність поророзподілу фільтрувальних матеріалів на 20-30% і збільшує проникливість на 15-20% порівняно з аналогічними традиційними фільтрувальними матеріалами, що підтверджується відповідним актом від 01.08.2019р. та у ТОВ «ВОГ ТРЕЙД» (м.Київ), для очищення змазувально-охолоджувальної рідини (ЗОР) типу «Унізор» та масла, керосину, що підтверджується відповідним актом від 26.11.2019р.

На виробничій базі компанії Ningbo FUTEC Co., Ltd (м.Нінбо, КНР) була виготовлена дослідна партія багатшарових пористих проникних матеріалів з порошку сталі ШХ15 методом радіально-ізостатичного пресування. Ефективність нового фільтрувального ППМ порівняно з аналогічними традиційними ППМ склала 120%, підтверджується відповідним актом від 10.09.2019р.

На основі результатів дослідження в Інституті нових матеріалів Guangdong Juhang Institute For Advancer Material Co., LTD (провінція Гуандун, КНР) впроваджено партію тришарових ППМ для очищення технічних рідин від механічного забруднювача. Дані ППМ мають коефіцієнт проникності в 3, а ресурс і брудоемкість в 1,5 рази вищу порівняно з відомими одношаровими фільтрувальними ППМ, при цьому маса фільтру на 20% менша, підтверджується відповідним актом від 02.09.2019р.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, належать особисто здобувачу. Здобувачу належать формулювання мети та наукових завдань досліджень, організація та проведення експериментальних випробувань, обробка результатів досліджень, підготовка наукових статей до друку, участь у проведенні виробничих випробувань. Аналіз та обговорення отриманих результатів роботи проводився за участю заслуженого діяча науки та техніки України, *д.т.н., професора Рудя В.Д.* За результатами усіх етапів дисертантом було сформульовано наукову новизну та основні висновки за темою роботи.

Роботу виконано у Луцькому національному технічному університеті. У співавторстві з *к.т.н., доцентом Імбірович Н.Ю.* розроблена нова методика для нанесення комбінованих покриттів для деталей конструкційного призначення з відходів промислового виробництва та застосована для пористих проникних матеріалів для підвищення корозійно- та зносостійкості; моделювання процесу радіально-ізостатичного пресування ППМ складної форми у вигляді колби, дво- та тришарових фільтрів, які отримані з порошку сталі ШХ15, проводилося з аспірантом кафедри машинобудування, стандартизації та сертифікації обладнання Національного університету харчових технологій *Михайловим А.О.*; моделювання процесу пресування одношарових та багатошарових порошкових проникних матеріалів із заданою пористістю і прогнозування майбутньої пористої структури одно-, багатошарового фільтрувального матеріалу, які отримані методом сухого радіально-ізостатичного пресування, проводилося з *к.т.н., с.н.с. Кузьмовим А.В.* в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

Здобувач висловлює глибоку подяку *член-кореспонденту НАН України, д.т.н., М.Б. Штерну* за надані консультації щодо розв'язання важливої наукової проблеми та шляхи їх можливого вирішення.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на науково-технічних конференціях: «Порошковая металлургия: современное состояние и будущее»: Международная конференция (Київ, 2014 г.); II, V Всеукраїнська науково-технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні», (Львів, 2014, 2016 рр.); II-а Міжнародна науково-технічна конференція ТК-2014 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» (Луцьк-Світязь, 2014 р.); 11-я Международная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, Беларусь, 2014); Международная научно-техническая конференция «Новые технологии и материалы, автоматизация производства» (Брест, Беларусь, 2014); Международная научно-техническая конференция «Порошковая металлургия: Современное состояние и будущее» (Київ, 2014); Міжнародний конгрес «Global scientific unity 2014» (Прага, Чехія, 2014 г.); «The E-MRS Fall Meeting and Exhibit will be held in Warsaw University of Technology» (Warsaw, Poland, 2015-2016, 2018 рр.); V-VIII Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні та експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства і машинобудування» (Луцьк-Світязь, 2015-2017 рр.); V Міжнародна наукова конференція матеріали для роботи в екстремальних умовах-5 (Київ, 2015 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Реологічні моделі і процеси деформування структурно-неоднорідних

матеріалів» (Луцьк-Світязь, 2016 р.); International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions" "WORLD SCIENCE" (Dubai, UAE, 2016 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Матеріали і покриття в екстремальних умовах: теоретичні і експериментальні основи технологій виготовлення» (м.Луцьк – оз.Світязь, 2017 р.); VIII, IX Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2018-2019 рр.); 23-th INTERNATIONAL MODELING SCHOOL OF AMSE-UAPL (Луцьк–оз.Світязь, 2018 р.); Всеукраїнська науково-технічна конференція "Прогресивні технології у машинобудуванні" PMTE 2019 (Івано-Франківськ, 2019 р.); I Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – ПРМТ2019» (Вінниця, 2019 р.); Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes InterPartner-2019 (Odesa, 2019 р.), 6-а Міжнародна конференція «HigtMatTech» (м. Київ, 2019), IX Міжнародна науково-технічна конференція «ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ У МАШИНОБУДУВАННІ», (Львів-Карпати, 3–7 лютого 2020 р), Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes InterPartner-2020 (Odesa, 2020 р.).

Дисертаційна робота у 2018-2019 роках в повному обсязі було обговорено та було схвалено на розширеному науковому семінарі Інституту проблем матеріалознавства НАН України ім.І.М. Францевича у відділі №18 «Реологічні та фізико-хімічні основи технології порошкових матеріалів», на науковому семінарі «Матеріалознавство, діагностика матеріалів та конструкцій» у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя, на розширеному науково-технічному семінарі Херсонської державної морської академії, на науковому семінарі відділу №9 «Комп'ютерне моделювання та механіка композиційних матеріалів» у Інституті надтвердих матеріалів НАН України.

Публікації. Результати дисертаційної роботи у **49** наукових публікаціях, з них **12** – у журналах, що входять до Переліку наукових фахових видань України в галузі технічних наук, з яких **6** включено до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, **2** - у зарубіжному фаховому виданні за напрямком технічних наук, **21** - тези доповідей на вітчизняних, міжнародних конференціях та симпозиумах. За матеріалами дисертаційної роботи написано та опубліковано **2** монографії (у співавторстві), отримано **3** патенти на корисну модель та **3** авторських свідоцтва на твір. Всі надруковані праці за темою дисертації виконані автором особисто та у співавторстві.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку літературних джерел з 361 найменувань. Повний обсяг роботи становить 21,125 друкованих аркушів, з них – 20.06 друкованих аркушів основного тексту; дисертація містить 189 рисунки, 55 таблиць, 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність проблеми аналізу та прогнозування властивостей пористих проникних матеріалів, консолідації порошків і створення пористих проникних матеріалів, сформульовано мету та завдання дослідження, відображено наукову новизну і практичну цінність роботи, наведено відомості щодо

апробації роботи та публікації за темою дисертації, висвітлений особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** роботи розглянуто сучасний стан та розвиток процесів засипання, пресування та спікання ППМ, розглянуті методи нанесення захисних покриттів, проведений аналіз наявних математичних моделей процесів фільтрування ППМ та описано пористість через фільтрувальну здатність.

Прогнозування закономірностей формування структури та властивостей матеріалів залежать, передусім, від геометричних факторів часток порошку. Крім того, аналіз сучасних технологічних процесів порошкової металургії показує, що наявність кореляційних зв'язків між складовими, будовою та властивостями забезпечується всіма операціями технологічного процесу, де початковим етапом є заповнення прес-форм порошком, який визначає не тільки розміри, форму, густину, але й впливає на ряд найважливіших властивостей готового продукту.

Початковою стадією технології порошкової металургії є засипання – упаковка з досить низькою густиною, важливим саме є моделювання нещільної упаковки сферичних частинок (рис.1).

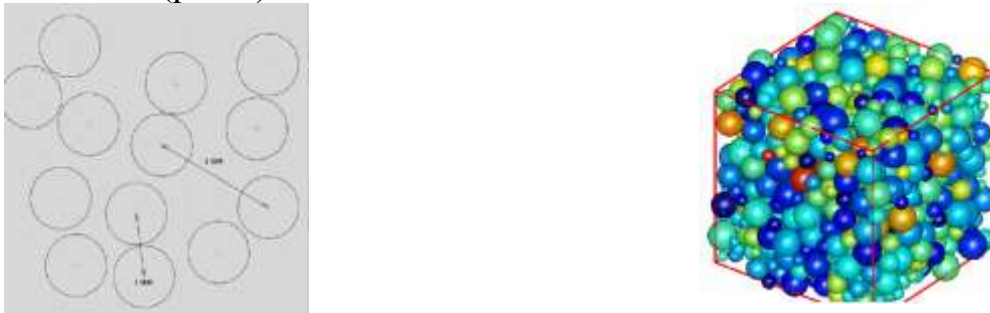


Рис. 1 – Модель випадкової пористості, яка згенерована в *Abaqus* з використанням *Python*

Сучасний технологічний прогрес зумовлює необхідність пошуку нових технологічних прийомів і методів, які б дозволили створювати такі структури ППМ, що забезпечать найбільш оптимальне поєднання експлуатаційних характеристик.

Для отримання фільтрувальних ППМ було спроектовано та виготовлено нову установку для пресування ущільнювальних матеріалів різного роду: металічні та керамічні порошки, графіт, волокна, дріт, сітка, тощо (рис.2).

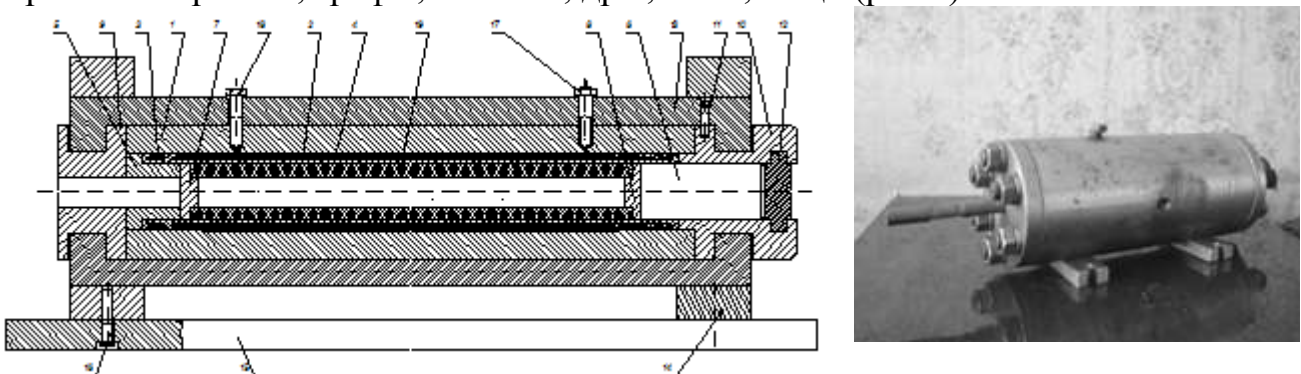


Рис.2 – Пристрій для пресування ущільнювальних матеріалів різного роду: металічні, керамічні порошки, графіт, волокна, дріт, сітка, тощо: 1 – корпус; 2 – армована еластична оболонка з манжетами; 3 – вставки; 4 – робоча камера; 5-8 – проміжні упори; 9 – кільце; 10 – кришка; 11 – гвинт; 12 – повзун; 13 – жорстка циліндрична рама; 14 – кільце; 15 – стіл; 16 – гвинти; 17 – штуцер; 18 – заглушка; 19 – еластичний вкладиш

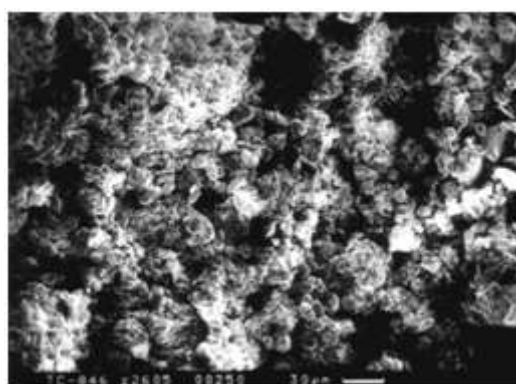
Показано, що при виготовленні фільтрувальних ППМ, які відповідають сучасним вимогам, найбільш раціональною є радіальна схема пресування, і вона може бути основою для створення нового виду продукції – багатошарових фільтрів різноманітного призначення.

Була розроблена технологія пресування методом СР-ІІ з наступним спіканням за допомогою саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (рис.3). Для приготування суміші вихідними компонентами є порошок титану марки ПТС-1, сажа (С) та порошок сталі ШХ15 після додаткової обробки.

Компоненти змішувалися у співвідношенні 45% Ті, 45% ШХ15 (з розміром частинок -200+160 мкм) та 10% С (250 г – Ті; 250 г – ШХ15; 60 г – С) у кульовому млині. Поєднання Ті+С+ШХ15 вибране із міркувань підвищення швидкості СВС-спікання з метою отримання анізотропних властивостей ППМ з пористою структурою. Оптимальний тиск при СР-ІІ, з точки зору формуємості, для суміші Ті+С+ ШХ15 становив $P = 140 \dots 160$ МПа.



а)



б)

Рис. 3 – Отримання ППМ на основі Ті+С+ШХ15 за допомогою СВС – процесу (а) та структура відповідного ППМ (40% Ті, 40% ШХ15 та 20% С) після спікання (б)

На основі розробленої методики пресування можна спостерігати еволюцію вмісту маленьких і великих пор в процесі спікання. На рис. 4 показано знайдений методом скінчено-елементного моделювання розподіл пористості по перерізу стінки фільтра після спікання, а також експериментально виміряна середня пористість в кожному з шарів (рис.5).

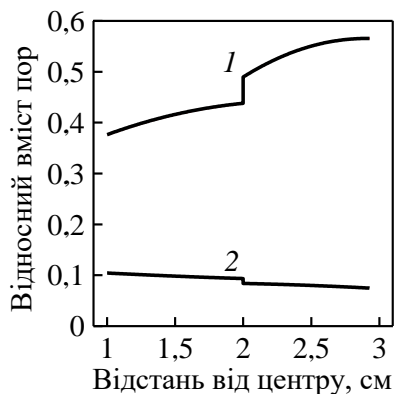


Рис. 4 – Вміст дрібних (1) та великих (2) пор по перерізу фільтра

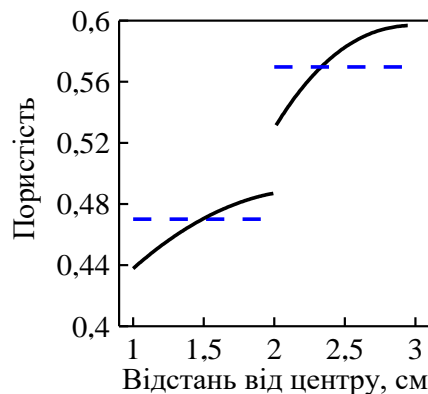


Рис. 5 – Розподіл пористості по перерізу двошарового фільтра після спікання

Проаналізувавши сучасні тенденції створення ППМ, виникає необхідність у комплексному дослідженні та розробці науково-практичних принципів прогнозування, моделювання, розробки структури та властивостей ППМ. Це підтверджується необхідністю та своєчасністю розробки концептуальних підходів та технологічних принципів управління процесами створення ППМ з відходів промислового виробництва.

