

УДК 620.18: 621.669.15: 621.762

О.Ю. Повстяной

КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Повстяной Олександр Юрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки, Луцький національний технічний університет, 43018, м.Луцьк, вул. Потебні, 56, povstjanoj@ukr.net

Розроблено новий метод комп'ютерного прогнозування структурних та експлуатаційних властивостей матеріалів конструкційного призначення, а саме пористих проникних матеріалів. Розроблений новий метод дозволив не тільки визначити розподіл пористості та інших характеристик порошкового проникного матеріалу, але й встановити взаємозв'язок між технологічними режимами їх отримання і експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: пористий проникний матеріал, упаковка, радіально-ізостатичне пресування, розподіл густини, комп'ютерно-імітаційні моделі.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Актуальність теми досліджень визначається потребою у створенні нових та вдосконаленні існуючих методів отримання пористих порошкових матеріалів (ППМ) шляхом застосування прогресивних технологій пресування порошків. Як свідчить вітчизняний та світовий досвід останніх десятиріч, успіх розв'язання проблем, що при цьому виникають, вимірюється якістю та ступенем прогнозування процесів та явищ, які супроводжують ці технології. Підвищити ефективність традиційних технологій, а також ввести безвідходне виробництво виробів широкого цільового призначення, зберігати енергію, скорочувати трудові затрати та контролювати параметри структури порошкових проникних матеріалів у процесі їх виготовлення можливо за допомогою прогнозування з використанням сучасних засобів моделювання.

Важливе місце також займають модельні експерименти прогнозування залежностей властивостей пористих матеріалів від технологічних параметрів отримання виробів з використанням аналітичних, числових та числово-аналітичних методів за допомогою 3D моделювання.

Розробка та виробництво нових пористих проникних матеріалів є важливим завданням, яке значно вирає від використання засобів автоматизованого інжинірингу. Зі збільшення обчислювальної потужності, багатовимірне комп'ютерне моделювання стає все потужнішим та актуальнішим.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСТАННІХ РОКІВ

Аналіз структурно-неоднорідних матеріалів у різні часи проводили наукові колективи під керівництвом Р.М. Кадушнікова, І.Г. Каменина, А.Г. Косторнова, Ю.Н. Крючкова, В.Д. Рудя, В.В. Скорохода, М.Б. Штерна. Особливість цих робіт полягає в тому, що моделюються структурні характеристики матеріалів, які виготовлені із часток регулярної та нерегулярної форм.

Результати моделювання перевірялися на натурних експериментах при виготовленні пористих матеріалів, які довели високу ефективність прогнозування. Отримані результати якісно відтворюють процес заповнення прес-форми та процес пресування [1–5].

У закордонних літературних джерелах велика частина роботи по прогнозуванню пористих матеріалів у значній мірі зосереджена на моделюванні пори та самої границі геометрії порошинки укомпозиційних матеріалах [6, 7].

Зрештою, використання нових методик прогнозування властивостей ППМ призводить до зменшення часу і вартості експериментальних досліджень, а також до оптимізації мікро- та наноструктур пористого матеріалу. Цих результатів можна досягти завдяки застосуванню багатомасштабного моделювання для прогнозування цілісної поведінки пористих матеріалів від їх мікроструктурних морфологій та складових матеріалів, з яких вони виготовляються [8].

Як свідчить вітчизняний та світовий досвід останніх років, успіх розв'язання проблем, які виникають при створенні нових матеріалів, вимірюється якістю та ступенем прогнозування процесів та явищ, які супроводжують ці технології [9, 10].

Втім, прогнозування та моделювання в порошковій галузі потребують подальшого вдосконалення теоретичних уявлень та їх втілення у вигляді якісних методів та алгоритмів, які реалізуються за допомогою сучасних обчислювальних середовищ, програм та візуальних пакетів із застосуванням відповідної комп'ютерної техніки [11].

ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ РОБОТИ

Метою даної наукової роботи є розв'язання важливої науково-прикладної проблеми оптимізації технології виготовлення матеріалів конструкційного призначення з використанням відходів машинобудівного виробництва на основі комп'ютерно-інформаційних технологій їх прогнозування.

Основний матеріал

Прогнозування закономірностей формування структури та властивостей матеріалів залежать, насамперед, 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, продуктивність, безпеку і культуру праці, але й впливає на ряд найважливіших властивостей готового продукту. Тому, важливе місце тут займають модельні експерименти прогнозування залежності властивостей матеріалів від технологічних параметрів отримання виробів з використанням аналітичних, числових та числово-аналітичних методів за допомогою 3D моделювання.

Розробка методології моделювання розрахунку реальної засипки у форму ППМ, яка представляє більш реалістичний рівень гетерогенності, є відправною точкою для виявлення фізичної основи поведінки порошку на стадії засипки для більшості випадків, які в даний час визначаються як емпірично, так і характеризується реальними експериментами. В ідеалі, отримані таким чином теоретичні результати, може змінити інженерний погляд на властивості майбутніх ППМ.

На сьогоднішній день побудова адекватної моделі процесу ущільнення перебуває на стадії активної розробки. Існує три шляхи реалізації такої програми:

- існують обширні дані щодо експериментального дослідження випадкових упаковок рівних сфер;
- інтенсивно проводяться експерименти з модельного дослідження подібних систем з застосуванням методу Монте-Карло;
- напрацьовуються наукові роботи суто теоретичного характеру.

