Луцький національний технічний університет Національна академія наук України Інститут проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

ПОВСТЯНОЙ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ

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

ДИСЕРТАЦІЯ

БАГАТОШАРОВІ ПОРИСТІ ПРОНИКНІ МАТЕРІАЛИ З РЕГУЛЬОВАНОЮ ПОРИСТІСТЮ З ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство Технічні науки (13 Механічна інженерія)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О.Ю. Повстяной

Науковий консультант: заслужений діяч науки та техніки України, д.т.н., професор Рудь Віктор Дмитрович

АНОТАЦІЯ

Повстяной О.Ю. Багатошарові пористі проникні матеріали з регульованою пористістю з відходів промислового виробництва. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 «Матеріалознавство» (13 Механічна інженерія). – Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, 2021.

Подається на захист в спеціалізовану вчену раду Д26.207.03 Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

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.

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

На підставі отриманих розрахункових даних у роботі встановлені закономірності зміни характеристик матеріалу при пресуванні багатошарових пористих заготовок, а саме, радіальна швидкість дає можливість керувати розподілом пористості у багатошарових ППМ та підвищити ступінь її перерозподілу за рахунок збільшення накопиченої деформації порошку.

Розподіл пористості має нерівномірний характер. Більш інтенсивне ущільнення матеріалу відбувається біля оправки прес-форми ізостату.

Запропоновано комп'ютерні моделі засипки порошків при формуванні виробів із урахуванням властивостей матеріалу частинок на основі теорії узагальненої випадкової упаковки.

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

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 вказаний опір має місце.

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 технологічним режимами їх отримання і експлуатаційними характеристиками.

4. *Вперше* удосконалено методологію розрахунку моделі прогнозування розподілу пор у ППМ на етапі засипки 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. Запропоновано в дисертаційній роботі модель пластичності порошкових і пористих середовищ, що може бути використана при дослідженні різних схем деформування, розробці нових і оптимізації наявних технологічних процесів одержання порошкових виробів.

Розроблено новий спосіб отримання фільтрувального матеріалу (свідоцтво №100743) 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) та «Моделювання пресування багатошарових фільтрів (Фільтр N)» (свідоцтво №68842), що дозволяють описувати та прогнозувати процес пресування одношарових та багатошарових проникних матеріалів із потрібною пористістю, отримані методом сухого радіально–ізостатичного пресування.

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

Результати комп'ютерного моделювання і встановлені закономірності пресування пористих заготовок були використані при одержанні багатошарових ППМ, виготовлених методом радіально-ізостатичного пресування у Луцькому національному технічному університеті. Результати роботи залучені до університетського курсу лекцій, практичних занять та лабораторних робіт дисципліни «Маловідходні технології в машинобудуванні» Луцького НТУ (м. Луцьк) та Національного університету харчових технологій (м. Київ).

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. Використання ППМ розроблених одношарових фільтрувальних i3 порошку сталі ШХ15,отриманих методом радіально-ізостатиичного пресування, підвищує рівномірність поророзподілу фільтрувальних матеріалів на 20-30% і збільшує проникливість на 15-20% порівняно аналогічними традиційними 3 фільтрувальними матеріалами.

На виробничій базі компанії Ningbo FUTEC Co., Ltd (м. Нінбо, КНР) була виготовлена дослідна партія дво- та тришарових пористих проникних матеріалів (фільтрів) з порошку сталі ШХ15 методом радіально-ізостатичного пресування. Ефективність нового фільтрувального ППМ порівняно з одношаровими 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 три, а ресурс і брудоємкість в 1,5 рази вищу порівняно з відомими одношаровими фільтрувальними ППМ, при цьому маса фільтру на 20% менша.

Ключові слова: пористий проникний матеріал, шихта, пористість, засипка, упаковка, пресування, спікання, проникність, прогнозування, комп'ютерне моделювання, теорія пластичності, метод скінчених елементів, розподіл пористості, корозійностійкість.

SUMMARY

Povstianoi O. Multilayer porous permeable materials with adjustable porosity from industrial waste. - Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Engineering in specialty 05.02.01 "Materials Science" (13 Mechanical Engineering). - Institute of Materials Science. Frantsevich Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

Filed for protection in a specialized scientific council D26.207.03 Institute of Materials Science. Frantsevich National Academy of Sciences of Ukraine.

The dissertation is devoted to forecasting, modeling of patterns of formation of structure and properties of porous permeable materials taking into account the sizes of structural elements of the charge, establishing physical connections between components, structure and properties of the finished product, their operational properties.

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

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

The regularities of density distribution along the radius of each layer of PPM at different moment of deformation time are established in the work. The porosity distribution is uneven. More intense compaction of the material occurs near the axial core of the capsule.

Model studies of powder backfill formation with consideration of material properties based on models of generalized random packing are offered.

The results of the dissertation are used in the application of developed porous permeable products for the purification of industrial, industrial water, lubricants and fuel from mechanical impurities, pollution.

Scientific novelty of the obtained results.

1. For the first time, a generalized model for the distribution of the density of powder media over the radius of a porous body (cylinder) under the action of external radial loading is theoretically substantiated and proposed; the model describes both the deformation of the powder and the porous body, in which deformation the specified resistance takes place.

2. Based on the application of the proposed model and the calculation method based on it, a number of technological processes for the creation of porous permeable materials with their simultaneous formation and prediction of properties were first considered;

3. On the basis of the theoretical concepts developed, the first method of computer simulation was developed, which allows not only to determine the distribution of porosity and other characteristics of powder permeable material, but also to establish the relationship between the technological modes of their production and operational characteristics;

4. For the first time, a methodology for calculating the model of random pores in the PPM at the stage of filling the material into the hopper was developed, taking into account the physical basis of the components of the original powder;

5. On the basis of the theory of plastic deformation and nonlinear-viscous flow of compressed materials, a computer system was developed for the first time, which makes it possible to determine the density distribution over the radius of each PPM layer at different times of deformation time.

6. It has been established and confirmed by computer simulation that the porosity distribution is uneven when pressing the filter elements of cylindrical shape. As the radius increases, the porosity increases;

7. It is proved that the distribution of porosity and accumulated plastic deformation by volume of the product is uneven and depends on the sealing scheme during radial-isostatic pressing of the powder filter element of complex shape.

8. For the first time, a new technique for composite coatings for industrial design waste was developed and applied to porous permeable materials to improve corrosion resistance.

The practical significance of the results obtained. The model of plasticity of powder and porous media, modeling methods, as well as the regularities established by the author, can be used in the research of various deformation schemes, development of new and optimization of existing technological processes of production of powder products.

A new method of producing filter material (Certificate No. 100743) with adjustable porosity has been developed for the purification of technical liquids and gases, depending on the operating conditions.

Computer programs "Modeling of pressing of single-layer filters (Filter 1)" (certificate No. 68843) and "Modeling of pressing of multi-layer filters (Filter N)" (certificate No. 68842) have been developed, which allow to simulate the process of pressing of single-layer and multilayer powder permeable materials with a given porosity and to predict the future porous structure of single, multilayer filter material obtained by dry radial isostatic pressing.

The computer program "Computer-simulation modeling for spraying of protective media on a part" (Certificate №71207) was developed to calculate the protective coating on structural components of industrial waste.