У другому розділі наведено характеристики вихідних матеріалів, викладено методики дослідження, описано експериментальні установки.

Початковий матеріал – шліфувальний шлам сталі ШХ15, що утворюється після механічної обробки кілець та роликів підшипників в умовах ПАТ „SKF – Україна”.

Хімічний аналіз показав, що склад металевих частин, які містяться у шламі, в основному відповідає ДСТУ на шарикопадшипникову сталь ШХ15 (табл. 1).

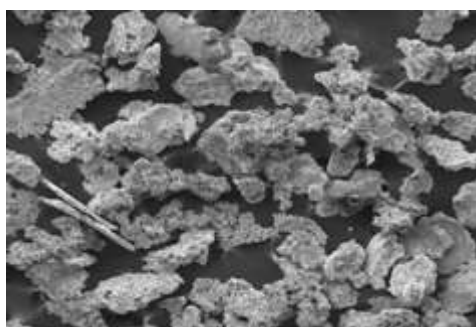
Таблиця 1 – Хімічний склад шліфошламу та сталі ШХ15, (%)

Матеріал	C	Cr	Si	S	Mn	O	Нерозчинний осад
Шлам	0,95	0,92	0,37	0,09	0,21	8,5	4,8
Сталь ШХ15 ГОСТ 801–78	0,95– 1,05	1,3– 1,65	0,17– 0,37	до 0,02	0,2–0,4	до 2	–

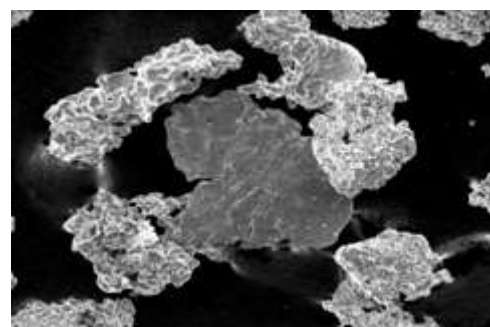
Отриманий високоякісний металевий порошок з частинками регулярної форми та розмірів для отримання ППМ представлений на рис.6.

Форма частинок порошку визначалася за ДСТУ 18318–73 і металографічним методом. Для цього частки порошку різних партій заливалися у спеціальні обойми акриловим компаундом з подальшим виготовленням шліфів.

Характер розвиненості поверхонь частинок, розподіл структурних складових в об’ємі матеріалу досліджували на модульному комплексі Dimic 1000, який є оптичною 3D–системою контролю і складається з блоків зчитування, обробки та представлення інформації.



а



б

Рис. 6. – Частинки порошку сталі ШХ15 отримані, за новою технологією переробки шламових відходів: а) $\times 250$, б) $\times 500$

Гранулометричний склад порошку досліджено методом ситового аналізу, з використанням вібросита моделі 029 № 124–85, відповідно до ДСТУ 18318–94. Насипну густину порошку визначали за ДСТУ 19440–94.

Пікнометричну густину порошку визначали відповідно до загальноприйнятої методики у пікнометрі об'ємом 25 см³. Як пікнометричну рідину застосували толуол.

Текучість порошку визначали за методикою передбаченою ДСТУ 20899–75, і порівнювали з текучістю порошку ПЖ–3М ГОСТ 26802–86, що визначалася за цією ж методикою. Ущільнення порошку визначали за ГОСТ 25280–90. Ця характеристика оцінюється за густиною пресовок, що виготовляються при тиску пресування 200–800 МПа у циліндричній прес-формі.

Густину утрушування визначали як відношення маси порошку до величини об'єму, який займає насипаний вільно порошок, при дії на нього механічних віброколивань. Випробування проводилися на гідравлічному вібростолі. Частота вібрацій – 22,3 Гц, час ущільнення – 15 с.

Захисне корозійностійке покриття наносили методом розпилення електродних дротів за допомогою електродугового металізатора ЕМ-17 із модифікованою системою розпилювання, за якої електрична дуга горить в каналі розпилювальної головки, що давав змогу отримувати дрібнодисперсні покриття з концентрованого потоку метало-повітряної суміші.

Оксидокерамічні покриття синтезовано на легких сплавах Al, Mg, Ti і на алюмінієвих покриттях, отриманих методом електродугового напилення. Гальванічні покриття формували в катодно-анодному режимі імпульсним струмом густиною 20 А/дм² у електроліті за співвідношеннями струмів катоду та аноду, рівними 1 і 1,5 на установці, яка представлена на рис. 7.



Рис. 7 - Загальний вид установки для плазмоелектролітного оксидування

Об'єктами комп'ютерного металографічного аналізу були зображення пористих тіл, отриманих за допомогою рентгенівського мікроскопу, який укомплектований системами для отримання зображень на просвіт і відображення, у світлому і темному полі зору, і підключеною до нього цифровою фотокамерою, яка забезпечує розподільну здатність цифрової фотографії не гірше, ніж розподільна здатність мікроскопу і спеціальним додатковим окуляром для з'єднання із мікроскопом і макрофотографування (рис. 8, 9).



Рис. 8 – Вид томографа X-ТЕК 225/230 kV

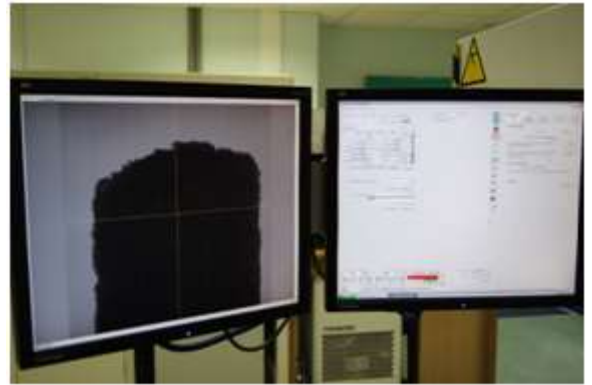


Рис. 9 – Рентгенівський мікроскоп під час процесу макрофотографування

Застосований комплексний підхід до проведення досліджень з використанням сучасних апробованих методик і обладнання для проведення експериментів, технологічного контролю процесів виготовлення матеріалів і нанесення захисних покриттів, точної обробки експериментальних даних підвищив достовірність отриманих результатів досліджень.

Третій розділ роботи присвячено моделюванню процесів радіально-ізостатичного пресування пористих проникних матеріалів.

Методи моделювання невизначеності геометрії впливають на міцність складових компонентів, які знаходяться на початковій стадії заповнення, але моделювання випадкового розміщення порошку на стадії засипання у бункер з урахуванням фізичних параметрів складових повністю не була досліджена.

Розробка методології моделювання розрахунку реальної засипки у форму ПШМ, яка представляє більш реалістичний рівень гетерогенності, і є основою для виявлення фізичної поведінки порошку на стадії засипання для більшості випадків, які в даний час визначаються як емпірично, так і характеризується реальними експериментами.

Розроблена нова методика розрахунку фізичних параметрів, які закладаються для дослідження реальних упаковок (двовірний випадок).

Визначено інтегральні характеристики вихідного матеріалу (порошку сталі ШХ15) такі, як, наприклад, діелектрична проникність. Для вирішення даного завдання використано такий підхід: у результаті заповнення області G порошком виникли стаціонарні, ізотропні випадкові поля $\{\xi_{ij}(u), u \in R^3\}$ (1), що описують діелектричну проникність сукупності.

Якщо до границь області прикласти електричний потенціал, то потенціал U всередині області буде рішенням поданого нижче рівняння:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^3 \xi_{ij} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} U = 0 \\ U|_{\partial G} = \phi \end{cases} \quad (1)$$

У рамках даного підходу було розглянуто такі простіші випадки:

1) Одновірний простір, тобто $G \in R$. Замість випадкового поля $\xi(u), u \in R$ розглядалася періодична функція $p: R \rightarrow R$.

2) Багатовимірний простір тією ж самою періодичною функцією $p: R^d \rightarrow R$, де $d > 1$
Одновимірний випадок.

Нехай $G = [-1; 1]$, в такому випадку:

$$\begin{cases} x''_\varepsilon(u) = p_\varepsilon(u)x_\varepsilon(u) \\ x_\varepsilon(-1) = x_\varepsilon(1) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

де $p_\varepsilon(x) = p(x/\varepsilon)$, а $p: R \rightarrow R$ – періодична функція з періодом 1.

Рішення даної системи можна записати через ймовірносне представлення:

$$x(u) = M_u \exp\left\{-\int_0^\tau p_\varepsilon(\omega(s))ds\right\},$$

де $\{w(\varepsilon), s \in [0, +\infty]\}$ – вінерівський процес, а $\tau = \inf\{s : w_u(s) \in [-1, 1]\}$ – момент виходу вінерівського процесу з області G .

При цьому рішення задачі набуває вигляду:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^3 \bar{\xi}_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} u(x) = 0, \\ u/\partial G = g \end{cases} \quad (3)$$

де G – обмежена область з гладкою границею,

g – деяка функція.

u – рішення "усередненої" задачі:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^3 \bar{\xi}_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} U = 0. \\ u/\partial G = \phi \end{cases} \quad (4)$$

Тоді:

$$M \sup\{|u_\varepsilon(x) - u(x)| : x \in G\} = O(\varepsilon^k), k > 0.$$

На рис.10 наведено приклади візуалізації засипки згідно розробленої комп'ютерно-імітаційної моделі.

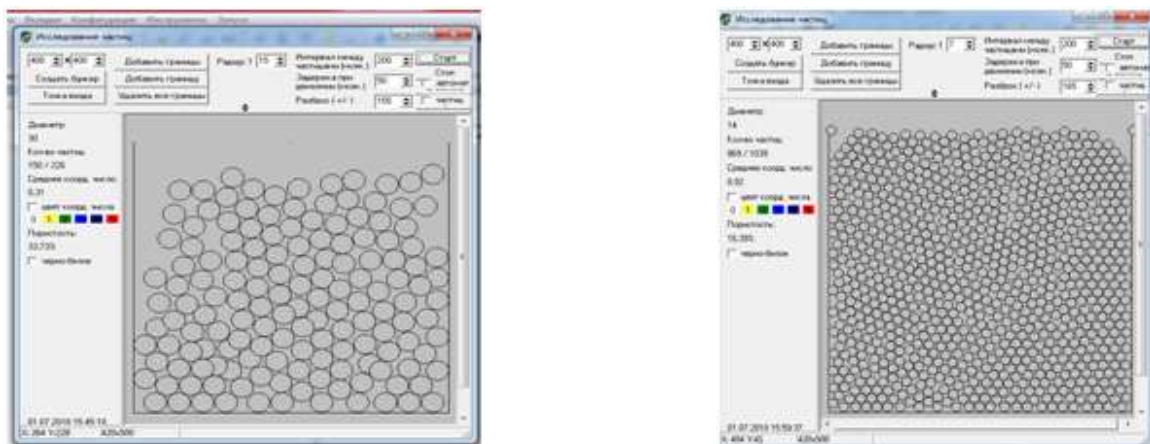


Рис. 10 – Приклади візуалізації засипки двовірної упаковки згідно розробленої комп'ютерно-імітаційної моделі

Щоб перевірити розрахункові значення, проводилась серія експериментів для циліндричних зразків ППМ $\varnothing 40$ мм і $h=220$ мм із різними комбінаціями процентного вмісту вихідних компонентів. Після проведення ряду досліджень структурно-неоднорідних матеріалів у таблиці 2 представлені результати основних технічних параметрів реального засипання порошку.

Таблиця 2 – Результати основних технічних параметрів реального засипання

ППМ	1	2	3
Об'ємний вміст, %	99,1	98,2	98,6
Зовнішній діаметр, мм	40	40	40
Внутрішній діаметр, мм	36	36	36
Маса, г	420	420	420
Густина, г/см ³	6,75	6,88	6,42
Пористість, %	53,4	55,4	54,7
Відхилення результатів, %	7,9	8,5	7,6

Об'єктно-орієнтована САПр, механізм параметризації якої реалізований для використання системи параметричного креслення і моделювання T-FLEX CAD та Pro/ENGINEER, що стали базою для розробки системи моделювання параметричного проектування установок для сухого радіально-ізостатичного пресування (рис.11).

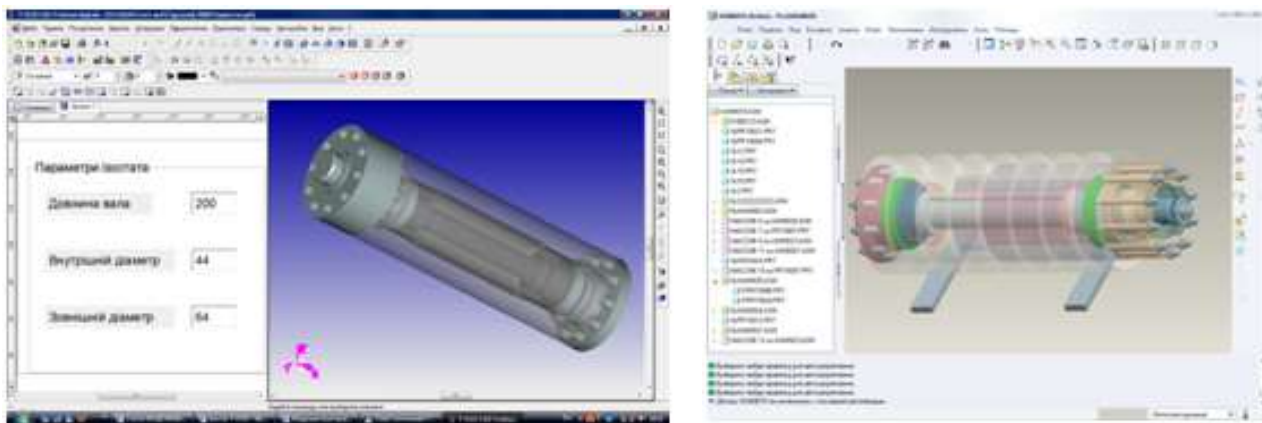


Рис. 11 – Система моделювання параметричного проектування установок для сухого радіально-ізостатичного пресування пористих проникних матеріалів на базі T-FLEX CAD та Pro/ENGINEER

Розроблені та наявні технології не вирішують проблему виготовлення ППМ виробів з оптимальним поєднанням структурних характеристик та фізико-хімічними властивостями. При цьому важливо керувати якістю виробів, механізувати й автоматизувати процеси пресування, устаткування та інструменту, прогножуючи їх властивості на початковій стадії формування.