У Луцькому національному технічному університеті під керівництвом професора В.Д. Рудя розроблено ряд комп'ютерно-імітаційних моделей упаковки частинок для монодисперсних і полідисперсного випадку засипки порошоків (рис. 1).

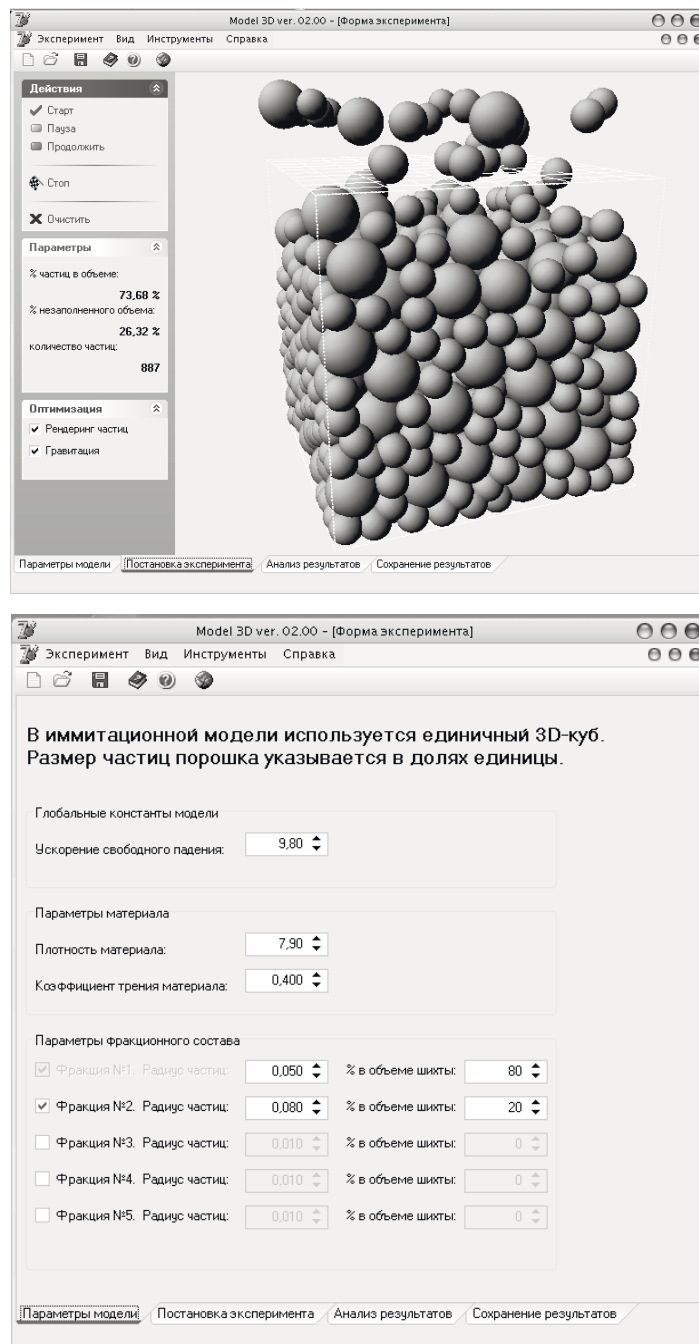


Рис. 1. Комп'ютерна програма для моделювання заповнення упаковки 3D-форми частинками порошку для монодисперсного і полідисперсного випадку засипки

Як приклад, на рис. 1 наведено результат моделювання заповнення 3D-форми частинками порошку. Модель описує засипку в тривимірній постановці. На відміну від ряду подібних відомих алгоритмів, які візуалізують тільки результат упаковки і всі рухи частинок не зображують візуально, запропонований авторами алгоритм відображає процес засипки на екрані монітора комп'ютера.

Розміри елементів визначаються відносними одиницями по відношенню до розміру куба. Обсяг елементів упаковки характеризує щільність заповнення в заданому обсязі. Моделювання засипки здійснюють і розрахунок дисперсності, тільки в цьому випадку враховують розмірність куба.

Загальна методика визначення щільності заповнення і дисперсності певного обсягу полягає в тому, що за допомогою математичного моделювання розігрують упаковки випадкового заповнення в заданий обсяг представницького контейнера заданої форми.

Отже, для практичного створення потрібної пористої структури ППМ, яка буде відповідати оптимальному поєднанню експлуатаційних характеристик, необхідно встановити взаємозв'язок між технологічними режимами отримання і оптимальним порозподілення за радіусом ППМ.

На основі континуальної теорії пластичності пористого тіла, виготовленого методом радіально-ізостатичного пресування, розроблена теоретична методика прогнозування розподілу пористості за перерізом ППМ. При цьому був отриманий результат, який має відносно простий аналітичний вигляд, що дозволяє аналізувати фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густини пористого тіла [12].