The results of computer simulation and established patterns of porous billet pressing were used to obtain multilayer PPM made by radial-isostatic pressing at Lutsk National Technical University. The results of the work are included in the university course of lectures, practical classes and laboratory works of the discipline "Low-waste technologies in mechanical engineering" of Lutsk NTU and the National University of Food Technologies (Kyiv). The main results of the work were implemented in the production at Lutsk MPD of Ukrspirt SE (Lutsk) and LLC VOG TRADE (Kiev) for the purification of technical fluids and fuel from mechanical impurities. The use of the developed single-layer filter PPM from powder of steel SH15, obtained by the method of radial-isostatic pressing, increases the uniformity of the pore distribution of filter materials by 20-30% and increases the permeability by 15-20% compared to similar traditional filter materials.

On the production base of Ningbo FUTEC Co., Ltd (Ningbo, PRC), an experimental batch of multilayer porous permeable materials made of ShH15 steel powder by radial isostatic pressing was manufactured. The efficiency of the new filter PPM compared to similar traditional PPM was 82%.

Based on the results of a study at the Guangdong Juhang Institute for New Materials Institute for Advancer Material Co., LTD (Guangdong Province, PRC), a batch of three-layer PPM was introduced to clean up technical fluids from a mechanical contaminant. PPM data have a coefficient of permeability of 3, and the resource and dirt capacity are 1.5 times higher than the known single-layer filter PPM, with the filter mass by 20% less.

Keywords: porous permeable material, charge, porosity, backfill, packing, pressing, sintering, permeability, forecasting, computer simulation, plasticity theory, finite element method, porosity distribution, corrosion resistance.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ОСНОВНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

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

4. *Povstyanoi O.*, Sychuk V., McMillan A., Rud V., Zabolotnyi O. «Metallografic Analysis and Microstructural Image Processing of Nozzles for Sandblasting Produced by Powder Metallurgy Methods». *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 приграм.

5. *O. Yu. Povstyanoi*, V. D. Rud, L. M. Samchuk, N. T. Zubovets'ka «Production of Porous Materials with the Use of Energy-Saving Technologies». *Materials Science*

(Сполучені Штати Америки, режим доступу: <u>https://doi.org/10.1007/s11003-016-</u> <u>9912-6</u>). 2016. V.51. P.847-853.

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

t

h

е Здобувачем запропоновано новий підхід комп'ютерно-інформаційного забезепечення для дослідження властивостей деталей контрукційного **п**ризначення.

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

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

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

s **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 пустотілого ППМ.

9. *Повстяной А. Ю.*, Рудь В. Д. «Эколого-экономическая эффективность использования отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения» «Устойчивое развитие». (Болгарія). ѝ014. №19. С. 89-94.

- S
- ~
- t
- r
- r
- u

Особистий внесок дисертанта – розрахунок економічної ефективності викоритсання відходів промисловог овиробництва (порошку сталі ШХ15) для виготовлення фільтрів.

12

10. *Povstyanoy O.*, Kuts Yu. «Review of the current software for computer based r

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

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

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

12. Повстяной О.Ю. «Застосування CALS-технології для комплексного i виготовлення корпусів водолічильників 3 використанням програмного Вісник DELCAM». комплексу національного університету «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у иашинобудуванні та приладобудуванні», 2013. №772. С. 148-153.

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

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

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

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

n

g

0

f

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

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

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

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

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

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

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

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

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

19. **Повстяной О.Ю.** «Комп'ютерно-інформаційні технології прогнозування та моделювання властивостей матеріалів конструкційного призначення». 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. *Повстяной О.Ю.*, Дороговцев А.А. «Модельні дослідження формування засипки порошків з урахуванням властивості матеріалу на базі моделей випадкової упаковки (двомірний випадок)». *Наукові нотатки*. 2018. Випуск 63. С. 183-188.

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

21. **Повстяной О.Ю.**, Михайлов А.О., Рудь В.Д., Михайлов О.В. «Моделювання ущільнення порошкового фільтруючого елемента складної форми при радіальноізостатичному пресуванні». *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. Імбірович Н. Ю., Посувайло В. М., Шимчук С. П., *Повстяной О. Ю.*, Остап'юк С. І. «Трибологічна характеристика плазмоелектролітно-оксидованих покриттів на сплавах ASTM B265 та 2024». *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 состояния 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 методику 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.* Плазмоэлектролитное 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.

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. Імбірович Н.Ю., Клапків М.Д., *Повстяной О.Ю.* Конверсійна оксидокераміка як ефективний спосіб захисту імплантів. *Global scientific unity* 2014: материаллы Международного конгресса (Прага, 26-27 сентября 2014 года). Прага, 2014. С. 36-37 (заочна участь).

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

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: <u>http://www.emrs-</u>

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 подрібненян порошків сталі ШХ15.

31. В.В. Шыберко, В.Д. Рудь, *А.Ю. Повстяной* Прогнозирование структурных характеристик порошковых материалов с помощью 3D моделирования. Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные матерыиалы, 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'ютерноінформаційних технологій при вивчені 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: <u>http://www.european-mrs.com/advanced-composite-materials-production-testing-applications-emrs</u> (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. Р. 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 f

0

г Здобувачем було проведено комп'ютерне моделювання формування структури ППМ.

s 36. *Повстяной О.Ю.* Прогнозування закономірностей формування отруктури та властивостей пористих порошкових матеріалів *Комплексне* 1

V

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 САЕ. *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 Povstyanoy*, 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 Povstyanoy*, 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 Povstyanoy*, 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 IX 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 Povstyanoy*, 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. Реактор для проведення самопоширюючого високотемпературного синтезу (СВС-процесу): пат. на корисну модель №91287: заявник та правовласник Луцький НТУ; заявл. 11.02.2014; опубл. 25.06.14, Бюл. №12.

45. Спосіб отримання фільтруючого матеріалу: пат. на корисну модель 100743 : заявник та правовласник Луцький НТУ; МПК (2015.01) В22F 9/00, В01D 39/00, заявл. 16.02.2015; опубл. 10.08.15, Бюл. №15.

46. Модернізований реактор для проведення самопоширюючого високотемпературного синтезу : пат. на корисну модель №105203 : 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 напилення захисних середовищ на деталь / Куц Ю. В., *Повстяной О. Ю.* Дата реєстрації 29.03.2017 р.