Для досягнення цього використаємо континуальну теорію пластичності пористого тіла. Далі отримано результат, який має відносно простий аналітичний вигляд, що дозволить аналізувати фактори неоднорідності розподілу густини.

Геометричну модель ППМ у вигляді пустотілого циліндру представлено на рис.12.

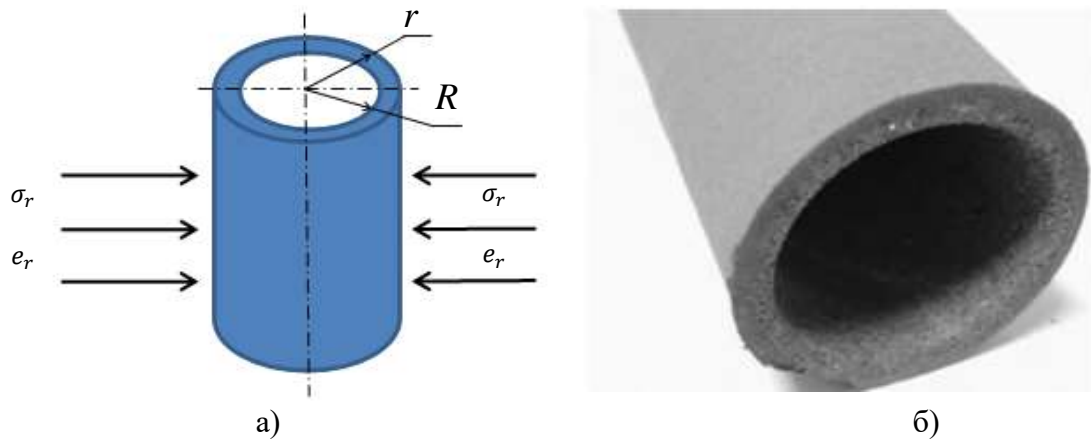


Рис. 12 – Геометрична модель прикладання напружень на ППМ (а) та зовнішній вигляд фільтру (б) у вигляді пустотілого циліндру

Циліндр (рис.12) перебуває під дією радіального обтиснення, яке прикладене на його зовнішній поверхні $r=R_2$. Його внутрішня поверхня також циліндрична з радіусом $r=R_1$ є нерухомою. Завдяки опору, який чинить металевий порошок радіальному переміщенню, у ньому виникають напруження σ_r , σ_z , σ_φ .

Розв'язок здійснювався у двох етапах. На першому з них – поле густини було однорідним. Насправді вона не є однорідно розподіленою. Щоб цю неоднорідність визначити, необхідно описати поверхню навантаження рівняннями деформацій:

$$e_r = e/2 + eR_1^2 / (2r^2); \quad (5)$$

$$e_\varphi = e/2 - eR_1^2 / (2r^2); \quad (6)$$

$$e_r - e_\varphi = eR_1^2 / (r^2), \quad (7)$$

де e – об'ємна деформація; r – поточний радіус пористого тіла.

Радіальний тиск P_{rad} виражається узагальненою формулою:

$$P_{\text{rad}} = \sigma_r = -\sigma_m \sqrt{(1-\theta_0)(\varphi+6\psi)/6}, \quad (8)$$

де φ і ψ – параметри поверхні навантаження деформівного тіла.

Підстановка значень φ та ψ (пористість θ відповідає рівномірному її розподілу) дає формули:

$$P_{\text{rad}} = \sigma_m \sqrt{(1-\theta_0)(1/6+a/\theta_0)}; \quad (9)$$

$$\theta = \frac{a \left\{ \sigma_m^2 - \left(-P_{\text{rad}} \sqrt{6 + 18R_1^4 / r^4} / (1 + 6\chi) \right)^2 \right\}}{\left\{ (P_{\text{rad}} \chi / (1 + 6\chi))^2 + a \sigma_m^2 \right\}}. \quad (10)$$

Параметр a визначили із експерименту на всебічне стискування, апроксимуючи криву «тиск–пористість» у вигляді $p \approx a/\theta$. Параметр σ_m доцільно вважати рівним тиску, який відповідає зменшенню пористості на 25% від початкового значення

(тобто, якщо вона була спочатку рівна 0,5, то σ_m рівне тому тиску, коли пористість дорівнюватиме 0,375).

Вигляд розрахункової залежності пористості наведений на рис.13. Як видно з розрахунків та проведення практичного дослідження пористість змінюється при зміні радіусу циліндричної заготовки ППМ (пустотілого циліндру), який виготовлений методом радіально-ізостатичного пресування. Був отриманий результат, який має аналітичний вигляд і дозволяє аналізувати фактори, що сприяють неоднорідності розподілу густину – радіальні та осьові напруження.

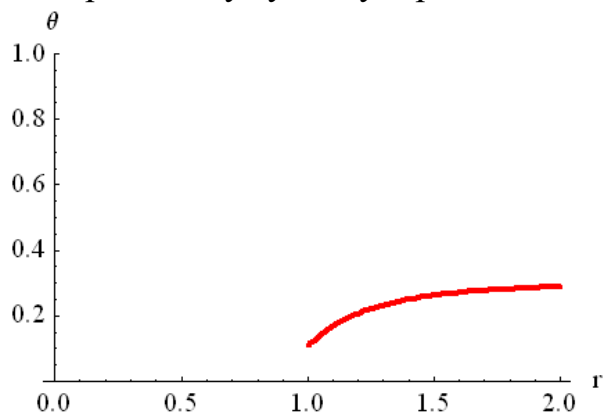


Рис. 13 – Залежність пористості θ від радіусу r (см) заготовки

За даною методикою було розроблено нове програмне забезпечення, яке дало змогу змодельовати процес радіально-ізостатичного пресування зі заданою пористістю ППМ.

Визначений за результатами таких розрахунків розподіл пористості та радіальної швидкості при моделюванні радіально-ізостатичного пресування багат шарового ППМ показаний на рис.14.

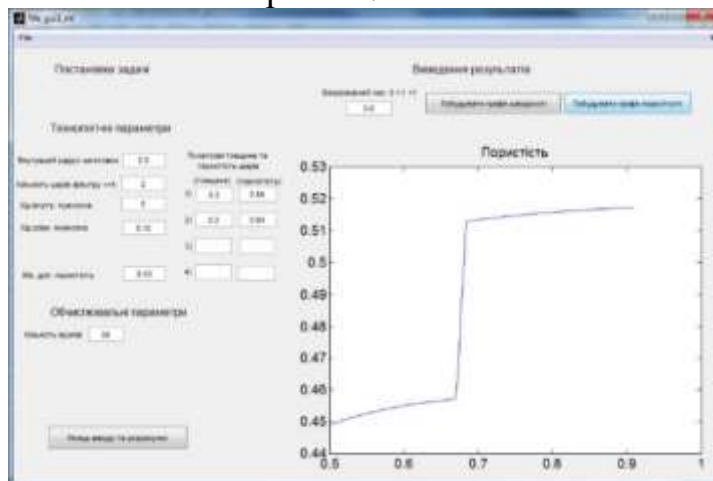


Рис. 14 - Залежність впливу радіальної швидкості та розподілу пористості при моделюванні радіально-ізостатичного пресування багат шарового ППМ

Радіальна швидкість дає можливість керувати розподілом пористості у багат шаровому ППМ та дозволяє аналізувати фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густини.

Процес ущільнення протікає аналогічно процесу накопичення деформацій. На ділянках ППМ, які розташовані ближче зовнішньої поверхні (останні шари),

спостерігається збільшення пористості. Вивчено вплив густини на розподіл пористості ППМ.

Система використовується для розрахунку оптимізації процесів отримання фільтрів на основі порошкових матеріалів при радіально-ізостатичному пресуванні (рис.15, 16).

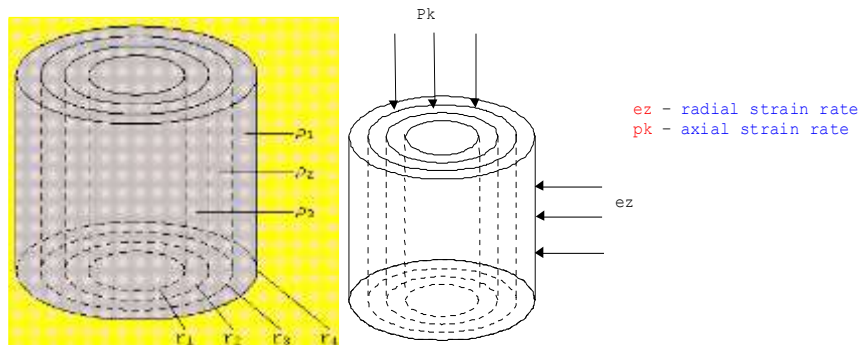


Рис. 15 – Моделювання багат шарового ППМ та їх густини при радіально-ізостатичному пресуванні

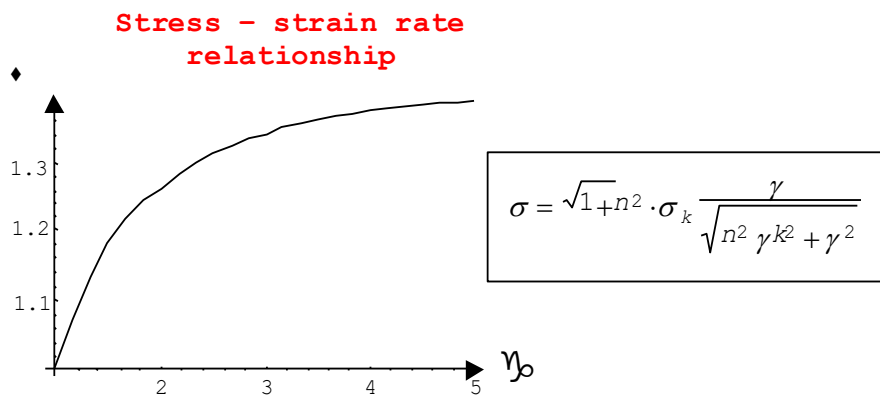


Рис. 16 – Розрахункова залежність напруження від швидкості деформації ППМ

В областях, розташованих біля осі стержня капсули, величина накопиченої деформації нижче (рис.17, 18). Наявність протитиску підвищує загальний рівень накопиченої деформації та приводить до більш рівномірного її розподілу. При цьому підвищується рівень накопиченої деформації в областях, розташованих біля осі стержня капсули.

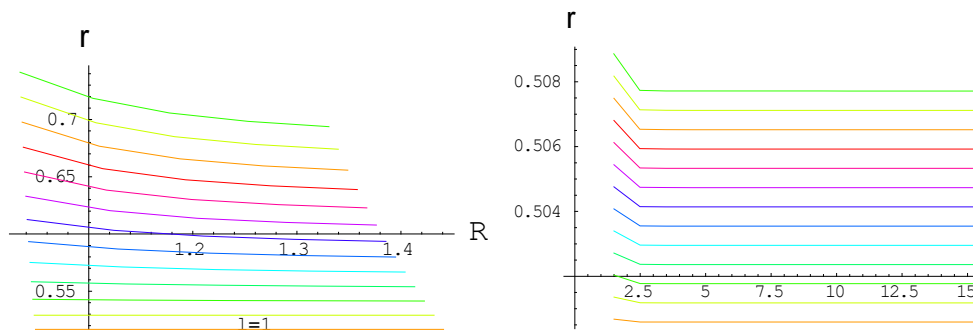


Рис. 17 – Розподіл густини по радіусу кожного шару ППМ в різний момент часу деформування

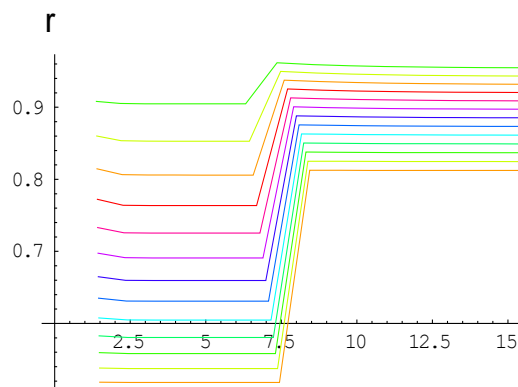


Рис. 18 – Узагальнений розподіл густини по радіусу кожного шару ППМ в різний момент часу деформування

На наступному етапі вивчено проблему напилення захисного покриття на ППМ та розроблено нове програмне забезпечення, яке моделює та досліджує процес нанесення на деталь захисного покриття. Це зменшує витрати часу на обчислення (рис.19).

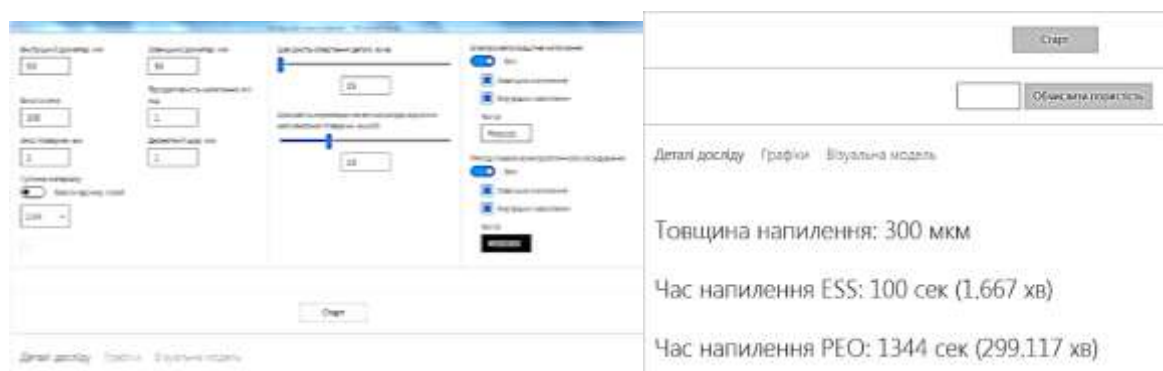


Рис. 19 – Результати обчислення параметрів напилення захисного покриття на ППМ з ШХ15

У **четвертому розділі** показані технологічні процеси отримання ППМ з відходів промислового виробництва з елементами комп'ютерного моделювання.

Технологічні параметри процесу пресування визначають розміри, форму, а також розподіл властивостей за об'ємом виробів, що, в свою чергу, впливає на експлуатаційні властивості фільтрів.

Вибір оптимальних параметрів процесу пресування є складним завданням. Тому поряд з традиційними методами досліджень, в даний час все більш активно застосовується метод попереднього комп'ютерного моделювання.

Моделювання виконано на основі континуального підходу. Як визначальні рівняння використали рівняння теорії пластичності пористого тіла. Визначення форми заготовки, що ущільнюється, а також полів щільності, напружень і деформацій виконано на основі методу скінченних елементів.

Розглядалися дві схеми ущільнення: радіальне (рис.20, а) та осьове (рис.20, б). Матеріал порошку, що ущільнюється – порошок сталі ШХ15. Початкова пористість фільтрувального елемента дорівнювала 0,7. Ущільнення відбувалося на оправку під впливом еластичного середовища, матеріал якого – поліуретан.