За визначенням члена-кореспондента НАН України М.Б. Штерназгідно певних теоретичних міркувань та розрахунків [12] при радіально-ізостатичному пресуванні тиск набуває наступного виразу:

$$p_{rad} = -\sqrt{1-\theta_0} \sigma_m \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\alpha}{\theta_0}}, \quad (1)$$

де p_{rad} – радіальний тиск пресування; θ_0 – початкова пористість; σ_m – напруження пористого тіла; α – параметр, який визначається із експерименту на всебічне стиснення.

Після нескладних математичних розрахунків та знаючи, що значення пористості θ вже є наступним наближенням до істинного поля густини, отримуємо рівняння уточненого поля густини:

$$\theta = \frac{\alpha(\sigma_m^2 - \tau^2)}{p^2 + \alpha\sigma_m^2}, \quad (2)$$

де τ – інтенсивність деавіатора напружень; p – тиск пресування.

Після підстановки у нього отриманих значень для p , τ , p_{rad} , маємо:

$$\theta = \frac{\alpha \left(\sigma_m^2 - \left(\frac{\sqrt{1-\theta_0} R_l}{1+\alpha\chi} p_{rad} \right)^2 \right)}{\left(\frac{\alpha\chi}{1+\alpha\chi} p_{rad} \right)^2 + \alpha\sigma_m^2}, \quad (3)$$

де θ – пористість ППМ; R_l – радіус внутрішньої поверхні ППМ; χ – коефіцієнт, який рівний відношенню матеріальних функцій пористості.

Для конкретних обчислень перш за все необхідно знайти величину θ_0 , яка є нульовим наближенням до пористості. Із цією метою використовуємо закон збереження маси:

$$\theta_0 = 1 - \frac{R_{2i}^3}{R_2^3} (1 - \theta_i), \quad (4)$$

тут R_{2i} – це початковий радіус заготовки перед радіально-ізостатичним навантаженням; θ_i – початкова пористість.

Параметр a визначається із експерименту на всебічне стиснення, апроксимуючи криву «тиск–пористість» у вигляді $p = \frac{a}{\theta}$.

Параметр σ_m доцільно вважати рівним тиску, який відповідає зменшенню пористості на 25% від початкового значення.

Вигляд розрахункової залежності пористості наведений на рис. 2. Як видно з розрахунків та проведення практичного дослідження пористість змінюється при зміні радіусу циліндричної заготовки ППМ (пустотілого циліндру), який виготовлений методом радіально-ізостатичного пресування.

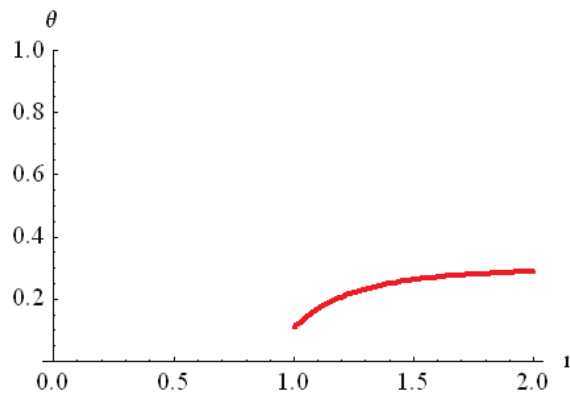


Рис. 2. Залежність пористості θ від радіусу r (см) заготовки

Моделювання пористої структури конкретного багатошарового ППМ зі порошку сталі ШХ15 здійснювалося у пакеті прикладних програм *MatLab*. За описаною вище методикою було розроблено нове програмне забезпечення на мові програмування C++ (програма «FiltrN»), що і дало змогу змоделювати процес радіально-ізостатичного пресування із заданою пористістю ППМ.

Порошок засипається в простір між оправкою та еластичною оболонкою. Відносна насипна густина порошку ШХ15 становила 20% , тобто початкова пористість становить 0,8.

Визначений за результатами наших розрахунків розподіл пористості та радіальної швидкості при моделюванні радіально-ізостатичного пресування багатошарового ППМ показаний на рис. 3.

Розроблений новий метод комп'ютерного моделювання дозволив не тільки визначити розподіл пористості та інших характеристик порошкового проникного матеріалу, але й встановити взаємозв'язок між технологічним режимами їх отримання і експлуатаційними характеристиками [13, 14].

Радіальна швидкість дає можливість керувати розподілом пористості у багатошаровому ППМ та дозволяє аналізувати фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густини [15].

На рис. 4. показані структури ППМ з відходів промислового виробництва, які отриманні методом сухого радіально-ізостатичного пресування. Із даного зображення видно пористість ППМ та мікропористість частинок.

II. РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

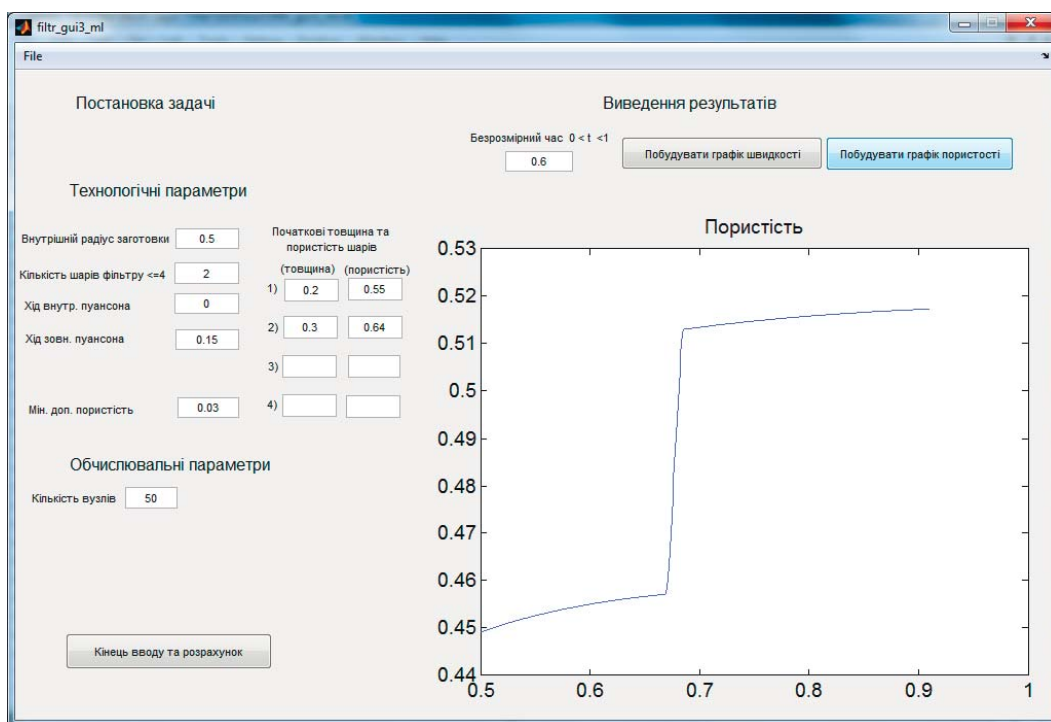
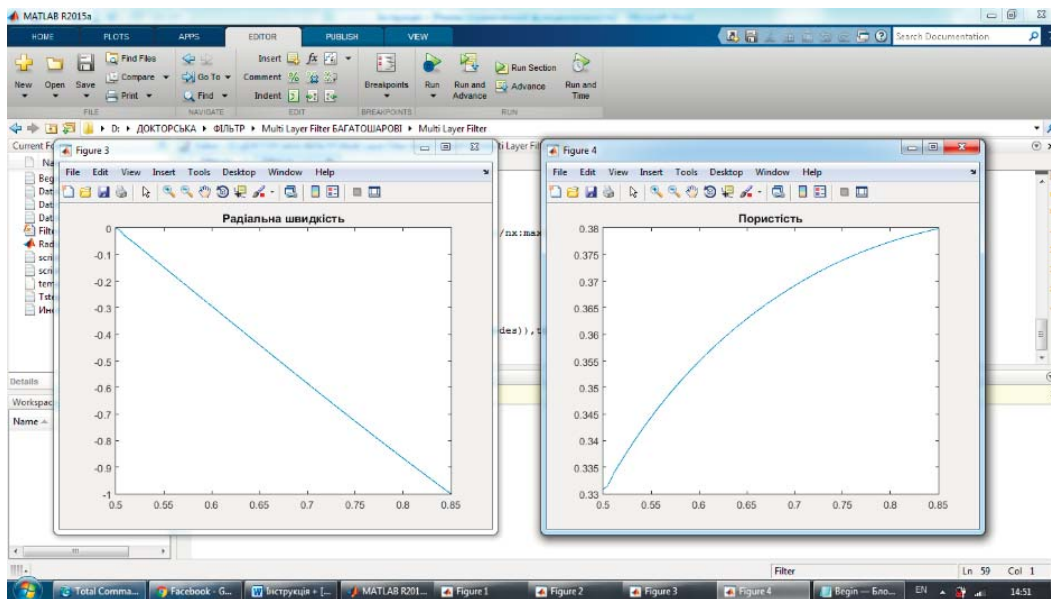


Рис. 3. Виведення графічних залежностей впливу радіальної швидкості та розподілу пористості при моделюванні радіально-ізостатичного пресування багат шарового ППМ

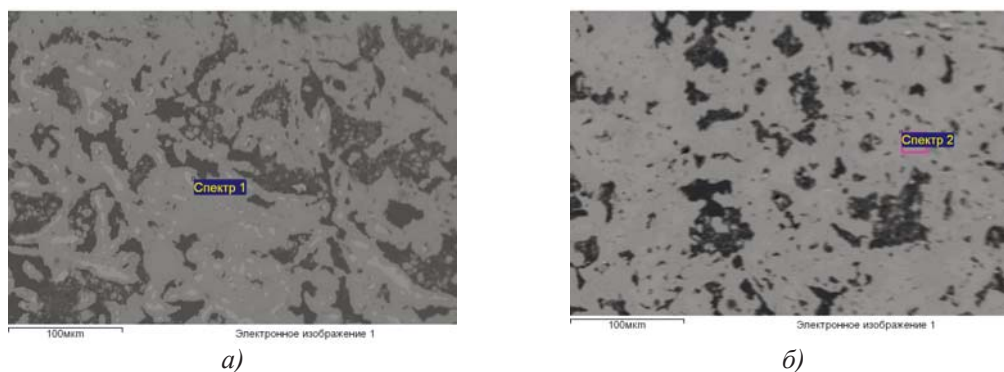


Рис.4. Мікроструктура ППМ з відходів промислового виробництва: а) розмір частинок вихідного порошку – 0,1 мм; б) розмір частинок вихідного порошку – 0,063 мм