1.2. Аналіз закономірностей формування структури ППМ.......43

1.2.3. Методи підвищення корозійностікості ППМ......50

2.1. Характеристика матеріалу та об'єкту дослідження.......67

2.2. Обладнання та методика отримання фільтрувальних ППМ з відходів промислового виробництва сухим радіально-ізостатичним пресуванням.......74

2.3. Матеріали та методи нанесення захисних покриттів для ППМ......78

3.2. Розробка методики розрахунку фізичних параметрів, які закладаються для дослідження реальних упаковок (двомірний випадок)......100

3.2.1. Опис завдання та вихідні умови для моделювання......100

3.2.2. Одновимірний випадок (площина)......102

3.5. Моделювання властивостей ППМ......124

3.5.1. Моделювання пористої структури в фільтрувальних ППМ...125

23 4.1.3. Ущільнення ППМ з розвинутою поверхнею при радіально-технологія спікання ППМ з відходів Прогресивна промислового 4.3. Нанесення захисного покриття на вироби конструкційного призначення та ППМ з відходів промислового виробництва176 4.3.1. Визначення товщини комбінованих захисних покриттів.....176 4.3.2. Дослідження мікроструктури плазмоелектролітно-оксидованого електродугового покриття......187 4.4. Дослідження плазмоелектролітно-оксидованого електродугового 4.5. Хроалітування фільтруючих ППМ......196 РОЗДІЛ V. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ППМ ІЗ 5.1.1. Обробка 3D зображень ППМ при металографічному аналізі..200 5.2. Передумови та фізичні основи проходження рідини через пористий 5.2.1 Рівняння нерозривності при русі рідини в недеформованому 5.2.2. Визначення залежності проникності від структурних

5.3.1. Дослідження проникності ППМ експериментальним шляхом..222

5.3.2. Дослідження проникності ППМ методами моделювання.......229

5.3.2.1. Проходження рідини через ППМ різної пористості.....231

5.3.2.2. Проходження повітря через ППМ різної пористості....239

5.3.2.3. Проходження газу через ППМ різної пористості	246
5.3.2.4. Системне визначення проникливості ППМ	253
5.4. Визначення границі міцності ППМ методами моделювання	255
5.5. Дослідження корозійної тривкості ППМ зі захисними покрит	тями у
різних агресивних середовищах	262
5.6. Висновки до розділу 5	267
ВИСНОВКИ	269
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	272
ДОДАТКИ	307

ВСТУП

Актуальність теми досліджень. Ефективність виробництва в Україні та світі в сучасних економічних умовах істотно залежить від раціонального підбору матеріалів i застосування ресурсозберігаючих дешевих технологій. Конкурентоспроможність промислових корпорацій, підприємств, заводів, фірм собівартості формується рахунок регулювання продукції. Сучасні за технологічні інновації дозволяють розглядати вторинні промислові відходи як додаткове джерело сировини і матеріалів. Аналіз машинобудівного виробництва показує, що він супроводжується накопиченням значної кількості відходів як дисперсних складових.

Сучасне маловідходне виробництво визначається потребою у створенні нових та вдосконаленні наявних методів отримання пористих порошкових 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.

Останні роки характеризуються значним розширенням застосування процесів пресування пористих порошкових матеріалів. Відбувається постійне вдосконалення традиційних схем і технологій одержання виробів. Створення нового обладнання дозволяє використовувати прогресивні методи пресування, зокрема, радіально-ізостатичне пресування. Саме в такий спосіб були розв'язані деякі питання отримання пористих виробів із порошків різного типу матеріалів.

Сучасні проблеми пресування пористих середовищ вирішуються за допомогою застосування комп'ютерного моделювання, яке дозволяє оптимізувати технологію отримання пористих проникних 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 вітчизняні й закордонні вчені: Г.А. Баглюк, Я.Е. Бейгельзимер, 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. Лаптєв, 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., Randall М. German, Kuhn H., Gurson A., Doremus P., Bouvard D., Cocks A., McMeeking R. McMillan A. 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 багатошарових фільтрувальних пористих проникних 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), 2012-2013рр.

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), 2017-2018рр.

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

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 при використанні чисельних та комп'ютерно-імітаційних моделей в умовах радіально-ізостатичного пресування.

Для досягнення сформульованої мети досліджено такі завдання:

1. Створення нової, на основі наявних, технологію отримання порошкових виробів із підвищеними механічними та функціональними властивостями на підставі 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 ППМ.

3. Розроблення методології розрахунку моделей випадкових пор у ППМ на етапі засипки 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 в процесі роботи.

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

Предмет дослідження – процеси прогнозування, моделювання та створення порошкових пористих проникних матеріалів.

Об'єкт дослідження – формування та створення багатошарових ППМ із відходів промислового виробництва за рахунок 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 методі 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 досліджувалось на оригінальних експериментальних і дослідних установках, розроблених і виготовлених у 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 вказаний опір має місце.

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 технологічним режимами їх отримання і експлуатаційними характеристиками.

4. *Вперше* удосконалено методологію розрахунку моделі прогнозування розподілу пор у ППМ на етапі засипки 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 та оптимізації наявних технологічних процесів одержання порошкових виробів.

Розроблено новий спосіб отримання фільтрувального матеріалу (свідоцтво №100743) 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) та «Моделювання пресування багатошарових фільтрів (Фільтр N)» (свідоцтво №68842), що дозволяють моделювати процес пресування одношарових та багатошарових порошкових проникних матеріалів із заданою пористістю і прогнозувати майбутню пористу структуру одно-, багатошарового 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) для розрахунку захисного покриття на деталі конструкційного призначення з відходів промислового виробництва.

Результати комп'ютерного моделювання і встановлені закономірності пресування пористих заготовок використані при одержанні багатошарових ППМ, виготовлених методом радіально-ізостатичного пресування у Луцькому національному технічному університеті. Результати роботи залучені до університетського курсу лекцій, практичних занять та лабораторних робіт дисципліни «Маловідходні технології в машинобудуванні» Луцького НТУ (м. Луцьк) та Національного університету харчових технологій (м. Київ).

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. Використання розроблених одношарових фільтрувальних ППМ із порошку сталі ШХ15, отриманих радіально-ізостатиичного пресування, підвищує методом рівномірність поророзподілу фільтрувальних матеріалів на 20-30% і збільшує проникливість 15-20% порівняно аналогічними традиційними на 3 фільтрувальними матеріалами.

На виробничій базі компанії Ningbo FUTEC Co., Ltd (м. Нінбо, КНР) була виготовлена дослідна партія дво- та тришарових пористих проникних матеріалів (фільтрів) з порошку сталі ШХ15 методом радіально-ізостатичного пресування. Ефективність нового фільтрувального ППМ порівняно з одношаровими 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 три, а ресурс і брудоємкість в 1,5 рази вищу порівняно з відомими одношаровими фільтрувальними ППМ, при цьому маса фільтру на 20% менша.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, належать особисто здобувачу. Йому належать формулювання мети та наукових завдань досліджень, організація та проведення експериментальних випробувань, обробка результатів експериментальних 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., проф. 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, двота 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 структури одно-, багатошарового фільтрувального матеріалу, пористої отриманих 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.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення дисертаційної роботи обговорено на таких науково-технічних конференціях: «Порошковая металлургия: современное состояния и будущее»: Международная конференція (Киев, 2014 г.); II, V Всеукраїнська науково-технічноа конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні», (Львів, 2014, 2016 рр.); ІІ-а Міжнародна науково-технічна конференція ТК-2014 «Прогресивні напрямки технологічних комплексів» (Луцьк-Світязь, 2014 p.); розвитку 11-я научно-техническая конференция «Новые Международная 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» (Киев, 2014); Міжнародний конгрес "Global scientific unity 2014" (Прага, Чехия, 2014 г.); «The E-MRS Fall Meeting and Exhibit will be held in Warsaw University of Technology» (Warshaw, Poland, 2015-2016, 2018 pp.); 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 (Київ. 2015p.); умовах-5 Міжнародна науково-практична конференція моделі «Реологічні i процеси деформування структурно-неоднорідних матеріалів» (Луцьк-Світязь, 2016 р.); III 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 INTERNATIOL SCHOOL OF AMSE-UAPL (Луцьк-оз.Світязь, MODELING 2018 p.); Всеукраїнська науково-технічна конференція "Прогресивні Технології у машинобудуванні" РМТЕ 2019 (Івано-Франківськ, 2019 р.); І Міднародна науково-технічна конферецнія «Перспективи розвиитку машинобудування та транспорту – ПРМТ2019» (Вінниця, 2019 р.); Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes InterPartner-2019 (Odesa, 2019 p.), 6-a Міжнародна конференції «HigtMatTech» (м. Київ, 2019), ІХ Міжнародна науковотехнічна конференція ТЕХНОЛОГІЇ У «ПРОГРЕСИВНІ МАШИНОБУДУВАННІ», (Львів-Карпати, 3-7 лютого 2020 р), Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes InterPartner-2020 (Odesa, 2020 p.).