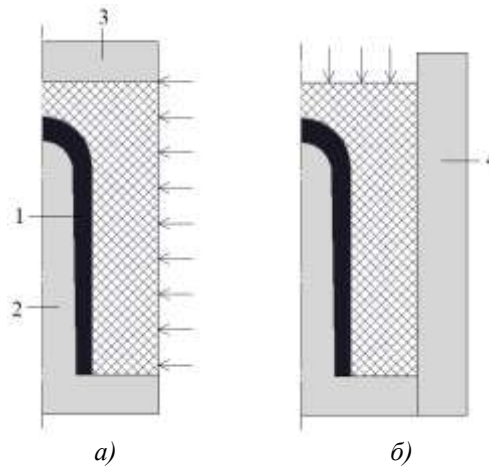


Рис. 20 – Схеми радіального (а) та осьового (б) ущільнення:
1 - порошок, що ущільнюється, 2 - оправка, 3 - кришка, 4 - стінка

При радіально-ізостатичному пресуванні порошкового фільтрувального елемента у вигляді колби розподіл величин пористості та накопиченої пластичної деформації за об'ємом виробу нерівномірний і залежить від схеми ущільнення.

На першому етапі більш інтенсивно ущільнюється стінка, а на другому етапі - дно фільтрувального елемента. У результаті величини пористості та накопиченої пластичної деформації розподілені більш рівномірно (рис.21).

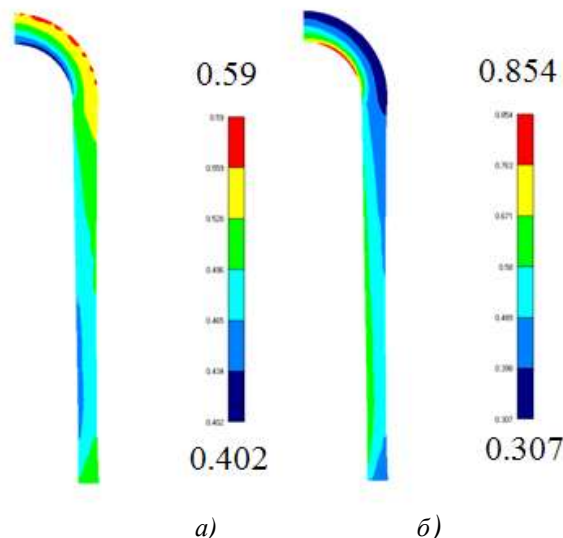


Рис. 21 – Розподіл пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при радіальному та осьовому ущільненні

Розглядалося пресування двошарових і тришарових фільтрів. При моделюванні ущільнення двошарових порошкових фільтрів величина внутрішнього діаметра еластичного елемента дорівнювала також 40 мм. Внутрішній діаметр еластичного елемента при пресуванні тришарового фільтра змінювався і підбирався для кожного шару окремо.

Результати моделювання по розподілу пористості по перерізу фільтрувальних елементів наведені на рис.22.

При ущільненні одношарового фільтра розподіл пористості нерівномірний (рис.22, а). Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Зі збільшенням ступеня

деформації різниця між величинами пористості матеріалу у внутрішньої і зовнішньої поверхонь фільтра зменшується.

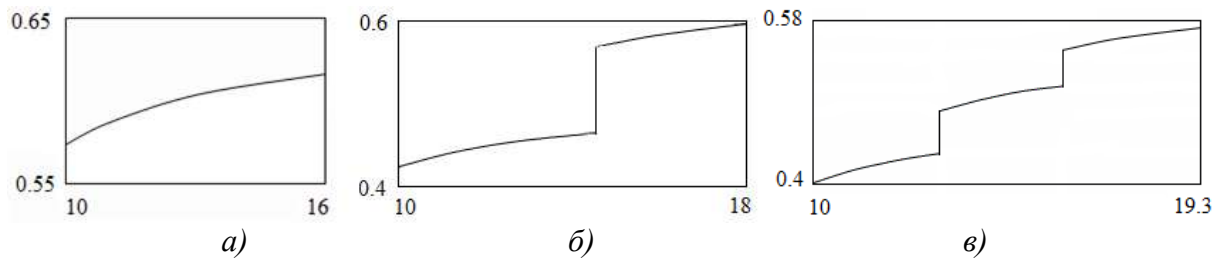


Рис. 22 - Розподіл пористості по радіусу (мм) в одношаровому (а), двошаровому (б) і тришаровому (в) фільтруючих елементах

На рис.22, б представлено розподіл пористості в двошаровому фільтрі. Ущільнення другого (зовнішнього) шару відбувається так само, як і першого шару. При цьому більш щільний внутрішній шар деформується незначно та виконує роль оправки. Подальше збільшення навантаження призводить до того, що настає момент, коли зовнішній шар ущільнився і обидва шари продовжують деформуватися одночасно.

Ущільнення шарів тришарового фільтра відбувається аналогічно (рис.22, в). Товщиною і пористістю шарів можна управляти за рахунок зміни початкової пористості засипаного порошку, внутрішнього діаметра еластичного елемента, а також тиску пресування.

Структура двошарового та тришарового ППМ представлена на рис. 23.

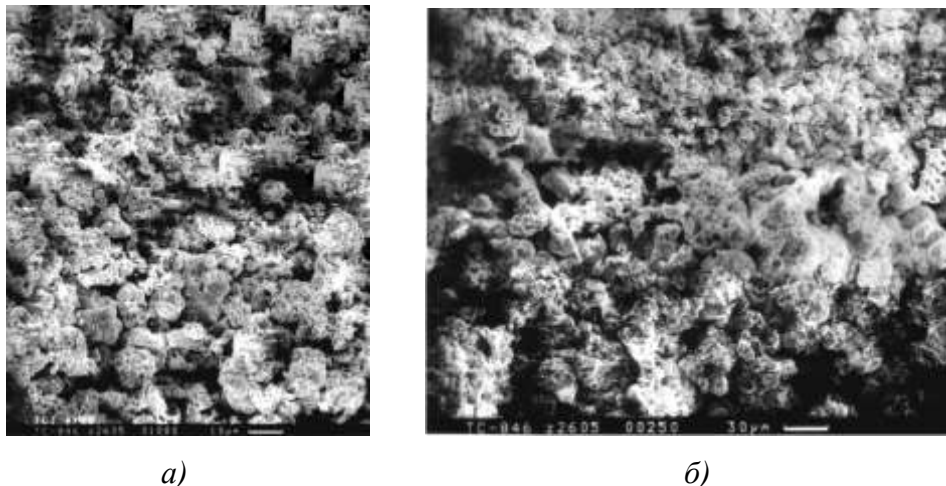


Рис. 23 - Структура двошарового (а) та тришарового (б) ППМ:

I – й шар розмір частинок порошку (-0,315+0,200) мм; II – й шар розмір частинок порошку (-0,200+0,160) мм; III – й шар розмір частинок порошку (-0,160+0,100) мм

Для тришарового фільтрувального ППМ визначили розподіли пористості та накопиченої деформації при радіально-ізостатичному пресуванні (рис.24).

Із результатів моделювання видно, що мінімальна пористість і максимальна накопичена деформація міститься у внутрішній поверхні, на зовнішній – навпаки.

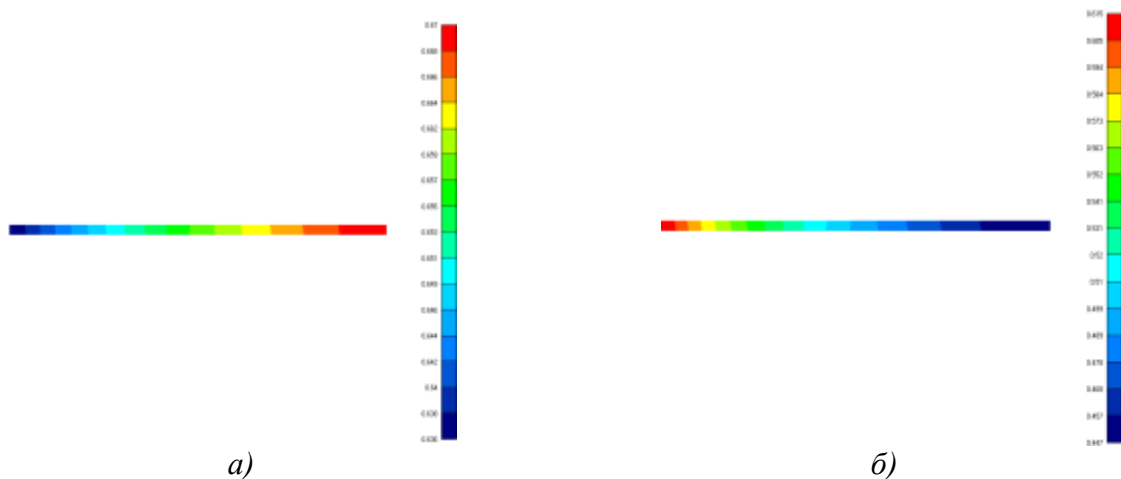


Рис. 24 - Розподіли пористості (а) та накопиченої деформації (б) ППМ при радіально-ізостатичному пресуванні

Підвищення продуктивності ППМ без зміни їх розмірів може бути досягнуто через збільшення площі робочої поверхні за рахунок її ускладнення.

Був розглянутий процес пресування ППМ з розвинутою бічною поверхнею у вигляді повздожніх ребер, які утворені дугами окружностей з розмірами, що розраховані з точки зору максимізації коефіцієнта збільшення поверхні при виконанні технологічних операцій. Результати моделювання на основі приведеної математичної моделі представлено на рис.25.

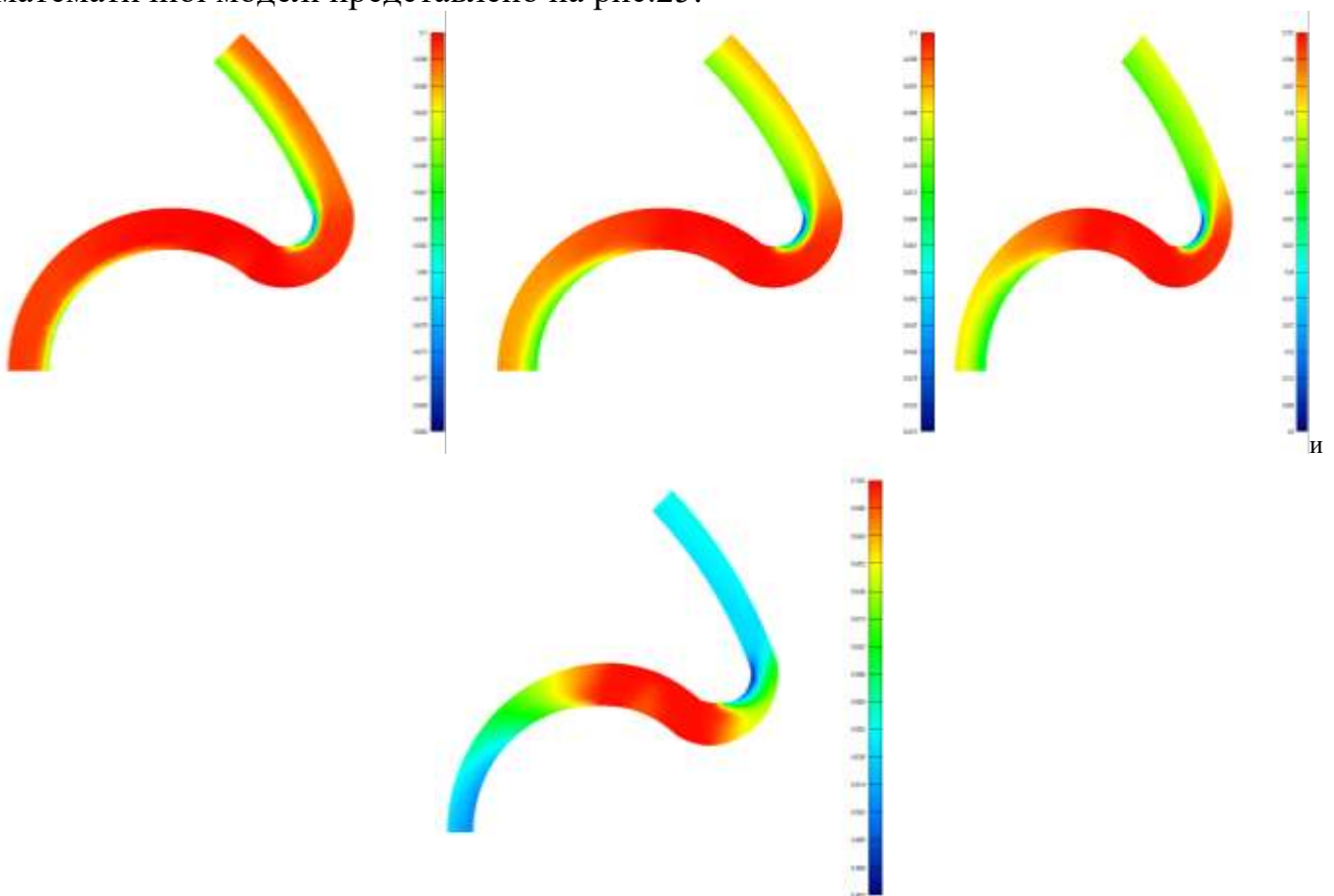


Рис. 25 – Деформований стан системи

Величина напружень по контуру пресовки не є постійною. Ця обставина визначається властивостями матеріалу еластичної оболонки та конфігурацією

поверхні пресовки. У зв'язку з геометричною неоднорідністю системи абсолютні переміщення в об'ємі еластичної оболонки на різних ділянках різні, тому на різних ділянках границі контакту еластичної оболонки та порошку співвідношення величини нормальних та дотичних напружень індивідуальні. Найбільші переміщення спостерігаються в областях між ребрами ППМ, що пресується, зумовлено перетіканням поліуретану під дією тиску.

На рис.26 представлені ППМ з розвинутою поверхнею.



Рис. 26 – ППМ з розвинутою поверхнею

Виготовлені дослідні партії ППМ (рис.27) мають такі переваги: вловлюють механічні домішки дисперсністю 15-500 мкм; ефективність очищення повітряно-газових сумішей не менше 98%; ефективність очищення емульсії і води не менше 95%; продуктивність коливається в діапазоні: по воді і емульсії від 1 л/год до 1000 л/год; по мастильних речовинах – від 0,5 л/год до 200 л/год; неперервність роботи (до регенерації) при визначеній продуктивності не менше 30 год, а термін служби не менше одного року; профілактика відбувається методом регенерації; корозійностійкі.



Рис. 27 – Загальний вигляд ППМ на основі карбіду титану та ШХ15

Для оксидування ППМ використовуються розчини солей (NaCl , NaClO_3 , NaI , NaNO_3), розчини кислот (HCl , фосфорної, лимонної, винної та адипінової). Найбільш поширені та прості електроліти на основі розчину KOH . Для досліджень вибрали електроліти на основі розчину KOH та рідкого скла.