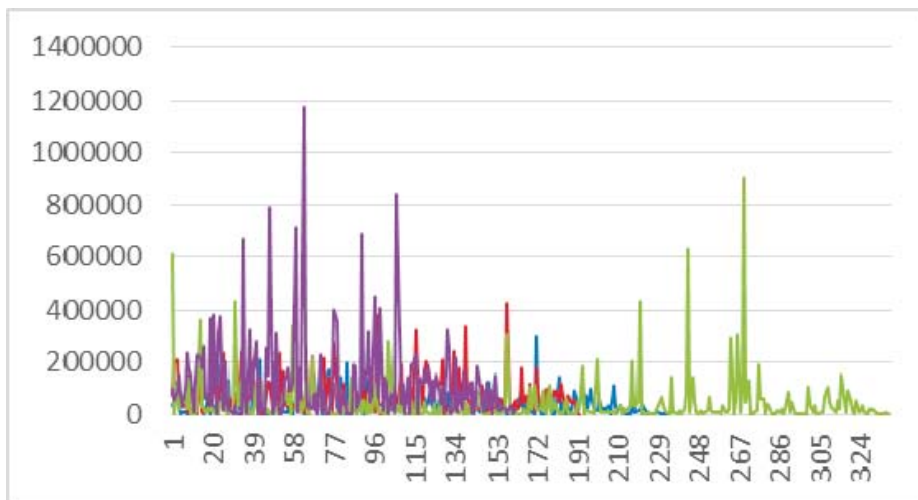
За допомогою прикладного програмного металографічного забезпечення *Avizo*[®] зображення шліфів ППМ можна представити комбінацією різноманітних структурних складових при різному співвідношенні: фазами, які характеризуються різноманітними розмірами, формою та кольором, а також межами зерен, що представлені або окремими лініями на зображенні, або покриттям зображення безперервною сіткою. Комбінація цих структурних складових (площинні та просторові) для ППМ з відходів промислового виробництва представлені на рис. 5.



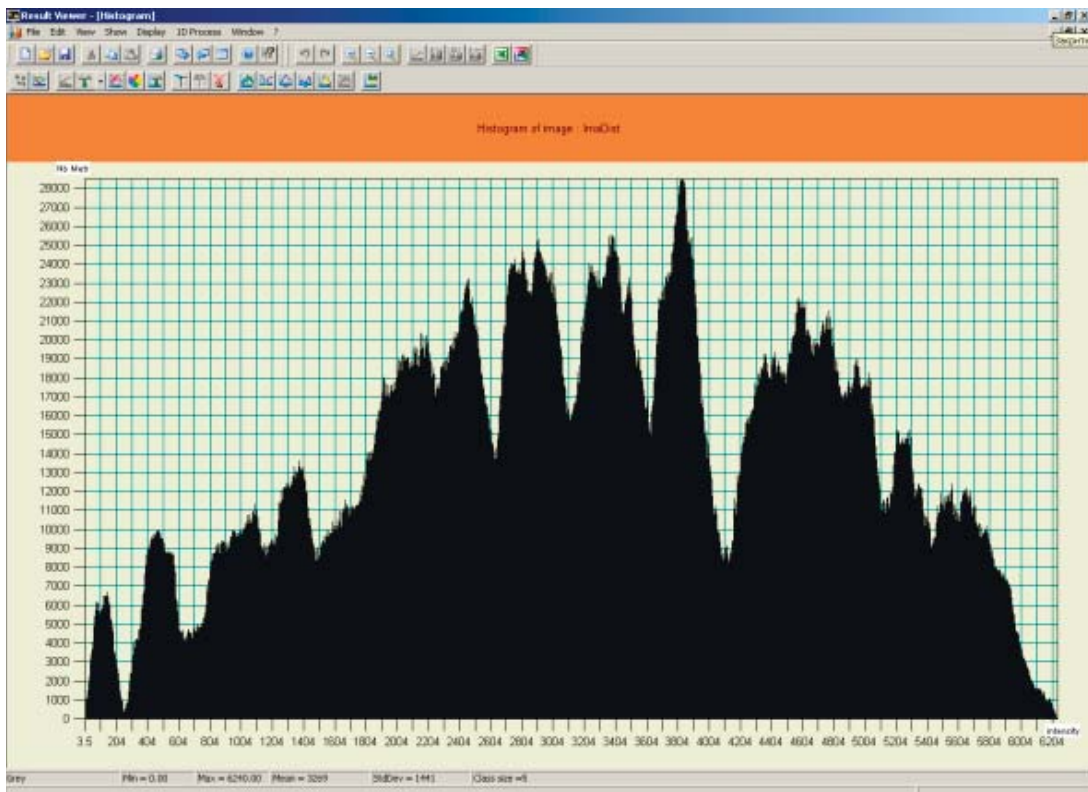
Рис. 5. Визначення та аналіз структурних складових (пористість, максимальний та мінімальний діаметр пор, максимальні та мінімальні розміри частинок) ППМ у форматі 3D-зображення (ППМ з розміром частинок вихідного порошку – 0,1 мм)

Вмонтований механізм автоматизації у *Avizo*[®] абсолютно прозорий для користувача і дозволяє без надмірних зусиль накопичувати та аналізувати дані з багатьох точок зору, отримувати інтегральні характеристики поророзподілення (рис. 6).