Дисертаційна робота у 2018-2019 роках в повному обсязі була схвалена 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 - y 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 - y зарубіжному фаховому виданні за напрямком технічних наук, 21 тези доповідей на вітчизняних, міжнародних конференціях та симпозіумах. 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ ЗАСИПКИ, ПРЕСУВАННЯ ТА СПІКАННЯ ПОРИСТИХ ПРОНИКНИХ МАТЕРІАЛІВ У КОНТЕКСТІ КОМП'ЮТЕРНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

1.1. Комп'ютерне матеріалознавство як сучасне середовище для прогнозування, моделювання, створення та електронного дослідження нових матеріалів

Сучасна промисловість потребує нових конструкційних та функціональних матеріалів, в тому числі композитних та наноструктурованих. Запроваджуване для задоволення цих запитів технологічне обладнання, автоматизоване та роботозоване, яке оснащене нелінійними приводами, дозволяє розробляти принципово нові технології для виробництва матеріалів з підвищеними експлуатаційними властивостями. Приладова база діагностики та наукових досліджень забезпечує дослідження структури нових матеріалів в будь-якому розмірному масштабі від нано- до макрорівня. У зв'язку з цим розвитком високопродуктивних обчислювальних систем і програмного забезпечення є можливість проводити комп'ютерне моделювання нових матеріалів і прогресивних технологій (рис.1.1) [100, 115, 149, 151].



Рисунок 1.1 – Класифікація напрямків сучасного матеріалознавства: взаємозв'язані актуальні напрями розвитку науки про матеріали та відносне розміщення в структурі нового наукового напрямку [100, 115, 149, 151].

Дослідження матеріалів у різних галузях промисловості є актуальною світовою тенденцією і реалізується використанням методів обчислювального матеріалознавства зі застосуванням консолідованого комп'ютерного металографічного аналізу [102, 115].
3 боку необхідно створити інформаційного одного методи матеріалознавства для вибору матеріалів на етапі концептуального проектування виробів та формування баз даних матеріалів, а також розробити ефективні алгоритми обробки моделей поведінки матеріалів та перевірити достовірність відносно розрахунку матеріалів на навантаження. З іншого – необхідно вдосконалювати методи обчислювального матеріалознавства для комп'ютерного моделювання структури та властивостей матеріалів, орієнтуючись на отримання нових, більш досконалих матеріалів. Побудова такої методології спільної роботи цих різних та протилежних напрямків зумовлює необхідність прикладних теоретичних та експериментальних досліджень дотично обчислювальному та інформаційному матеріалознавству 3 виходом комп'ютерне на матеріалознавство з метою оптимізації конструкцій та матеріалів вцілому [5,13, 20].

Проблеми консолідації ускладняється нелінійним характером і невизначеністю взаємозв'язку таких понять як «структура матеріалу» «службове призначення» [21, 22].

Заважають успішній консолідації такі джерела помилок комп'ютерного моделювання у додатках до завдань матеріалознавства:

1. З урахуванням того, що для реконструкції обчислювальних 3D-моделей мікроструктури за експериментальними 2D-зображеннями для комп'ютерної оцінки властивостей вимагає великі витрати часу і машинні ресурси, сумарний обсяг роботи по формуванню взаємозв'язків «структура матеріалу» «службове призначення» часто є нездійсненним.

2. Неповна інформація про параметри обчислювальної моделі через невідповідність і неадекватність даних, включаючи опис граничних умов. Так, довгостроковий характер взаємодії дефектів і регулярної структури матеріалів при експлуатації вимагає комплексного бачення та загального уявлення.

3. Неоднозначна математична модель, що існують після спрощень і апроксимацій. 4. Похибки, що обумовлені генерацією розрахункової сітки і вибором чисельних методів вирішення.

5. Інструментальні похибки вимірювання фізико-механічних властивостей матеріалів.

Організація достовірних баз даних матеріалів залишається невирішеною проблемою комп'ютерного матеріалознавства деталей, конструкцій та технологій.

Незважаючи на те, що багато методів та варіацій розроблялись і продовжують розроблятися, з'явилося сім основних прийомів імітації, або мотивів [1].

Ці методи комп'ютерного моделювання використовують основні моделі та апроксимації для розуміння поведінки матеріалів у більш складних сценаріях, ніж дозволяє загалом теорія, з більшою деталізацією та точністю, ніж це часто можливо при експерименті. Кожен метод може використовуватися незалежно для прогнозування властивостей матеріалів і механізмів, передачі інформації до інших методів моделювання, що виконуються окремо або одночасно, або для прямого порівняння чи протиставлення експерименту [2].

Однією з помітних галузей науки про матеріали є інтегрована інженерія обчислювальних матеріалів, яка прагне використовувати результати обчислень та методи у поєднанні з експериментами, орієнтуючись на промислове та комерційне застосування [3]. Основні поточні теми в даній галузі включають кількісну оцінку та розповсюдження протягом моделювання для остаточного прийняття рішень, інфраструктуру даних для обміну входами та результатами моделювання [4], проектування та виявлення високопродуктивних матеріалів [5] та нові підходи, що дають значне збільшення обчислювальної потужності.

Ієрархічні рівні в обчислюваному матеріалознавстві представлені нами на рис.1.2. Використовуючи кінцево-елементні методи аналізу досліджуємо вузол, окремі частини вузла та деталі.



Рисунок 1.2 – Інформаційна структура в багаторівневому обчислюваному матеріалознавстві при моделюванні матеріалів, технологій та виробів

Формування, структурування та вивчення інформації про матеріали для комп'ютерного моделювання технологій їх отримання є актуальною проблемою, матеріалознавці успішно вирішують. Проблема безпосереднього яку застосування результатів і методів їх обчислення в матеріалознавстві в тому, що зв'язок між структурою матеріалу, що моделюється та комплексом необхідних механічних та функціональних властивостей, неоднозначний і для більшості матеріалів повністю. не встановлюється Водночас існують спроби формалізувати та інтегрувати комп'ютерне моделювання, спираючись на структурні аспекти матеріалів [23-29].

Типова схема створення нових матеріалів за допомогою комп'ютерного матеріалознавства представлено на рис.1.3.



Рисунок 1.3 – Типова схема створення нових матеріалів за допомогою комп'ютерного матеріалознавства

Використання інформації про властивості матеріалів у типових прикладних програмах містять ряд протиріч та невирішених завдань з такими структурними аспектами [29-32]:

1. Перш за все, нелінійна, нерівновісна поведінка матеріалів, яка потребує додаткових зусиль при аналізі навантаження, що може непередбачувано впливати на початкові умови в комп'ютерних моделях.