На рис. 28 представлено пористий проникний матеріал з порошку сталі ШХ15 після нанесення електрометалізаційного покриття (а) та ПЕО покриття (б).



Рис. 28 – ППМ з порошку сталі ШХ15 після нанесення електрометалізаційного (а) та ПЕО покриття (б)

Синтез ОКП на цирконієвому сплаві (рис.29) в електроліті 10 г/л KOH та 15 г/л рідкого скла та співвідношення $I_a/I_c=20/20$ забезпечує формування покритву вже рожевого кольору досить високої мікротвердості (16 ГПа).

Таке підвищення концентрації луку та рідкого скла в електроліті (I_a/I_c становило $20/20 \text{ A/дм}^2$) призвело до деякого пониження мікротвердості оксидокерамічного покритву на титановому сплаві, що становить 9 ГПа. Такий покритв є шорстким, а більшої гладкості можна досягти в електроліті 15 г/л KOH та 5 г/л рідкого скла та за іншого співвідношення струмів $10/15 \text{ A/дм}^2$ (табл. 3).

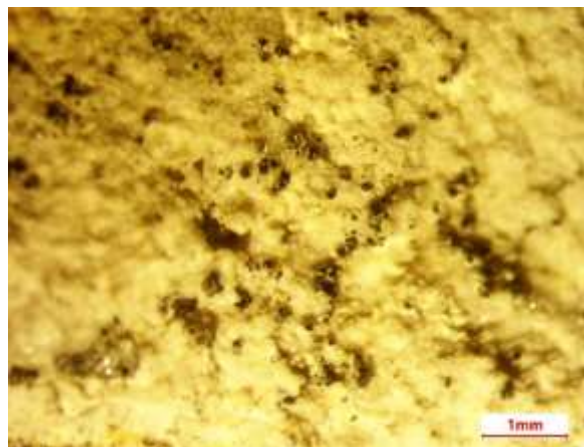


Рис. 29 – Оксидокерамічний покритв, синтезований в електроліті 10 г/л KOH + 15 г/л рідкого скла на ППМ

Таблиця 3 - Режими обробки покривів на цирконієвому сплаві

№	склад електроліту, г/л			I _a /I _c , А/дм ²	τ, хв	H _μ , ГПа	t, мкм
	КОН	Рідке скло	CrO ₃				
цирконієвий сплав							
1	5	5	—	14/20	30	13	70 – 100
2	10	15	—	20/20	40	15,5	70– 130
3	10	15	0,1	20/20	30	10	60– 160
4	3	2	—	20/20	30	14	20 – 50

Введення в електроліт оксиду хрому 0,1 г/л CrO₃ дає можливість синтезувати покрив на цирконієвому сплаві більшої товщини (90...160 мкм), однак мікротвердість такого покриву понижується до 10 ГПа.

Покриви, синтезовані методом плазмоелектролітного оксидування, мають низьку пористість. Це пояснюється тим, що покрив синтезується за високих температур, внаслідок чого пори оплавлюються. Тому для збільшення пористості ми синтезування проводили при нижчих температурах.

На рис.30 зображені фрактографії синтезованого цирконієвого сплаву на поверхні ППМ.

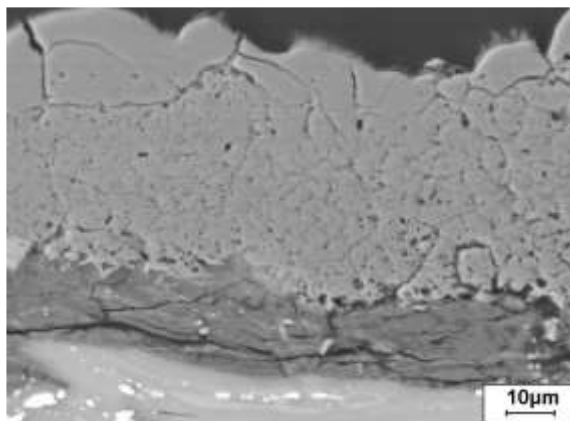


Рис. 30 - Фрактографія синтезованого цирконієвого сплаву на поверхні ППМ

Можливість створення на поверхні цирконієвих сплавів оксидного шару (рис.31) дозволяє суттєво підвищити їх експлуатаційні характеристики. Створення ОКП через оксидування, в процесі якого між деталлю та електролітом виникають електричні дуги малої протяжності, забезпечує зростання мікротвердості і, як наслідок, підвищується його зносотривкість та корозійну стійкість.

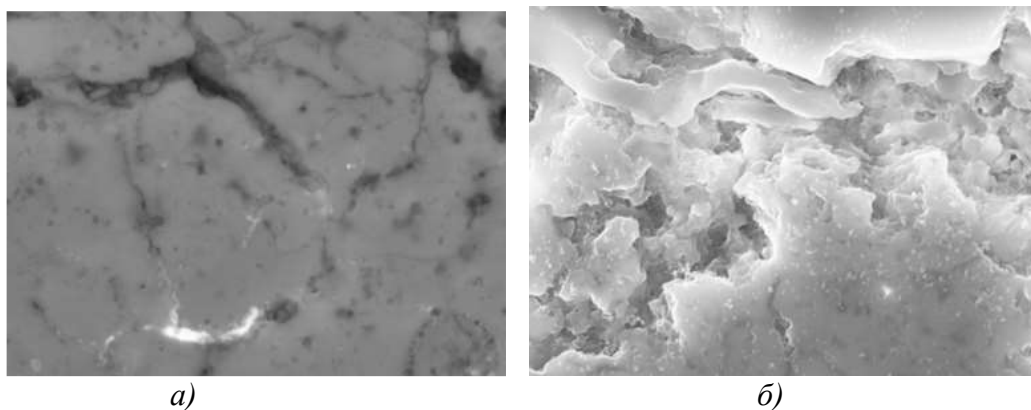


Рис. 31 – Оксидокерамічний покрив на цирконієвому сплаві: злам сплаву з покривом (а) ($\times 100$); оксидокерамічний покрив (б) ($\times 1000$)

Мікроструктура плазмоелектролітно-оксидованих покриттів ППМ має вигляд однорідної пористості (рис.32). Після травлення спостерігаємо більш чітку межу розподілу напиленого електрометалізаційного покриття і покриття, яке виникає в результаті плазмоелектролітного оксидування.

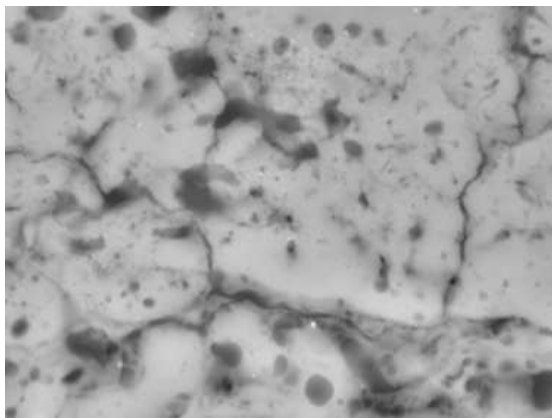


Рис. 32 – Шліф цирконієвого сплаву на ППМ з покривом ($\times 500$)

У п'ятому розділі проведені комплексні дослідження властивостей пористих проникних матеріалів з відходів промислового виробництва.

Для дослідження структурних властивостей ППМ апробовано програмне забезпечення для аналізу 3D зображень – Avizo[®]. Дана методика дозволяє визначити довжину, об'єм пори, а також глибину пороутворення. А оцінка зміни кольору – встановлювати фазовий склад матеріалу ППМ.

Кінцеве завдання металографічного аналізу – статистична обробка отриманих у процесі вимірювання характеристик об'єктів, визначення середніх значень цих величин, а також побудова графічних залежностей для візуалізації процесу аналізу.

Утворення 3D-зображення за допомогою програмного середовища Avizo[®] здійснюється через накладання плоских поперечних розрізів відповідного діапазону по висоті готового пористого проникливого матеріалу (рис.33).

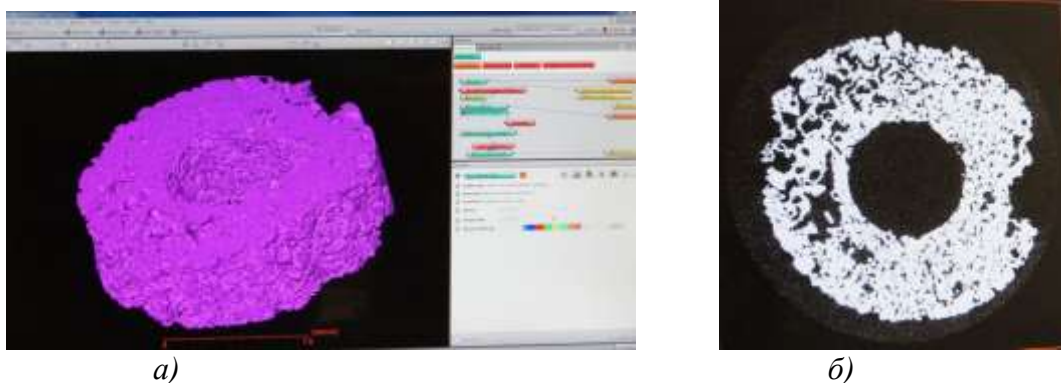


Рис. 33 – Візуалізація отриманого зображення поперечного перерізу пористого порошкового матеріалу: а) 3D-зображення з використанням AVIZO); б) рентгенограма

На рис.34 показані структури ППМ з відходів промислового виробництва отримані методом сухого радіально-ізостатичного пресування. Із даного зображення видно пористість ППМ та мікропористість частинок.

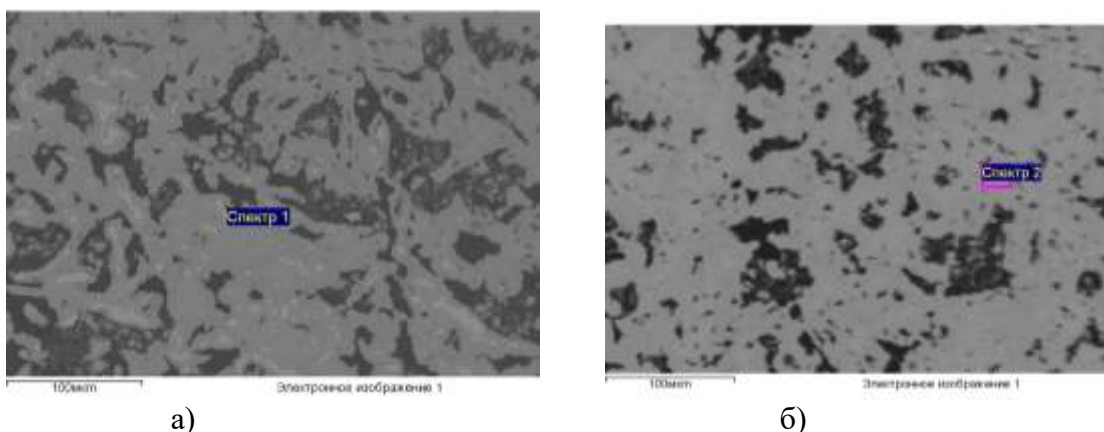


Рис. 34 – Мікроструктура ППМ з відходів промислового виробництва:
а) розмір частинок вихідного порошку – 0,1 мм; б) розмір частинок вихідного порошку – 0,063 мм

Комбінація структурних складових (площинні та просторові) для ППМ з відходів промислового виробництва представлені на рис.35.

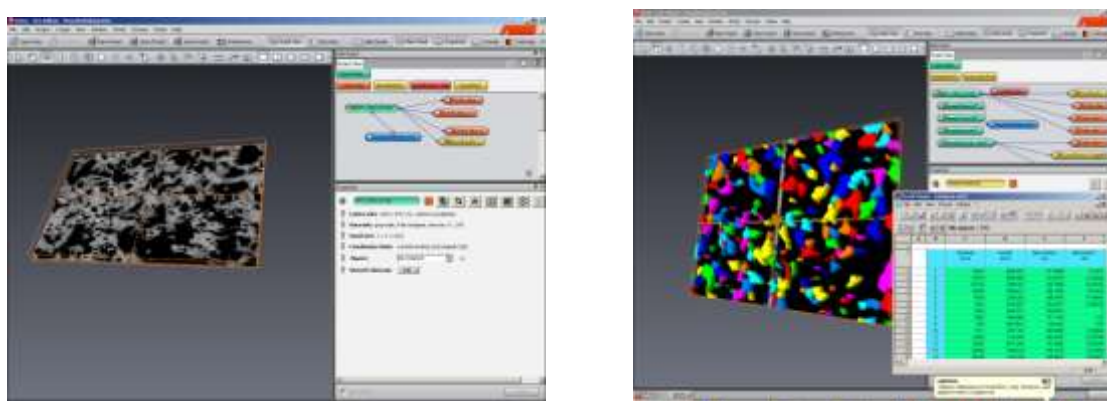
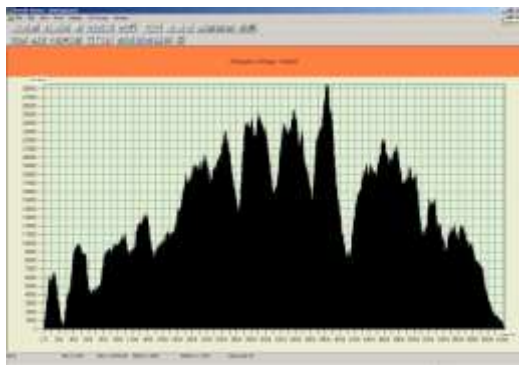
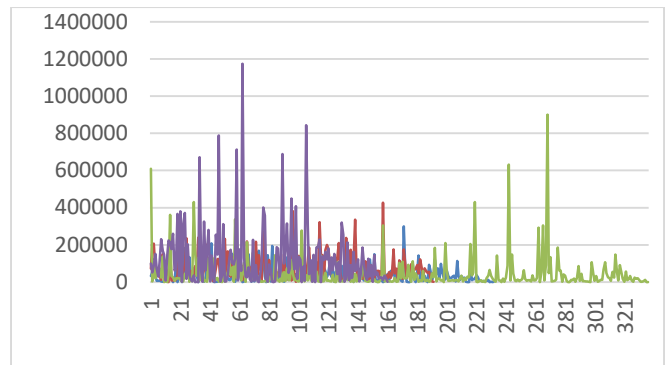


Рис. 35 – Визначення та аналіз структурних складових (пористість, максимальний та мінімальний діаметр пор, максимальні та мінімальні розміри частинок) ППМ у форматі 3D-зображення (ППМ з розміром частинок вихідного порошку – 0,1 мм)

Отримані інтегральні характеристики та порозподілення представлені на рис.36.