Avizo[®] універсальний інструмент для якісного аналізу зображення в науці та на виробництві, в рівній мірі незамінний як при аналізі лабораторних структур, так і при кількісному аналізі у відповідності з українськими та міжнародними стандартами.



a)



б)

Рис. 6. Розподіл зміни пористості (а) та побудова лінійної гістограми пористості (б) за січенням ППМ (розмір частинок вихідного порошку – 0,063 мм)

Для перевірки правильності отриманих значень пористості та проникливості проведемо моделювання процесу проходження рідини через ППМ при різних тисках.

Змоделюємо даний процес при $\Pi=0,3$ та різних тисках подачі рідини (рис. 7).

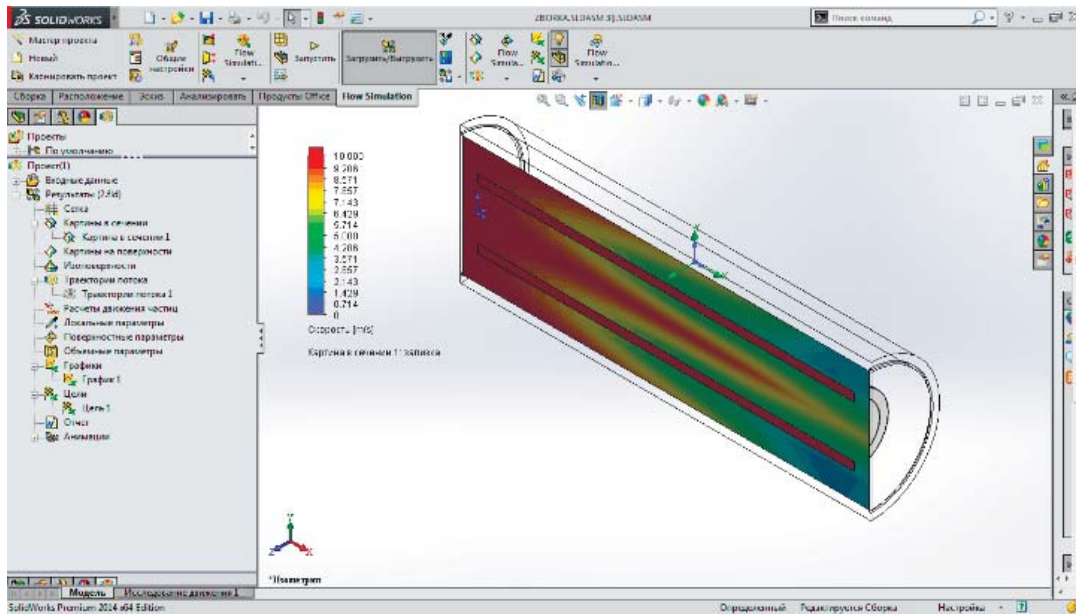
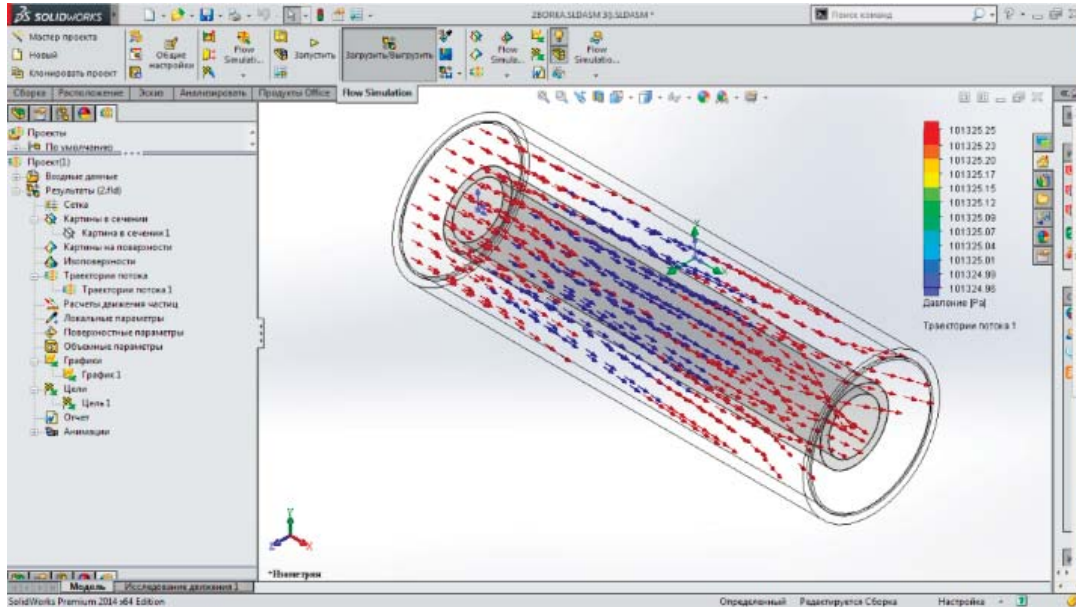
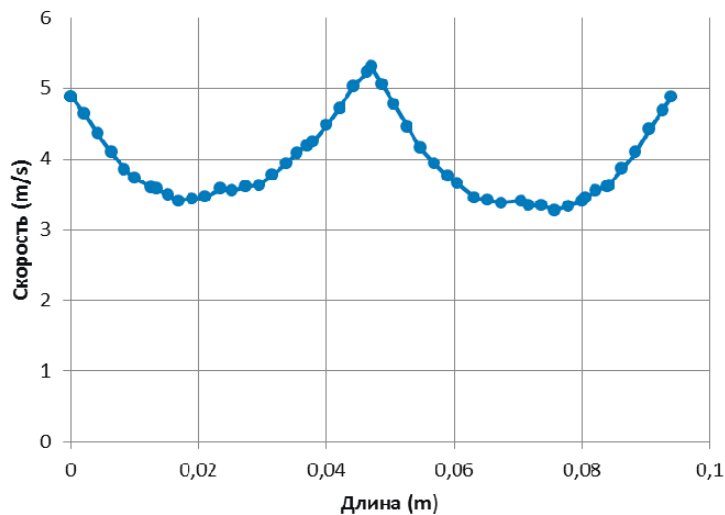