2. Неоднозначність апроксимації структури матеріалу при переході до цифрового представлення мікроструктури.

3. Залежність справжніх характеристик матеріалу, таких як границя міцності, пористість, ресурс роботи від розподілу параметрів мікроструктури, що обумовлює термін використання матеріалу.

4. Метастабільність та тривала за часом зміна мікроструктури при експлуатації матеріалу.

5. Похибки в описі мікроструктури матеріалу щодо параметрів комп'ютерної моделі.

Інтеграція результатів моделювання структури і властивостей нових виробів та створення для цього методології комп'ютерного матеріалознавства є ключовим фактором підвищення якості готового продукту. При отриманні виникає необхідність здійснити підбір матеріалу та аналіз їх механічних та експлуатаційних властивостей. У зв'язку з цим, слід розглянути комп'ютерні методи дослідження структури та властивостей матеріалів конструкційного призначення, зокрема пористих проникних матеріалів.

Важливою сферою дослідження і науковим завданням матеріалознавства є вивчення взаємозв'язку між структурою і властивостями матеріалів. Металевих матеріалів є більшість у конструкційних матеріалів в машинобудуванні, основним призначенням яких є здатність здійснювати силове навантаження. Внутрішня структура значно впливає на механічні властивості металевих матеріалів. Тому дослідження, прогнозування і спрямоване формування характеристик міцності, довговічності, зносостійкості та інших експлуатаційних властивостей неодмінно пов'язане з пошуком фізичної природи змін структури матеріалів під впливом технологічних та експлуатаційних навантажень.

Традиційно наукові завдання матеріалознавства вирішуються 3 використанням різних експериментальних методів дослідження структури і властивостей матеріалів. Останнім часом швидко розвивалися комп'ютери і програмні комплекси, які стають унікальним дослідницьким інструментом для комп'ютерних експериментів [12-25]. проведення Так, застосування комп'ютерних інструментів для дослідження високотемпературних, проникних, корозійних процесів найчастіше є безальтернативним засобом і сприяє виявленню факторів, відповідальних за утворення дефектів. Актуальність комп'ютерних експериментів обумовлена також впровадженням інтегрованих програмних середовищ у вигляді прикладних програм.

Останнім часом стало актуальним питання про розвиток нових комп'ютерних методів урахуванням проектування 3 мікроструктури конструкційного матеріалу [33-39]. Для цього технологічні процеси, мікроструктуру металевих матеріалів і експлуатаційні властивості об'єднують у відповідні поля і прагнуть формалізувати як прямі, так і зворотні зв'язки між цими полями, щоб мінімізувати робочі ресурси комп'ютерів для обробки обчислювальних моделей. У сучасних роботах [37-41] основний акцент зроблений на анізотропні металеві матеріали, в яких стан матеріалу визначається ортогональним тензором напружень, що відображає локальну орієнтацію вхідного матеріалу в кожному окремому елементі дискретизації мікроструктури.

Розвиток математичних методів опису багаторівневих ефектів в рамках виділеного напрямку на перетині обчислювального та інформаційного матеріалознавства слугував необхідністю сформулювати точний двонаправлений зв'язок між інформаційними полями «структура» «властивості» «процеси». Такий підхід дозволяє корелювати різні характеристики руйнування матеріалу з особливостями мікроструктури, що утворюють концентратори напружень та ініціюють руйнування. Більш того, це автоматично приведе до створення точних моделей для комп'ютерної симуляції процесів.

1.2. Аналіз закономірностей формування структури ППМ

1.2.1. Передумови застосування комп'ютерного моделювання для розв'язання завдань засипки та формування порошкових матеріалів. Проблема дослідження порошкових матеріалів має важливе значення як в наукових цілях, так і в практичному їх використанні. Створення нових матеріалів з наперед заданими властивостями висуває нові вимоги до дослідження та рішення завдань, що вимагають невідкладних і ефективних рішень [42-49].

Однією з основних вимог до виробів, отриманих методами порошкової металургії, є рівномірний розподіл щільності по об'єму пресовки. Суттєвий вплив на розподіл густини має засипка порошку в пресову оснастку, що є першим етапм будь-якого технологічного процесу виготовлення виробу.

Процес засипки, незважаючи на його уявну простоту, залежить від гранулометричного складу шихти, від фізико-механічних характеристик порошків, способу заповнення форми, габаритів виробу та ін. факторів [45-47]. Результати експериментів із дослідження процесів засипки враховуються при розробці окремих технологічних інструкцій, але поширене впровадження стримується високою вартістю фізичного експерименту та консервативним відношенням практикуючих технологів до цієї початкової операції.

У науково-дослідній практиці процес формування структури дискретного середовища зумовлює постійний інтерес і останнім часом він успішно розв'язується методами математичного та комп'ютерного моделювання [104].

При математичному представленні дискретне середовище приймають у першому випадку як континуум [49], у другому – у вигляді куль, окремих фізичних тіл та частинок, що контактують по окремих поверхнях [50]. Основним параметром у такому разі приймається координаційне число в дисперсній системі, тобто кількість контактів частинок. Цей параметр дозволяє оцінити якість структури дисперсних матеріалів і служить опорною точкою при побудові апроксимаційних залежностей фізичних характеристик від пористості. Аналіз сучасного стану модельних досліджень у матеріалознавстві вказує на чітку тенденцію в описі властивостей вихідних матеріалів на базі моделей випадкової упаковки частинок [51-57].

Питання вибору рівня структури повинно бути безпосередньо пов'язане з метою застосування розроблюваної моделі.

На сьогоднішній день побудова адекватної моделі процесу ущільнення перебуває на етапі активної розробки. Існує три шляхи реалізації такої програми. Перший у наявності загальних даних щодо експериментального дослідження випадкових упаковок рівних сфер [58, 68]. Другий – у проведені експериментів з модельного дослідження подібних систем зі застосуванням методу Монте-Карло [3]. Третій – це суто теоретичні роботи [61-63].

У зв'язку з тим, що початковою стадією технології порошкової металургії є насипка – упаковка з досить низькою густиною, важливим є моделювання упаковки сферичних часток. Як найпростіший варіант такої упаковки доцільно розглядати модель випадкової щільної упаковки монодисперсних сферичних часток.

У напрямку комп'ютерного моделювання досить відомі роботи Кадушнікова Р.М. з моделювання еволюції мікроструктури полідисперсних матеріалів при спіканні [51], модель побудови упаковки різнорозмірних сфер у бункері, обмеженому плоскими стінами, запропоновано в роботі [137].

Можливості застосування геометричного моделювання мікроструктури при дослідженні полідисперсних матеріалів як одного з методів опису їх реальної структури наведені у статті Кадушникова Р.М., Бекетова А.Р. [212, 213]. Доказом тому автори вважають, що геометрія частинок описується розподілом трьохмірних поліедрів, а моделлю однорідної структури є випадкова структура поліедрів Вороного.

Для того, щоб ввести до розгляду параметри, що регулюють середню щільність випадкової щільної упаковки, створено алгоритм комп'ютерного моделювання щільної упаковки рівних за діаметром дисків (у двохмірній реалізації), який включає параметр, що регулює середню густину упаковки число обертів одного диску до його фіксації у структурі [67, 233].