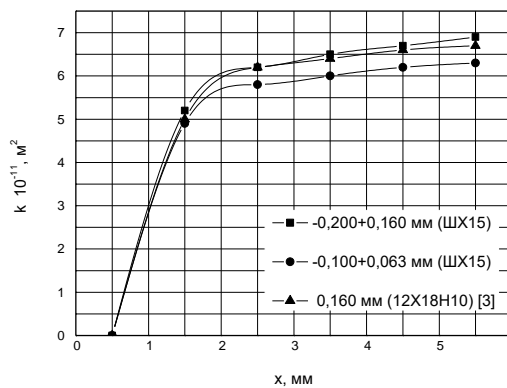
a)



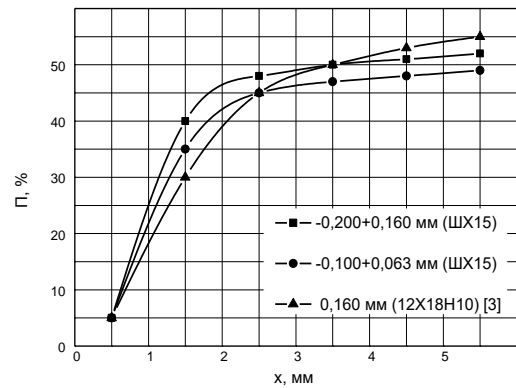
б)

Рис. 36 – Розподіл зміни пористості (а) та побудова лінійної гістограми пористості (б) за січенням ППМ (розмір частинок вихідного порошку – 0,063 мм)

На рис.37 наведені результати експериментальних досліджень по визначенню проникливості та пористості ППМ.



a)



б)

Рис. 37 – Розподіли коефіцієнту проникливості (а) та пористості по січенню фільтру (б)

Для перевірки правильності отриманих значень проникності проведено моделювання процесу проходження рідини через ППМ при різних тисках та пористості (рис. 38, 39).

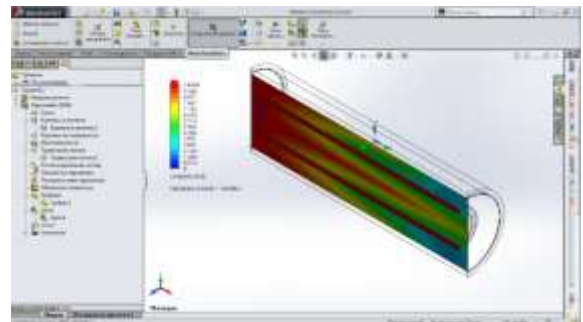
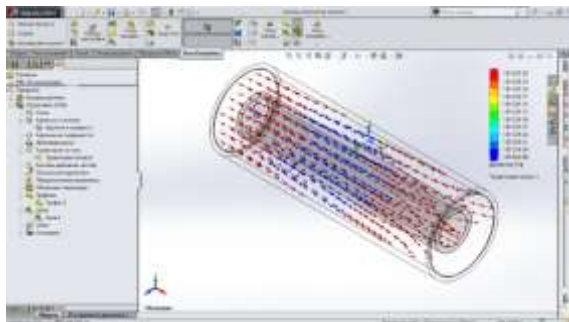


Рис. 38 – Моделювання процесу проходження рідини через ППМ ($\Pi=0,3$) при різних тисках

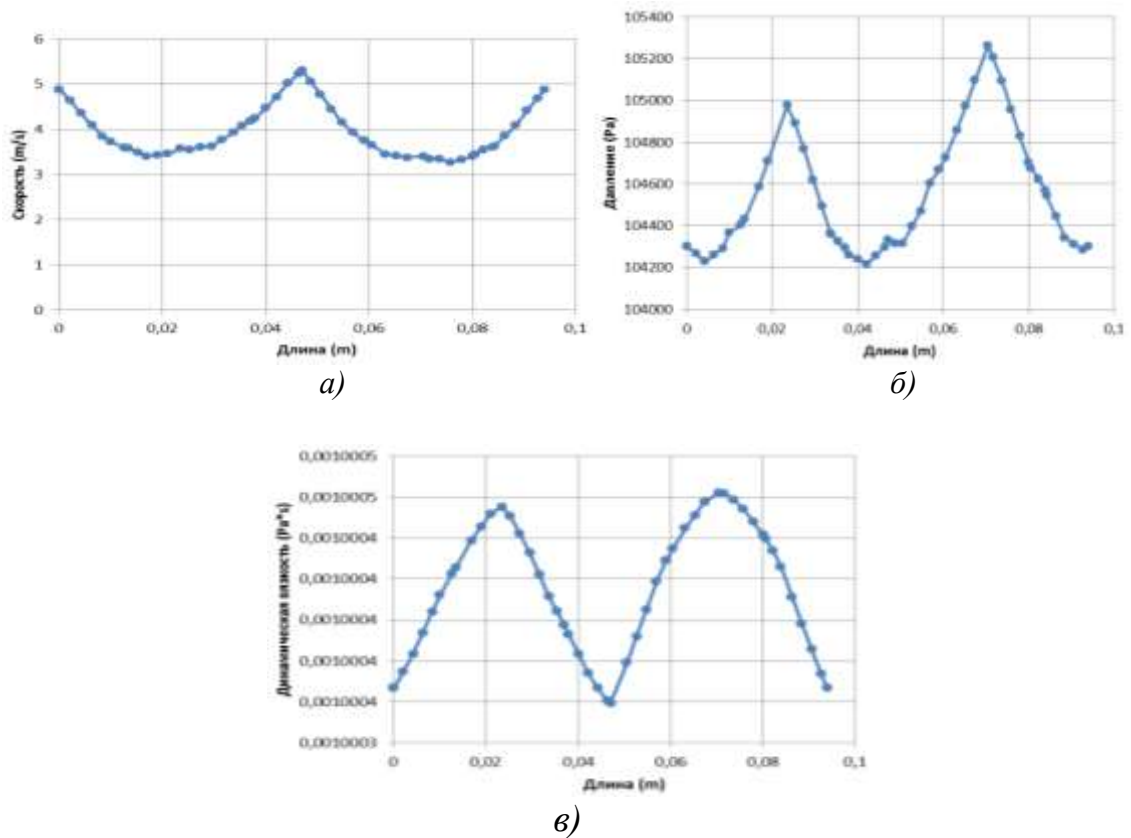


Рис. 39 – Графічні залежності швидкості (а), тиску (б) та динамічної в'язкості (в) рідини від довжини при проходженні через ППМ ($\Pi=0,3$)

Залежність максимального коефіцієнта проникності від допустимого рівня міцності наведено на рис.40.

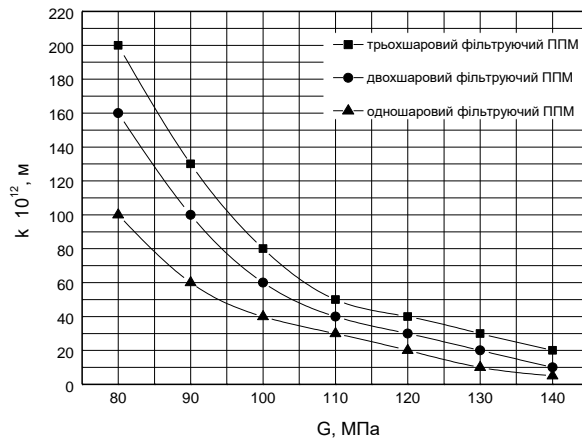


Рис. 40 - Експериментальні залежності максимального коефіцієнта проникливості від допустимого значення міцності фільтруючих ППМ з порошку ШХ15

Механічна міцність тришарового фільтрувального ППМ найвища за рахунок перетікання менших частинок порошку у більші пори, що робить фільтр міцнішим після спікання.

Для перевірки правильності проведених експериментальних досліджень проведено моделювання прикладання напруження (за Мізесом) на ППМ за допомогою пакету Abaqus (рис. 41).

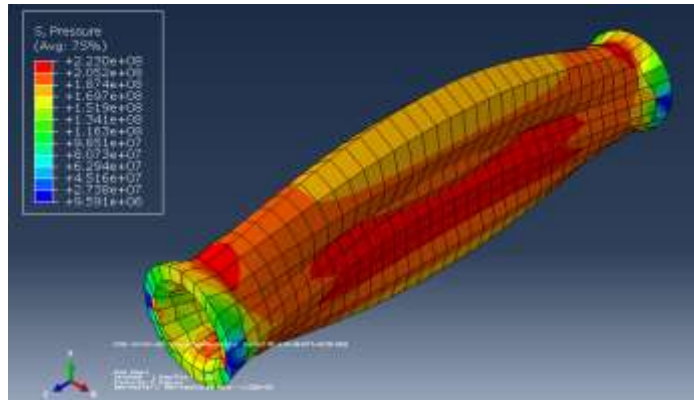


Рис. 41 – Розподіл деформацій під дією заданого тиску (ззовні)

На рис.42 показано розподіл прикладеного напруження по довжині ППМ.

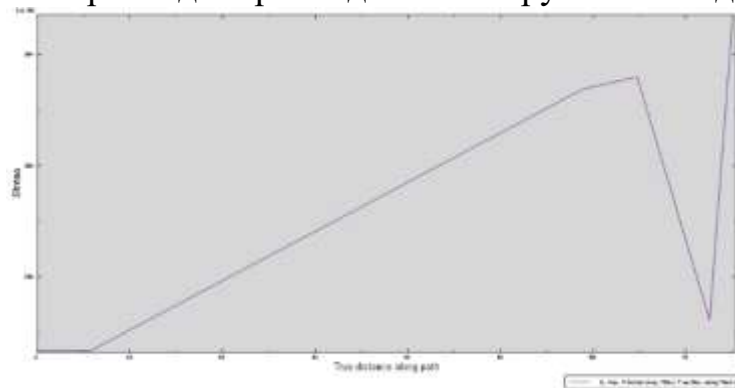


Рис. 42 – Графічна залежність напруження від часу при моделюванні

Проведено моделювання процесу проходження рідини через ППМ при різних тисках та пористості в діапазоні $P=10-50\%$. Результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними та підтверджуються реальними розрахунками.

Під час експлуатації анодованих сплавів у корозійному середовищі на окремих ділянках покриття у ППМ формуються вузькі канали з підвищеною іонною провідністю. Такі ділянки стають осередками локальних корозійних пошкоджень ППМ. Активні аніони в цих місцях проникають через анодну плівку і взаємодіють зі сплавом.

Дослідження покриттів ППМ, режимами яких приведено в таблиці 4, встановили, що струми корозії ОКП для всіх досліджуваних систем понижуються на 3 порядки. Покриття, синтезовані в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. має значення струму корозії $9,09 \cdot 10^{-4} \text{ A/m}^2$. Однак підвищення співвідношення густини струмів катодного до анодного понизило швидкість корозії покриття ще в п'ять разів.

На рис.43 зображено покриття ППМ після корозії в агресивних середовищах за анодної поляризації. ППМ в агресивних середовищах зазнає корозію та фотографію ОКП після корозії в високо агресивному середовищі 10% NaCl.

У розчині соляної кислоти загальний вигляд покриття не змінюється, а більш детально дослідити його властивості можна за допомогою поляризаційних кривих.

Таблиця 4 – Потенціал та струм корозії ППМ та покриття на ньому за різних режимів оксидування

№	корозійне середовище	склад електроліту, г/л				I_a/I_c А/дм ²	τ , хв	U_{cor} , В	i_{cor} , А/м ²
		КОН	р.с.	CrO ₃	H ₂ O ₂				
1	10%NaCl	—	—	—	—	—	0,48	0,82	
2		10	15	—	—	20/20	20	$9,09 \cdot 10^{-4}$	
3		10	15	—	—	20/30	40	$1,63 \cdot 10^{-4}$	
4		10	15	0,1	—	20/30	40	$6,20 \cdot 10^{-4}$	
1	10%HCl	—	—	—	—	—	0,37	$8,07 \cdot 10^{-2}$	
2		10	15	—	10	20/20	30	$0,21 \cdot 10^{-4}$	
3		10	15	—	—	20/20	30	$1,39 \cdot 10^{-4}$	
4		3	2	—	—	20/20	20	$12,07 \cdot 10^{-4}$	

Кращу корозійну тривкість мають покриття, синтезовані в електролітах більшої концентрації. Ведення в електроліт перекису водню підвищує опір корозії, а оксиду хрому набагато його знижує. Найбільшої корозійної тривкості можна досягти, синтезувавши покриття в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л рідкого скла за більших густин струмів.

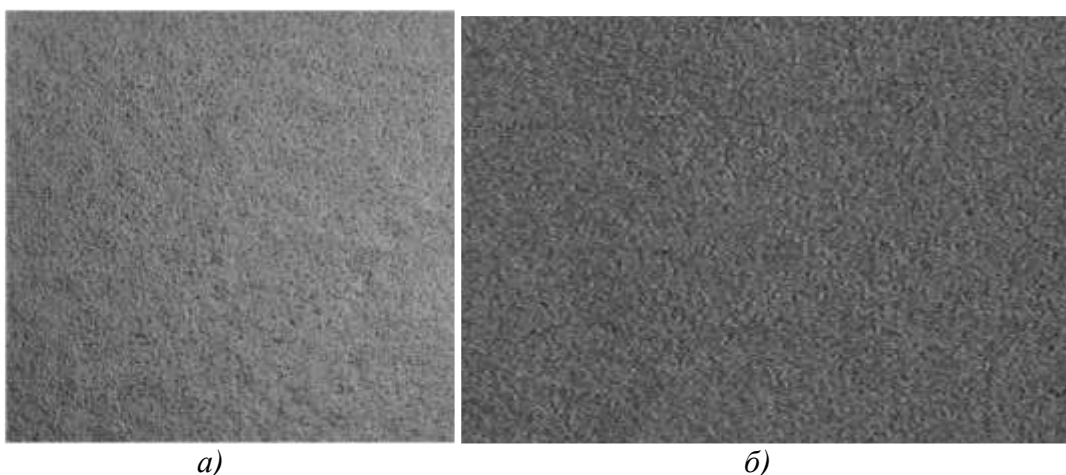


Рис. 43 – Загальний вигляд оксидокерамічного покриття на ППМ після корозії в середовищах: а – 10%NaCl; б – 10%HCl.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічну проблему розробки, отримання та застосування багатошарових пористих проникних матеріалів з відходів промислового виробництва з керованими функціональними та технологічними характеристиками шляхом прогнозування складу, структури, властивостей за допомогою комп'ютерно-інформаційних технологій. Розроблено і виготовлено ППМ з відходів промислового виробництва придатні для очищення технічних рідин та газів, що підвищило ефективність використання виробів у різних галузях машинобудування.

1. Проведене комплексне дослідження та аналіз закономірностей формування структури пористих проникних матеріалів. Встановлено та обґрунтовано механізми створення багатопорових ППМ з прогнозованою пористістю з керованими експлуатаційними властивостями за рахунок розробки та розв'язання завдань засипання, формування порошкових матеріалів, а також пресування, спікання та нанесення корозійностійкого покриття.