Рис. 7. Моделювання процесу проходження рідини через ППМ ($\Pi=0,3$) при різних тисках

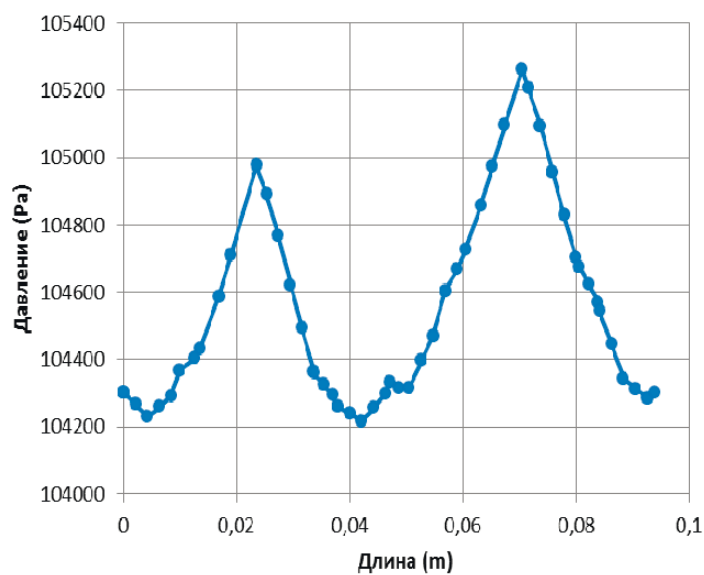
Таблиця 1.

Значення граничних тисків при проходженні через ППМ ($\Pi=0,3$)

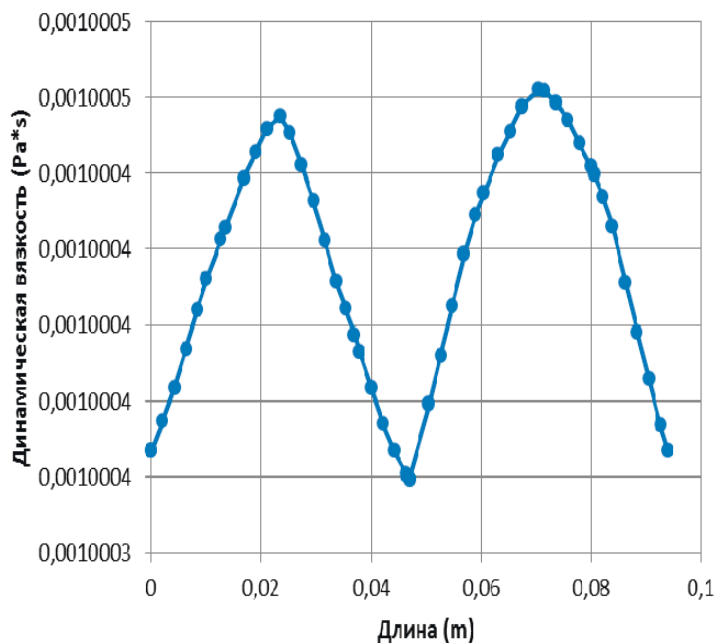
Параметри проходження в середовищі	Одиниця виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Повний тиск	Pa	128608,477	129275,751	125873,9473	133087,1564
Температура середовища	K	293,204441	293,204539	293,2035536	293,2056941
Швидкість	m/s	7,11282644	7,24613155	6,562965454	7,730006513



а)



б)



в)

Рис.8. Графічні залежності швидкості (а), тиску (б) та динамічної в'язкості (в) рідини від довжини при проходженні через ППМ ($\Pi=0,3$)

ВИСНОВКИ

Практика моделювання нових пористих проникних матеріалів на основі металевих порошків показує, що реалізація у повному об'ємі їх міцнісних і експлуатаційних характеристик потребує суттєвого збільшення рівня прогнозування фізико-механічних властивостей матеріалів та розробки нових методів моделювання, який включає комплексний аналіз процесів формування матеріалів.