Є ще новий спосіб, який ґрунтується у застосуванні програмного забезпечення, що реалізує відповідні фізичні моделі, і використовує програмне забезпечення для розробки моделі [169]. Наприклад, в *Abaqus*, набір порожніх сфер може бути створений або як у вигляді пружніх тіл, або ще як жорсткі поверхні, з відповідними точками контакту. Вони можуть бути змодельовані при падінні у визначений простір-контейнер. Фізика контакту і маси при гравітаційному навантаженні забезпечується [21].

Як приклад, упаковка сферичних часток з досить низькою густиною представлена рис.1.4, 1.5.



Рисунок 1.4 – Варіанти конфігурації упаковок створених в *Abaqus*



Рисунок 1.5 – Модель випадкової пористості, яка згенерована в *Abaqus* з використанням *Python*

У даному випадку тут прийнятий метод для створення 2D-геометрії з використанням емпіричних законів. При застосуванні генератора випадкових чисел для визначення «частинок» за всією областю контейнера будуються геометричні особливості упаковки. Розподіл точок частинок порошку керується за методом диску Пуассона (рис.1.4). Дані конфігурації визначають мінімальні і максимальні щільності упаковки, за умови дотримання правила, що жодна точка частинки порошку не може бути ближче до іншої, ніж на величину R, і що кожний доступний простір заповнюється.

На підставі результатів, що дає нам можливості *Abaqus* нескладно розрахувати залежність пористості від радіусу *R*. Дані наведено у таблиці 1.1.

R, піксель	Пористість, %
$R_1 = 350$	45, 8
$R_2 = 250$	41,1
$R_3 = 150$	34,2
$R_4 = 50$	28,1

Таблиця 1.1 – Залежність пористості від радіусу [71]

У технологіях, що використовуються, такі схеми застосовуються багаторазово, щоб забезпечити високий рівень накопичених деформацій у матеріалі виробів.

Для отримання фільтрувальних ППМ з високою проникністю необхідно використовувати порошки з великим розміром частинок, в той же час як для отримання високої тонкості очистки необхідно використовувати порошки з малим розміром частинок. Ці протиріччя зумовлюють необхідність пошуку нових технологічних прийомів і методів, які б дозволили створювати такі структури ППМ, що забезпечать найбільш оптимальне поєднання експлуатаційних характеристик.

Крім того, слід відзначити, що практика застосування нових матеріалів на основі металевих порошків показує, що реалізація у повному обсязі 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

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. 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.

1.2.2. Сучасні методи, засоби та технології отримання фільтрувальних ППМ. Сучасний стан отримання пористих проникних матеріалів, з одного боку, обмежений технологічними можливостями відомих прийомів та методів їх отримання [253, 351], а з другого, неповністю описаний залежностями ряду їх властивостей від параметрів виготовлення [353].

Для забезпечення заданої тонкості очистки від домішок та з метою збільшення проникливості та міцності виробів у порошкову суміш вводять наповнювачі – пороутворювачі – оскільки внаслідок їх активної дії прискорюються дифузійні процеси, що сприяють утворенню між частинками міцних контактів [220].

Отримання рівномірного поророзподілу по всьому об'єму ППМ забезпечують методи гідростатичного, гідродинамічного та вібраційного пресування та ін. [183, 226].

Аналіз літературних даних [198, 359] засвідчує, що перспективними методами отримання ППМ, є методи, які направлені на їх створення з анізотропною структурою, у яких розміри та кількість пор змінюються в напрямку фільтрації.

Спосіб отримання ППМ, що описаний у роботі [164], включає пресування із металічного порошку заготовки трубчастої форми будь-яким відомим методом, спікання при температурі 0,7-0,9 температури плавлення. У роботі [165] описаний спосіб отримання виробів із анізотропною структурою, який включає формування плоскої заготовки із порошку, її спікання та деформування способом згину по циліндричній або сферичній поверхнях. У роботі [362] описаний метод отримання виробів, що передбачає в себе деформування спеченої заготовки методом холодної прокатки.

Недоліками вищеперерахованих способів отримання ППМ є невисока проникність отримуваних виробів, що пов'язана з відносним зменшенням загальної пористості.

Спосіб гарячого пресування металічних порошків з регульованою по товщині виробу пористістю за рахунок різного ущільнення описано у літературі [363]. Недоліком вказаного способу є те, що він має обмежені технологічні можливості з виготовлення виробів складної конфігурації.

До високоефективних ППМ з неоднорідною пористою структурою відносять багатошарові, у яких кожний шар виготовлений із порошків різного гранулометричного складу. Фільтрувальні вироби з таких матеріалів мають брудоємність, термін служби та продуктивність набагато вищу, ніж одношарові фільтри [364].

До найбільш перспективних способів отримання ППМ зі змінною пористістю і розмірами пор можна віднести способи вібраційного формування металічного порошку [166-168], а також спосіб пошарового формування порошку з пороутворювачем [177-179].

Із аналізу даних сучасних технологічних процесів отримання ППМ видно, що процеси консолідації на етапі формування заготовок мають вирішальний вплив на якість та економічні характеристики при виготовленні таких виробів.

Перспективною технологією отримання багатошарових ППМ є сухе радіально-ізостатичне пресування (СР-ІП) [243], коли форма з матеріалом, що ущільнюється, ізольована від робочої рідини, та створення відповідного

устаткування. Радіальна схема ущільнення дозволяє реаліовувати основні позитивні ознаки при виготовленні ППМ, які властиві традиційним методам формування при мінімальній кількості недоліків.

Саме тому при виготовленні високопористих ППМ зазначеним вимогам найбільше відповідає радіальна схема пресування, і вона може бути основою для створення нових та вдосконалення наявних технологій виготовлення ППМ, обладнання та інструменту, нового виду продукції – багатошарових фільтрів різноманітного призначення [183, 221].

Із аналізу літературних джерел видно, що переважна більшість наявних технологій спікання ППМ містять тільки один внутрішній параметр стану матеріалу – пористість [43, 45, 153, 116, 246, 283].

Спікання сформованих заготовок є однією з важливих технологічних операцій, які застосовуються при виготовлені ППМ, призначення якої полягає у наданні виробам, що спікаються, визначеної пористої структури і відповідних експлуатаційних властивостей [256].

Основними технологічним параметрами процесу є температурний режим, середовище спікання тощо. На процес спікання впливає і тиск пресування вихідних заготовок. Зі збільшенням густини пресовок усадка зменшується, так як відносне збільшення густини при спіканні більше у заготовках, які спресовані при менших тисках [372].

Найбільш поширені при спіканні ППМ є водень, дисоційований аміак, аргон, вакуум. Для спікання ППМ застосовують печі періодичної і безперервної дії, які в свою чергу поділяються на вакуумні, ковпакові, конвеєрні, товкальні та ін [373].

Основними характеристиками ППМ, як відомо, є розміри пор і коефіцієнт проникності. Саме вони закладаються в основу при виборі пористого матеріалу для практичного використання. Однак, в процесі експлуатації ці матеріали піддаються певному силовому навантаженню. Тому велике значення має міцність ППМ, і саме тому виникає зацікавлення у визначені таких режимів спікання заготовок, які забезпечують необхідну величину міцності. Для визначення оптимальних режимів спікання ППМ різної дисперсності необхідно встановити такі значення температури, яке б забезпечило досягнення межі міцності при згині $\sigma_{3r} = 30-40$ МПа [374].