2. **Вперше** була розроблена методологія розрахунку моделі випадкових пор у ППМ на стадії засипання матеріалу у бункер з урахуванням фізичної основи складових компонентів для двомірного випадку на базі моделей випадкової узагальненої упаковки. Доведено, що засипку у бункер порошку можна прогнозувати через властивість вихідного матеріалу та визначити через інтегральну характеристику порошкового матеріалу, зокрема діелектричну.

3. На основі запропонованих розрахунків ілюмінаційної моделі зображення пористої поверхні ППМ, а також методики оцінки параметрів пори, апробовано програмне забезпечення для аналізу 3D зображень – Avizo[®]. Дана методика дозволяє визначити довжину, об'єм пори, а також глибину пороутворення, а оцінка зміни кольору – встановлювати фазовий склад матеріалу ППМ.

4. **Вперше** розроблено та запропоновано модель пластичного деформування порошково-пористих середовищ, яка, на відміну від наявних, враховує неоднорідність розподілу густини по радіусі при радіально-ізостатичному пресуванні. Пористість змінюється при зміні радіусу циліндричної заготовки ППМ (пустотілого циліндру), який виготовлений методом радіально-ізостатичного пресування на 25% від початкового значення.

5. **Вперше** розроблені нові методи комп'ютерного моделювання, а саме:

- моделювання пористих проникних матеріалів для зазначеної моделі пластичного деформування порошково-пористих середовищ. На відміну від наявних, запропонований метод дозволяє враховувати особливості розподілу пористості та радіальної швидкості при радіально-ізостатичному пресуванні. Розроблений метод комп'ютерного моделювання дає можливість не тільки визначити розподіл пористості й інших характеристик порошкового пористого тіла, але й спрогнозувати вплив їх на експлуатаційні властивості ППМ;
- імітаційне моделювання нанесення захисних покриттів на деталі конструкційного призначення. За допомогою даного програмного забезпечення можна прогнозувати товщину шару та час нанесення напилення.

6. **Вперше** проведено моделювання процесу радіально-ізостатичного пресування ППМ:

- складної форми у вигляді колби, отриманого з порошку сталі ШХ15. Встановлено, що розподіл величин пористості і накопиченої пластичної деформації за об'ємом виробу нерівномірно і залежить від схеми ущільнення. При радіальному пресуванні більш інтенсивно ущільнюється матеріал стінки, а при осьовому пресуванні – матеріал дна фільтра. Застосування схеми пресування, при якій порошок спочатку ущільнюють в радіальному, а потім в осьовому напрямку, дозволяє отримати більш рівномірний розподіл властивостей.

— у двошаровому та тришаровому фільтрах. Встановлено, що при ущільненні більш щільний внутрішній шар деформується незначно та виконує роль оправки. Подальше збільшення навантаження призводить до того, що настає момент, коли зовнішній шар ущільнився і обидва шари продовжують деформуватися одночасно. Доведено, що товщиною і пористістю шарів ППМ можна управляти за рахунок зміни початкової пористості засипаного порошку, внутрішнього діаметра еластичного елемента, а також тиску пресування.

7. **Вперше** була розроблена нова методика для нанесення комбінованих покриттів для деталей конструкційного призначення з відходів промислового виробництва та застосована для пористих проникних матеріалів для підвищення корозійно- та зносостійкості. Порівняльні дані по корозійності показали, що застосування двошарових та тришарових фільтрувальних матеріалів на основі порошку ШХ15 для очищення малоагресивних середовищ дало змогу за рахунок їх покращених властивостей збільшення тривалості експлуатації фільтруючого матеріалу в 1,5–2,0 рази.

8. **Основні результати** роботи впроваджено у виробництва на Луцькому МПД ДП «Укрспирт» (м. Луцьк) та ТОВ «ВОГ ТРЕЙД» (м.Київ) для очищення технічних рідин та палива від механічних забруднень.

На виробничій базі компанії компанії Ningbo FUTEC Co., Ltd (м.Нінбо, КНР) була виготовлена дослідна партія багатошарових пористих проникних матеріалів. Ефективність нового фільтрувального ППМ порівняно з аналогічними традиційними ППМ склала 82%.

На основі результатів дослідження в Інституті нових матеріалів Guangdong Juhang Institute For Advancer Material Co., LTD (провінція Гуандун, КНР) впроваджено партію тришарових ППМ для очищення технічних рідин від механічного забруднювача. Дані ППМ мають коефіцієнт проникності в 3, а ресурс і брудоемкість в 1,5 рази вищу у порівнянні з відомими ППМ

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ОСНОВНИХ ПРАЦЬ

Монографії:

1. Рудь В. Д., *Повстяной О. Ю.*, Заболотний О. В., Богінський Л. С. Технології, структура, властивості пористих проникних матеріалів: монографія. Луцьк, 2016. 200 с.

Здобувач розробив технологію та дослідив властивості пористих проникних матеріалів з відходів промислового виробництва.

2. *Повстяной О. Ю.*, Рудь В. Д., Імбірович Н. Ю. Комп'ютерно-інформаційні технології в сучасному матеріалознавстві: монографія. Луцьк, 2019. 225 с.

Здобувач проаналізував основні методи визначення структурних характеристик пористих матеріалів.

Статті:

3. Properties of Ceramic Oxide Coatings on Magnesium and Titanium Alloys Synthesized in Electrolytic Plasma / N. Yu. Imbirovich, M. D. Klapkiv, V. M. Posuvailo, *O. Yu. Povstyanoi* // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* (Сполучені Штати Америки, режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9678-7>). 2015. V.54. P.47-52.

Дисертантом було розроблено методику експериментальних досліджень нанесення оксидокерамічних покриттів на магнієвих та титанових сплавах.

4. Metallographic Analysis and Microstructural Image Processing of Nozzles for Sandblasting Produced by Powder Metallurgy Methods / **Povstyanoi O.**, Sychuk V., McMillan A., Rud V., Zabolotnyi O. // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* (Сполучені Штати Америки, режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9705-8>), 2015. V.54. P. 234-240.

Здобувачем запропоновано та вдосконалено методику проведення металографічного аналізу з обробкою зображень за допомогою прикладних програм.

5. Production of Porous Materials with the Use of Energy-Saving Technologies / **O. Yu. Povstyanoi**, V. D. Rud, L. M. Samchuk, N. T. Zubovets'ka // *Materials Science* (Сполучені Штати Америки, режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9912-6>). 2016. V.51. P.847-853.

Здобувачем була розроблена технологія виготовлення поруватих проникних матеріалів з відходів промислового виробництва.

6. Computer-informative software for research of the new materials of constructional application / Yu. Kuts, **O. Povstyanoy** // *Functional Material* (Україна, режим доступу: <https://doi.org/10.15407/fm24.01.175>). 2017. V.24 (1). P. 175-178.

Здобувачем запропоновано новий підхід комп'ютерно-інформаційного забезпечення для дослідження властивостей деталей конструкторного призначення.

7. Features of Radial Density Distribution During Radial Isostatic Compacting of Powders / **Povstyanoi, O.**, Rud V. // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* (Сполучені Штати Америки, режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9911-7>), 2017. V.56. P.416-423.

Автором теоретично обґрунтовано та запропоновано узагальнену модель розподілу густини порошкових середовищ за радіусом пористого тіла (циліндра) під дією зовнішнього радіального навантаження.

8. Оптимізація властивостей багатошарових поруватих проникних матеріалів / **Повстяной О. Ю.**, Рудь В. Д., Імбірович Н. Ю., Гальчук Т. Н., Четвержук Т. І., Смаль М. В., Дзюбинський А. В. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2020. Том 56. №4. С. 88-92

Здобувачем розроблена математична модель процесу отримання багатошарових фільтруючих ППМ зі змінною пористістю методом сухого радіально-ізостатичного пресування порошку ШХ15 з пороутворювачем та проведено аналіз і розрахунок розподілу густини за радіусом пустотилого ППМ.

9. Эколого-экономическая эффективность использования отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения / **Повстяной А. Ю.**, Рудь В. Д. // «Устойчивое развитие». (Болгарія). 2014. №19. С. 89-94.

Особистий внесок дисертанта – розрахунок економічної ефективності використання відходів промислового виробництва (порошку сталі ШХ15) для виготовлення фільтрів.

10. Review of the current software for computer based research in the processing of metallographic images / **Povstyanoy O. Yu**, Kuts Yu. V. // *Canadian scientific journal. (Canada)*. 2014. Issue 2. P. 54-63.

Дисертантом проведений детальний огляд сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних металографічних досліджень.

11. Морфологічний опис, аналіз та обробка зображень мікроструктури сопел для піскоструменевої обробки, які виготовлені методами порошкової металургії / Повстяной О.Ю., Сичук В.А., Рудь В.Д., Заболотний О.В. // *Наукові нотатки*, 2013. Випуск 41(1). С.203-210.

Дисертантом проведено морфологічний опис структури порошкових сопел для піскоструменевої обробки, які виготовлені методами порошкової металургії.

12. Застосування CALS-технології для комплексного виготовлення корпусів водолічильників з використанням програмного комплексу DELCAM / **Повстяной О. Ю.** *Вісник національного університету «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні»*, 2013. №772. С. 148-153.

Автором було застосовано програмний продукт DELCAM для комп'ютерного моделювання корпусів водолічильників.

13. Methodological principles of simulation modelling and prediction of the properties of powder materials / **Povstyanoy O.** *Scientific journal "Computer-integrated technologies: education, science, production"*, 2013. №11, P.229-232.

Автором було запропоновано методологічні принципи імітаційного моделювання та прогнозування властивостей порошкових матеріалів

14. Аналіз сучасних методів визначення структури та топології поверхонь матеріалів / **Повстяной О. Ю.**, Рудь В. Д., Мельник Ю. А., Імбірович Н. Ю. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2014. №2. С. 37-42.

Особистий внесок дисертанта – дано характеристику сучасних програмних продуктів для визначення структурних характеристик ППМ та наведено сфери використання цих методів.

15. Сучасні методи дослідження мікроструктур за допомогою комп'ютерного матеріалознавства з використанням прикладних програм / Куц Ю. В., **Повстяной О. Ю.** *Наукові нотатки*. 2014. Випуск 45. С. 323-329.

Здобувачем показано переваги та недоліки відповідних програмних продуктів для дослідження структур пористих матеріалів.

16. Застосування комп'ютерного моделювання для візуалізації трьохмірних даних при дослідженні властивостей пористих проникливих матеріалів / **Повстяной О. Ю.**, Куц Ю. В., Імбірович Н. Ю. *Наукові нотатки*. 2015. Випуск 50. С. 159-165.

Дисертантом розроблена методика дослідження властивостей ППМ засобами комп'ютерного моделювання.

17. Обґрунтування вибору методу нанесення захисного покриття на деталях конструкційного призначення з порошків, які отримані з відходів промислового виробництва / Куц Ю. В., **Повстяной О. Ю.**, Імбірович Н. Ю. // *Наукові нотатки*. 2016. Випуск 54. С. 172-179.

Дисертантом приведена мета, цілі для нанесення корозійностійкого покриття та перспективи їх застосування на втулках.

18. Peculiarities of protective coating of constructional details with powder obtained from industrial wastes / **Oleksandr Povstyanoy**, Nataliia Imbirovuch, Yuliia Kuts / *Metallurgical and mining industry*. 2016. №4. P. 88-96.

Особистий внесок дисертанта – визначення особливостей та закономірностей нанесення захисного покриття на виробах конструкційного призначення.

19. Комп'ютерно-інформаційні технології прогнозування та моделювання властивостей матеріалів конструкційного призначення / **Повстяной О. Ю.** *Вісник Українського матеріалознавчого товариства*. 2018. №8. С. 9-18.

Автором представлені основні науково-технічні засади використання комп'ютерно-інформаційних технологій для прогнозування фільтрувальних властивостей ППМ.

20. Модельні дослідження формування засипки порошків з урахуванням властивості матеріалу на базі моделей випадкової упаковки (двовірний випадок) / **Повстяной О. Ю.**, Дороговцев А. А. *Наукові нотатки*. 2018. Випуск 63. С. 183-188.

Дисертанту належать основні теоретичні передумови та розрахунок для модельних досліджень щодо формування засипки порошків для двовірного випадку.

21. Моделювання ущільнення порошкового фільтруючого елемента складної форми при радіально-ізостатичному пресуванні / **Повстяной О. Ю.**, Михайлов А. О., Рудь В. Д., Михайлов О. В. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2019. №3. С. 40 – 44.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання ущільнення порошкового фільтруючого елемента складної форми при радіально-ізостатичному пресуванні з використанням методу скінченних елементів.

22. Трибологічна характеристика плазмоелектролітно-оксидованих покриттів на сплавах ASTM B265 та 2024 / Імбірович Н. Ю., Посувайло В. М., Шимчук С. П., **Повстяной О. Ю.**, Остап'юк С. І. *Вісник Українського матеріалознавчого товариства*. 2019. №1 (12). С. 66-74.

Особистий внесок дисертанта – формулювання мети та завдань, а також основних положень щодо визначення трибологічних характеристик захисних покриттів.

Матеріали конференцій:

23. **Повстяной А. Ю.**, Рудь В. Д. Применения имитационного моделирования для решения задач формирования структуры порошковых изделий. *Порошковая металлургия: современное состояние и будущее: тезисы конференции* (Киев, 22-25 апреля 2014г.). Киев, 2014. С. 88 (очна участь).

Дисертантом були сформульовані основні задачі для формування структури ППМ зі застосуванням сучасних методів комп'ютерного моделювання.

24. **Повстяной О. Ю.**, Полінкевич Р.М Застосування інформаційних технологій для проектування функціональних елементів технологічних комплексів з використанням пакету програм DELCAM *Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів: збірник наукових праць III-ої Міжнародної науково-технічної конференції ТК-2014* (Луцьк-Світязь, 28-30 травня 2014 року). Луцьк-Світязь, 2014. С. 54-56 (очна участь).

Дисертантом розроблено методика проектування основних елементів технологічних комплексів з використанням пакету програм DELCAM.

25. **Повстяной А. Ю.**, Рудь В. Д., Шиберко В. В. Теоретические и практические предпосылки применения компьютерного моделирования для решения задач формирования порошковых материалов. *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия композиционные материалы, защитные покрытия, сварка*: материалы 11-й Международной научно-технической конференции (Минск, 28-30 мая 2014г.). Минск, 2014. С. 136-137 (заочна участь).

Особистий внесок здобувача – практичне застосування комп'ютерного моделювання при вирішенні задач формування структури ППМ.

26. Рудь В. Д., Шиберко В. В., **Повстяной А. Ю.** Особенности заполнения пресс-формы частицами неизометрической формы. *Новые технологии и материалы, автоматизация производства*: материалы Международной научно-технической конференции (Брест, 29-30 октября 2014 года). Брест, 2014. С. 97-99 (заочна участь).

Особистий внесок дисертанта – проведено комп'ютерне моделювання заповнення порошком несферичної форми певного (визначеного) об'єму.