Розроблений новий метод комп'ютерного моделювання пористих порошкових матеріалів включає в себе модель пластичного деформування порошково-пористих середовищ. На відміну від існуючих, запропонований метод дозволяє враховувати особливості розподілу пористості та радіальної швидкості при радіально-ізостатичному пресуванні. Даний метод комп'ютерного моделювання дозволив не тільки визначити розподіл пористості й інших характеристик порошкового пористого тіла, але й спрогнозувати вплив їх на експлуатаційні властивості ППМ.

На підставі отриманих розрахункових даних встановлені закономірності зміни характеристик матеріалу при пресуванні багат шарових ППМ.

A new method of computer prediction of structural and operational properties of structural design materials, namely, porous permeable materials, has been developed. The developed new method allowed not only to determine the distribution of porosity and other characteristics of powder permeable material, but also to establish there lationship between the technological modes of their obtaining and operational characteristics.

Key words: porous permeable material, packaging, radial isostatic pressing, density distribution, computer simulation models.

Разработан новый метод компьютерного прогнозирования структурных и эксплуатационных свойств конструкционного назначения, а именно пористых проницаемых материалов. Этот метод позволил не только определить распределение пористости и других характеристик порошкового пропускающего материала, но и установить взаимосвязь между технологическим режимом их получения и эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: пористый проницаемый материал, упаковка, радиально-изостатическое прессование, распределение плотности, компьютерно-имитационные модели.

1. Шибряев Б.Ф. Пористые проницаемые порошковые материалы // Порошковая металлургия. – М., 1982. – С. 140–151.
2. Белов С.В. Пористые проницаемые материалы: Справочник. – М.: Металлургия, 1987. – 332 с.
3. Повстяной А.Ю. Эколого-экономическая эффективность использования отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения / Повстяной А.Ю., Рудь В.Д. // Международный журнал «Устойчивое развитие». – №19. – Варна, Болгария, сентябрь 2014. – С.89-94.
4. Кадушников Р.М. Геометрическое моделирование структуры материалов // Порошковая металлургия. – 1989. – 140с.
5. Рудь В.Д. Структурні характеристики заготовок при заповненні прес-форм частками нерегулярної форми / Рудь В.Д., Шиберко В.В., Повстяной О.Ю. // Новые технологии и материалы, автоматизация производства – 2014. – С.89-95).
6. Young C., McMillan A.J., Ravey E., Verdicchio J., Quinn J., McIlhagger A., Buchanan S. "The hybrid approach of a 3D textile composite finite element modelling technique at meso-scalelevel" 18th ICCM, SouthKorea, 2011.
7. Potter E., Pinho S.T., Robinson P., Iannucci L., McMillan A.J. "Mesh generation and geometrical modelling of 3D woven composites with variable to wcross-sections" Computational Materials Science 2012 (51) PP.103–111.
8. Alsayednoor Jafar (2013) Modelling and characterisation of porous materials. PhDthesis. 224 p.

9. *Повстяной О.Ю.* Застосування комп'ютерного моделювання для візуалізації трьох-мірних даних при дослідженні властивостей пористих проникливих матеріалів / Повстяной О.Ю., Куц Ю.В., Імбірович Н.Ю. // Наукові нотатки. – Випуск 50. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2015. – С.159-165.
10. *Povstyanoy Oleksandr.* The applied ancient methodology of workis witenergy. When burns actively power clears space and disinfectsair / Povstyanoy Oleksandr // The 2016 E-MRS Fall, (Advanced technologies of composite production) /*Warsaw, Poland, September 19-22, 2016.* – Electronicdata. – 2016. – Mode of access:<http://www.european-mrs.com/advanced-composite-materials-production-testing-applications-emrs>.
11. *Povstyanoy Oleksandr.* Theoretical and practica lbackground of computer modelling implementation for solving of problems of powder materials forming // “The 2018 E-MRS Fall Meeting”, Warsaw, Poland, September 17-20, 2018. - Electronicdata. – 2018. – Mode of access: <https://www.european-mrs.com/multifunctional-advanced-composite-materials-idea-market-emrs#collapse70>
12. *Повстяной О.Ю.* Визначення розподілу густини пористого проникного циліндра за радіусом при радіально–ізостатичному пресуванні / Повстяной О.Ю., Рудь В.Д. // Наукові нотатки. – Випуск 54. – Луцьк: РВВ Луцький НТУ, 2016. – С.246-252.
13. *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №68843.* Комп'ютерна програма «Моделювання пресування одношарових фільтрів (Фільтр 1)» / О.Ю. Повстяной, Кузьмов А.В., Куц Ю.В. Дата реєстрації 29.11.2016 р.
14. *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №68842.* Комп'ютерна програма «Моделювання пресування багатошарових фільтрів (Фільтр N)» / О.Ю.Повстяной, Кузьмов А.В. Дата реєстрації 29.11.2016 р.
15. *Повстяной О.Ю.* Моделювання пористої структури в багатошарових фільтруючих порошкових матеріалах / Повстяной О.Ю., Кузьмов А.В. // III International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions" "WORLD SCIENCE" (September 28 – 29, 2016, Dubai, UAE).