1.2.3. Методи підвищення корозійностікості ППМ. Сучасний етап розвитку матеріалознавства та порошкової металургії супроводжується появою нових ідей створення та вдосконалення технології отримання ППМ, які, перш за все, направлені на досягнення високих експлуатаційних характеристик та зниження собівартості ППМ [27, 35].

Основними методами підвищення опору зношуванню і протикорозійного захисту легких сплавів можна вважати:

- електрохімічне осадження твердого хрому, нікелю та інших металів і сплавів або КЕП на їх основі [216];
- вакуумне осадження покриттів, у тому числі іонна імплантація [95];
- різні види оксидування;
- лазерне модифікування поверхні шляхом оплавлення, у т.ч. введення у поверхневий шар дисперсних частинок карбідів, оксидів, нітридів та інші [150, 199].

Є різноманітні технології одержання композиційного порошку, в тому числі й з плакованою оболонкою [98-100]. Такі способи плакування порошків мають свої переваги і недоліки.

Наприклад, поверхневе електролітичне осадження (рис.1.6) металів не дає можливості безпосередньо захищати неелектропровідні порошки, оскільки потрібна попередня металізація їх іншими способами. Нівелюється також можливість плакування порошків карбідами, нітридами та іншими твердими сполуками. Електролітичні і хімічні покриття застосовують для відновлення і зміцнення деталей (хромування, залізнення, нікелювання), захисту від корозії і надання деталям гарного зовнішнього вигляду (нікелювання, хромування, цинкування, кадміювання та ін.).



Рисунок 1.6 – Схема установки для електролітичного осадження металу: 1 – матеріал покриття(анод); 2 – виріб(катод); 3 – ванна; 4 – електроліт

Завдяки хімічній металізації порошків можна формувати одно- і багатокомпонентні шари на різних порошкових матеріалах (рис.1.7). Недоліком цього способу є необхідність промивання і сушіння порошків.



Рисунок 1.7 – Схема хімічної металізації

Серед поширених вакуумних технологій конденсації металевих плівок особливе місце посідає метод іонно-плазмового розпилення металів (рис.1.8) в умовах дугового розряду [101]. Цей перспективний метод плакування порошків завдяки своїм фізико-технологічним можливостям дає змогу забезпечувати

рівномірну металеву оболонку з високими швидкостями осадження і часткою металевого конденсату до 25%. При цьому можна формувати складні композиції кераміки з різними зв'язками, в тому числі й при пошаровому осадженні різних металів. Негативним чинником у процесі плакування в окремих випадках може стати висока температура на поверхні, в результаті чого частинки порошку активно злипаються, утворюючи конгломерати.



Рисунок 1.8 – Схема установки іонно-плазмового напилення: 1 – ковпак, 2 – опорна плита, 3 – прокладка, 4 – підкладка, 5 – утримувач, 6 – розжарю вальний катод, 6, 7, 9 – електроди, 8 – штуцер

Варіант реактивного (хімічного) іонно-плазмового напилення відкриває ті ж можливості отримання оксидів, нітриду і інших з'єднань, що і реактивне катодне напилення.

Крім того, при вакуумно-дуговому плакуванні можна переміщувати і перемішувати порошок за допомогою вібраційних пристроїв.

Отже, дослідження щодо вдосконалення та оптимізації технологічних процесів вакуумно-конденсаційного осадження плівок на порошкові суміші, є актуальними і спрямовані на створення якісного плакованого порошкового матеріалу для подальшого його використання, у тому числі і для газотермічного напилення покриттів. У методах і технологічних особливостях вакуумного конденсаційного напилювання покриттів є багато загального. У зв'язку з цим доцільно розглянути узагальнену схему процесу (рис.1.9).



Рисунок 1.9 – Узагальнена схема процесу вакуумного конденсаційного напилювання покриттів: 1 – базова плита; 2 – камера; 3 – матеріал , що розпилюється; 4 – підведення енергії для розпилення матеріалу; 5 – потік розпилюваних частинок; 6 – заслінка; 7 – напилюваний виріб; 8 – покриття; 9 – наповнювач робочого газу; 10 – екран.

Головними перевагами зазначеного методу є його простота і можливість отримати виключно чисті плівки (при високому вакуумі). Проте у нього є і серйозні недоліки: важкість напилення тугоплавких матеріалів і неможливість відтворення на підкладці хімічного складу речовини, що випарюється. Останнє пояснюється тим, що при високій температурі хімічні сполуки дисоціюють, а їх складові конденсуються на підкладці роздільно. Природною є вірогідність того, що нова комбінація атомів на підкладці не відповідатиме структурі початкової молекули [102].

Електрометалізаційне, або, як його ще називають, електродугове напилення, є одним зі способів нанесення металевих покриттів на металеві і неметалеві поверхні. Електродугове напилення застосовують давно, в основному для одержання цинкових і алюмінієвих антикорозійних покриттів, а також нанесення зносостійких та відновних покриттів. Захисне покриття отримували шляхом розпилення суцільного дроту за допомогою електродугового металізатора з модифікованою розпилювальною системою (рис.1.10), де електрична дуга горить в каналі розпилювальної головки, що дозволяє одержувати дрібнодисперсні покриття [103].



Рисунок 1.10 – Процес електродугового напилення: 1 – дроти; 2 – повітряний струмінь; 3 – корпус розпилювальної головки; 4 - підклад

Процес нанесення покриття на зразок передбачає такі операції: знежирення зразка; дробоструменеву обробку; напилення зразків; контроль якості напилення; шліфування зразків.

Для нанесення корозійностійкого захисного покриття на деталях конструкційного призначення активно використовують метод плазмоелектролітного оксидування (ПЕО), який є одним із найбільш сучасних і перспективних методів отримання на поверхні металів і сплавів захисних шарів, що володіють комплексом важливих характеристик. Властивості отриманих покриттів визначаються складом електроліту і режимами процесу ПЕО. Для здійснення направленого синтезу поверхневих шарів заданого складу на металах і сплавах в режимі плазмового електролітичного оксидування при виборі складу електроліту і режимів оксидування необхідно керуватися рядом положень, в тому числі враховувати можливість зміни форм знаходження аніонних комплексів в розчині залежно від величини рН як в об'ємі електроліту, так і в локальній області приелектродного простору [33-38].

1.3. Аналіз наявних математичних моделей процесів фільтрування ППМ

Процес фільтрування через ППМ є ефективним способом розв'язання різноманітних проблем, які пов'язані зі затриманням з рідин, газів, повітря різноманітних частинок, а також домішок мікро-, наноступеня дисперсності. Проте прогрес у цьому досягається і емпіричним шляхом чи за допомогою математичних моделей із використанням теоретичних методів. Тому класифікація ППМ повинна здійснюватися за законами їх функціонування та експлуатації.

Найбільш відомі математичні моделі процесів фільтрування через пористі середовища при дослідженні фільтраційних властивостей – це моделі Ізбаша [109, 110], Патрашева [111], що пов'язують коефіцієнт фільтрації *k* з пористістю *θ*:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{k}{\theta} \left[\left(1 - A\Psi \frac{\theta}{k} \right) \frac{\partial \theta}{\partial t} + A\Psi \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right], \tag{1.1}$$

ge A = const;

$$\psi = \frac{\Delta}{8\pi\mu};$$

μ - динамічна в'язкість рідини;

Δ - вага одиниці об'єму рідини;

h – витрата напору.