27. Имбирович Н. Ю., Клапкив М. Д., **Повстяной А. Ю.** Плазмоэлектродное оксидирование как поверхностная защита втулок. *Порошковая металлургия: Современное состояние и будущее*: тезисы конференции (Киев, 22 – 25 апреля 2014г.). Киев, 2014. С. 57 (очна участь).

Особистий внесок здобувача – проведення лабораторних досліджень оксидування на поверхнях втулок з відходів промислового виробництва.

28. Рудь В. Д., Шиберко В. В., **Повстяной О. Ю.** Аналіз порошкових матеріалів за допомогою програмного комплексу ABAQUS. *Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці та освіті*: матеріали XIII міжнародного наукового семінару / наук. ред. д.е.н., проф. М. М. Єрмошенко. Київ, 2014. С.77-81 (очна участь).

Здобувач проаналізував та зробив відповідні висновки аналізу порошкових матеріалів у ABAQUS.

29. Имбирович Н. Ю., Клапкив М. Д., **Повстяной О. Ю.** Конверсионная оксидокерамика как эффективный способ защиты имплантов. *Global scientific unity 2014: материалы Международного конгресса* (Прага, 26-27 сентября 2014 года). Прага, 2014. С. 36-37 (заочна участь).

Особистий внесок дисертанта – аналіз сучасних способів та методів захисту імплантів.

30. Optimization of processes grinding of metal powders [Електронний ресурс] : (Meeting and Exhibit will be held in Warsaw University of Technology «The 2015 E-MRS Fall») / **Povstyanoy Oleksandr**, Rud Viktor, Gal'chuk Tetyana // Режим доступу: http://www.emrs-strasbourg.com/index.php?option=com_abstract&task=view&id=333&day=2015-0918&year=2015&Itemid=&id_season=14 (заочна участь).

Здобувачем проведений кількісний та якісний аналіз сучасних методів подрібнення порошків сталі ШХ15.

31. В.В. Шиберко, В.Д. Рудь, **А.Ю. Повстяной** Прогнозирование структурных характеристик порошковых материалов с помощью 3D моделирования. Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные

матеріали, сварка. Сборник докладов 9-го Международного симпозиума, Минск, 8-10 апреля 2015 г., С.231-238_(заочна участь).

Дисертант провів аналіз структурних характеристик порошкових матеріалів та розробив рекомендації щодо їх використання.

32. **Повстяной О. Ю.**, Рудь В. Д. Застосування комп'ютерно-інформаційних технологій в сучасному матеріалознавстві. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах*: матеріали V Міжнародної наукової конференції (Київ, 3-5 грудня 2015 року). Київ, 2015. С. 273-277 (очна участь).

Дисертантом показана можливість використання комп'ютерно-інформаційних технологій при вивченні структурних характеристик ППМ.

33. The applied ancient methodology of work is with energy. when burns actively power clears space and disinfects air [Електронний ресурс] : (*Advanced technologies of composite production «2016 E-MRS Fall»*) / **Povstyanoy Oleksandr** // Режим доступу: <http://www.european-mrs.com/advanced-composite-materials-production-testing-applications-emrs> (заочна участь).

Автором застосовано методологію очищення повітря ППМ з відходів промислового виробництва.

34. **Повстяной О.Ю.** Кузьмов А. В. Моделювання пористої структури в багатошарових фільтруючих порошкових матеріалах *III International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions" "WORLD SCIENCE" (UAE)*. Dubai, 2016. №10 (14). Vol.1. P. 5-9 (заочна участь).

Здобувачем розроблений метод комп'ютерного моделювання, дозволяє не тільки визначити розподіл пористості та інших характеристик порошкового проникного матеріалу.

35. Theoretical and practical background of computer modelling implementation for solving of problems of powder materials forming [Електронний ресурс] : (The 2018 E-MRS Fall Meeting) / **Povstyan Oleksandr**, Andriy Kuz'mov // Режим доступу: <https://www.european-mrs.com/multifunctional-advanced-composite-materials-idea-market-emrs#collapse70> (заочна участь).

Здобувачем було проведено комп'ютерне моделювання формування структури ППМ.

36. **Повстяной О. Ю.** Прогнозування закономірностей формування структури та властивостей пористих порошкових матеріалів *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції (Чернігів, 10-12 травня 2018 року). Чернігів, 2018. С. 18-20 (очна участь).

Автором розроблені теоретичні аспекти прогнозування формування структури ППМ та практичне дослідження їх властивостей.

37. **Повстяной О. Ю.**, Сичук В. А., Полінкевич Р. М., Четвержук Т.І. Визначення та розрахунок напружень пористого проникного матеріалу з використанням програмного забезпечення CAE. *Прогресивні Технології у машинобудуванні - РМТЕ 2019*: матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 4-8 лютого 2019 року). Івано-Франківськ – Яремче, 2019. С. 111-113 (очна участь).

Дисертантом проведено розрахунок напружень ППМ у пакеті прикладних програм SolidWorks методом скінченних елементів.

38. **Повстяной О. Ю.**, Сомов Д. О. Розробка та використання нової сучасної системи автоматизації для виготовлення проникних матеріалів з відходів машинобудівного виробництва. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту*: матеріали І-ої Міжнародної науково-технічної конференції (Вінниця, 13-15 травня 2019). Вінниця, 2019. С. 201-203 (очна участь).

Здобувачем була розроблена нова система для автоматизації пресування ППМ з відходів машинобудівного виробництва.

39. **Oleksandr Povstyanou**, Oleg Zabolotnyi, Victor Rud' Andriy Kuzmov, Halyna Herasymchuk: Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. 2nd International Conference on Design, Simulation and Manufacturing: The Innovation Exchange DSMIE-2019: book of Abstracts (Lutsk, June 11-14, 2019), P.105 (очна участь).

Дисертантом проведено моделювання процесів створення ППМ та проаналізовано їх властивості.

40. **Oleksandr Povstyanou**, Oleg Zabolotnyi, Andriy Slabkiy, Andriy Dzyubinskyi, Tamara Nikolyuk. Development of new filtering materials for purification of alternative fuels from mechanical impurities. *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes InterPartner-2019*: book of Abstracts (Одеса, 10-13 вересня 2019 р.). Одеса, 2019. С. 82 (очна участь).

Особистий внесок здобувача – розробка технології отримання нових ППМ для очищення різного виду палива від механічних домішок.

41. **Oleksandr Povstyanou**, Victor Rud' Development of new porous permeable materials with predicted properties. *6th International conference*: book of Abstracts (Kyiv, October 28-30, 2019). Kyiv, 2019. P.20 (очна участь).

Дисертант розробив теоретичні передумови для створення ППМ з регульованою пористістю.

42. **Повстяной О. Ю.**, Полінкевич Р. М., Четвержук Т. І, Сичук В. А. Моделювання пористості порошкового проникного матеріалу складної форми методом скінченних елементів. *Прогресивні технології в машинобудуванні*: матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції (Львів-Карпати, 3-7 лютого 2020 р.). Львів-Карпати, 2020. С. 45-47 (очна участь).

Особистий внесок здобувача – визначення пористості порошкового проникного матеріалу складної форми методом скінченних елементів.

43. **Oleksandr Povstyanou**, Anatoliy Mikhailov, Nataliya Imbirovich, Oksana Dziubynska, Halyna Herasymchuk. Simulation of compaction of porous permeable materials of complex shape during radial-isostatic compression. 2nd *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes InterPartner-2020*: book of Abstracts (Одеса, 08-11 вересня 2020 р.). Одеса, 2020. С. 79 (очна участь).

Дисертант провів моделювання пресування ППМ складної форми, які отримані радіально-ізостатичним пресуванням.

Список публікацій здобувача, які додатково відображають наукові результати дисертації:

44. Патент на корисну модель №91287. Реактор для проведення самопоширюючого високотемпературного синтезу (СВС-процесу) / Самчук Л. М., Гулієва Н. М., Рудь В. Д., **Повстяной О. Ю.**, Савюк І. В. Воробей Ю. В., Заїкін М. М. : заявник та правовласник Луцький НТУ; заявл. 11.02.2014; опубл. 25.06.14, Бюл. №12.

45. Патент на корисну модель 100743. Спосіб отримання фільтруючого матеріалу / Рудь В. Д., **Повстяной О. Ю.**, Самчук Л. М., Савюк І. В., Куц Ю. В. : заявник та правовласник Луцький НТУ; МПК (2015.01) B22F 9/00, B01D 39/00, заявл. 16.02.2015; опубл. 10.08.15, Бюл. №15.

46. Патент на корисну модель №105203. Модернізований реактор для проведення самопоширюючого високотемпературного синтезу / Рудь В. Д., Самчук Л. М., **Повстяной О. Ю.**, Колядинський М. І., Савюк І. В., Шиберко В. В., Зубовецька Н.Т. : заявник та правовласник Луцький НТУ; МПК (2016.01) G21B1/00, B22F 3/23 (2016.01) заяв.17.08.2015; опубл.10.03.2016, Бюл.№5.

47. Свідоцтво про реєстрацію авторського права №68843. Комп'ютерна програма «Моделювання пресування одношарових фільтрів (Фільтр 1)» / Повстяной О. Ю., Кузьмов А. В. Куц Ю. В. Дата реєстрації 29.11.2016 р.

48. Свідоцтво про реєстрацію авторського права №68842. Комп'ютерна програма «Моделювання пресування багатошарових фільтрів (Фільтр N)» / **Повстяной О. Ю.**, Кузьмов А.В. Дата реєстрації 29.11.2016 р.

49. Свідоцтво про реєстрацію авторського права №71207. Комп'ютерна програма «Комп'ютерно-імітаційне моделювання для наплення захисних середовищ на деталь / Куц Ю. В., **Повстяной О. Ю.** Дата реєстрації 29.03.2017 р.

АНОТАЦІЯ

Повстяной О.Ю. Багатошарові пористі проникні матеріали з регульованою пористістю з відходів промислового виробництва. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена прогнозуванню, моделюванню закономірностей формування структури та властивостей пористих проникних матеріалів з урахуванням розмірів структурних елементів шихти, встановлення фізичних зв'язків між складовими, будовою та властивостями готового виробу, їх експлуатаційними властивостями.

Розроблено та запропоновано модель пластичного деформування порошково-пористих середовищ, яка, на відміну від існуючих, враховує неоднорідність розподілу густини по радіусі при радіально-ізостатичному пресуванні.

На підставі отриманих розрахункових даних встановлені закономірності зміни характеристик матеріалу при пресуванні багатошарових пористих матеріалів, а саме радіальна швидкість дає можливість керувати розподілом пористості у

багатошарових ППМ та підвищити ступінь перерозподілу за рахунок збільшення накопиченої деформації порошку.

Також встановлено закономірності розподілу густини по радіусу кожного шару ППМ в різний момент часу деформування. Розподіл пористості має нерівномірний характер. Більш інтенсивне ущільнення матеріалу відбувається біля осевого стержня капсули.

Запропоновано модельні дослідження формування засипки порошоків з урахуванням властивості матеріалу на базі моделей узагальненої випадкової упаковки.

Розроблена нова методика для нанесення комбінованих покриттів для деталей конструкційного призначення з відходів промислового виробництва може бути застосована для пористих проникних матеріалів для підвищення корозійно- та зносостійкості.

Результати дисертаційної роботи використані при застосуванні розроблених пористих проникних виробів для очищення технічних, промислових вод, мастил та палива від механічних домішок, забруднень.

Ключові слова: пористий проникний матеріал, пористість, засипка, упаковка, пресування, спікання, проникність, прогнозування, комп'ютерне моделювання, покриття.

АННОТАЦІЯ

Повстяной А.Ю. Многослойные пористые проницаемые материалы с регулируемой пористостью из отходов промышленного производства. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.01 - материаловедение. - Институт проблем материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена прогнозированию, моделированию закономерностей формирования структуры и свойств пористых проницаемых материалов с учетом размеров структурных элементов шихты, установления физических связей между составляющими, строением и свойствами готового изделия, их эксплуатационными свойствами.

Разработан и предложена модель пластического деформирования порошково-пористых сред, которая, в отличие от существующих, учитывает неоднородность распределения плотности по радиусу при радиально-изостатического прессования.

На основании полученных расчетных данных установлены закономерности изменения характеристик материала при прессовании многослойных пористых материалов, а именно радиальная скорость дает возможность управлять распределением пористости в многослойных ППМ и повысить степень перераспределения за счет увеличения накопленной деформации порошка.

Также установлены закономерности распределения плотности по радиусу каждого слоя ППМ в разное момент времени деформирования. Распределение пористости имеет неравномерный характер. Более интенсивное уплотнение материала происходит у осевого стержня капсулы.

Предложено модельные исследования формирования засыпки порошков с учетом свойства материала на базе моделей обобщенной случайной упаковки.

Разработана новая методика для нанесения комбинированных покрытий для деталей конструкционного назначения из отходов промышленного производства может быть применена для пористых проницаемых материалов для повышения коррозионно и износостойкости.

Результаты диссертационной работы использованы при применении разработанных пористых проницаемых изделий для очистки технических, промышленных вод, масел и топлива от механических примесей, загрязнений.

Ключевые слова: пористый проницаемый материал, пористость, засыпка, упаковка, прессование, спекание, проницаемость, прогнозирование, компьютерное моделирование, покрытие.

ABSTRACT

Povstyanoy O.Yu. Multilayer porous permeable materials with adjustable porosity from industrial waste. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the Doctor of Technical Sciences on a specialty 05.02.01 - materials science. - Institute of Problems of Materials Science. I.M. Frantsevich NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to forecasting, modeling patterns of structure formation and properties of porous permeable materials taking into account the size of structural elements of the mixture, establishing physical relationships between components, structure and properties of the finished product, their performance properties.

A model of plastic deformation of powder-porous media has been developed and proposed, which, in contrast to the existing ones, takes into account the inhomogeneity of the density distribution along the radius during radial-isostatic pressing.

Based on the obtained calculation data, the regularities of material characteristics change during pressing of multilayer porous materials are established, namely radial velocity makes it possible to control the porosity distribution in multilayer PPM and increase the degree of redistribution by increasing the accumulated powder deformation.

Regularities of density distribution along the radius of each PPM layer at different time of deformation time are also established.

The distribution of porosity is uneven. More intensive compaction of the material occurs near the axial rod of the capsule. Model researches of formation of filling of powders taking into account properties of material on the basis of models of the generalized casual packing are offered.

The developed new technique for applying combined coatings for structural parts from industrial waste can be applied to porous permeable materials to increase corrosion and wear resistance.

The results of the dissertation are used in the application of the developed porous permeable products for purification of technical, industrial waters, oils and fuels from mechanical impurities, contaminants.

Keywords: porous permeable material, porosity, backfill, packaging, pressing, sintering, permeability, forecasting, computer simulation, coating.

Підписано до друку 30.12.2020. Формат 60×90/16
Ум. друк. арк. 1,9. Обл. – вид. арк. 1,9
Тираж 100 прим. Замовлення № 450

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