У роботі [106] А.Н. Патрашев описував процес фільтрування через пористі середовища замкнутою системою диференціальних рівнянь, а саме встановлювалася попарна залежність між всіма функціями, що характеризують даний процес як функціями однієї змінної – часу і відповідно шляху руху потоку. На підставі знайдених залежностей були отримані рівняння, які дозволили встановити вигляд кожної з цих функцій. Але не зважаючи на цілком задовільне експериментальне підтвердження, на даний час модель А.Н. Патрашева в теорії фільтрування не використовується. Це пояснюється наявністю більш простих і адекватних математичних моделей.

Критеріальний підхід для опису процесів фільтрування ППМ використовувався у роботах [63, 64]. Недолік даної теорії полягає в тому, що в ній не враховується дія гравітаційних та інерційних сил, тиску, гідродинамічних сил та інших факторів, які визначають ефективність процесу фільтрування.

Експериментально встановлено [117, 119], що в процесі фільтрування води через ППМ можуть утворюватися накопичення бруду, які руйнуються під дією гідродинамічних сил потоку. Для цього явища використовується рівняння балансу В.В. Кленового [95], яке має вигляд:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \ln\theta}{\partial x} (k_1 C_0 v), \qquad (1.2)$$

де $\sigma(x, t)$ – насиченість завантаження осадком (об'єм осаду на одиницю об'єму завантаження);

*C*₀ – концентрація бруду у вихідній воді;

 ϑ – швидкість потоку;

*k*₁ – масообмінний коефіціент.

Його розв'язок, знайдений за допомогою методу відокремлення змінних, дозволив встановити залежність коефіцієнту брудомісткості від крупності зерен ППМ і величини фільтраційної витрати. Показано, що вплив швидкості фільтрування на характер розподілу бруду по ППМ знижується при її зростанні.

Аналогічний підхід використано в роботі [98], а саме концентрація на виході ППМ задавалась емпірично, як функція концентрації на його вході і швидкості фільтрування. На жаль, область, у якій застосовувалися дані залежності, є вузькою та непрактичною.

Теорія процесу фільтрування, зміни геометрії завантаження і розподілу швидкостей у порах ППМ була запропонована в [43-46]. Для ППМ рівномірним розподілом пор було отримане таке співвідношення (1.3):

$$\frac{k}{k_0} = \left(1 + \frac{a\theta}{\theta_0}\right)^1 \left(1 - \frac{\theta}{\varepsilon_0}\right)^n \left(1 + \frac{\theta}{\theta max}\right)^m,\tag{1.3}$$

де k_0 , k – початкове і поточне значення коефіцієнту фільтрації;

s – насиченість завантаження осадом;

 θ_0 – початкова пористість ППМ;

а, *l*, *n*, *m* – емпіричні сталі.

Співвідношення (1.3) є достатньо загальним, так як при відповідному виборі *l*, *n* і *m* воно виконується у всіх попередніх теоріях, крім теорії Д.М. Мінца. У результаті в [121-123] експериментальних досліджень з'ясувалося з певною точністю характер властивостей вихідних частинок забруднювача, структуру функцій рівняння та сталих.

На підставі проведених експериментальних досліджень, а також застосування теорії руху рідини запропоновано наступну систему рівнянь [35], яка моделює процес очищення води за допомогою ППМ:

$$\begin{cases} a \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial t} = -\lambda_m c, \\ v \frac{\partial c}{\partial x} + (1 - \theta) \frac{\partial \sigma}{\partial t} + (\theta_0 - \theta) \frac{\partial c}{\partial t} = 0, \end{cases}$$
(1.4)

де λ_m – модифікований коефіцієнт фільтрування;

 $\sigma(x, t)$ – насиченість осаду;

 θ_0 , θ – початкова і поточна пористість завантаження,

a=const.

Дана модель також не дістала широкого розповсюдження, зокрема тому, що для визначення залежності λ_m – у відповідності з виразом:

$$\lambda_m = B\left(\frac{x}{\varepsilon - \sigma}\right)^A$$

необхідно проведення спеціальних експериментів з метою знаходження сталих *A* і *B*.

За теорією фільтрування [155] видно перевагу математичних моделей, в яких закон збереження маси записаний як окреме рівняння. Вказані моделі узагальнено можна подати так:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + V \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \tag{1.5}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \beta(\rho)C - \varphi(\rho), \qquad (1.6)$$

за умов

$$c|_{x=0} = c_0 = \text{const}, \rho|_{z=0} = 0,$$

Рівняння (1.5) є рівнянням матеріального балансу, тобто виражає закон збереження маси, а (1.6) – це рівняння кінетики, яке відображає той факт, що швидкість росту щільності насичення завантаження осадом $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ дорівнює різниці мас захоплених за одиницю часу домішкових частинок $\beta(\rho)c$ і відірваних за той же час частинок осаду $\varphi(\rho)$.

Вивченням процесів фільтрування через ППМ, а також факторів, які впливають на хід процесу фільтрування, також займалися зарубіжні вчені: L. Song, J.E. Saiers, Skopp, T. Baumann, R.E. Martin, R. Rajagopalan та ін. [47, 114, 135].

При моделюванні процесів фільтрування їх компоненти (дифузія, масообмін, кількість рідини, осаду тощо) не виглядають рівнозначно - одні із них переважають над іншими. Диференціальні рівняння, що описують такі процеси як правило містять малі параметри, а відповідні задачі доцільно розв'язувати з допомогою асимптотичних методів, методів малого параметру тощо [7, 17].

Одним із перспективних методів опису процесів фільтрування є статистичне моделювання. Це пов'язане з тим, що поведінка конгломерату частинок

забруднювача у завантаженні ППМ підкоряється стохастичним законам. Відомі на даний час статистичні моделі не чисельні і, фактично не пов'язані між собою, а також з основними морфологічними моделями. Тому доцільно розглянути найбільш вагомі з позицій можливого узагальнення використаного опису процесу фільтрування.

Фільтрування малоконцентрованих суспензій як стохастичний процес розглядався також у роботі [44, 89].

Наявні методи статистичного опису процесів фільтрування не дозволяють отримувати відповідні детерміновані моделі. Більш того, не точним є взаємозв'язок усіх методів опису, що розглядаються, а також можливі шляхи їх узагальнення з метою розробки єдиного методу моделювання процесу очищення рідин шляхом фільтрування через ППМ.

1.4. Пористість як основний показник, що визначає фільтрувальну здатність ППМ

Вперше проблема масопереносу в пористому середовищі в середині XIX в. була описана в роботах французького інженера Г. Дарсі, який опублікував теоретичну роботу з аналізом експериментальних даних і висновком відомого співвідношення між швидкістю течії рідини і градієнтом тиску (або напору) в проникному середовищі [40, 122, 138].

Великий внесок у формування сучасної теорії фільтрації в насиченому пористому середовищі був зроблений завдяки дослідженням С. Ергун, В.І. Аравіна і С.Н. Нумерова, В.Н. Миколаївського, А. Е. Шейдеггера, Д.А. Ефроса, Р. Коллінза, В.М. Тіва, Ф.А. Дюллена, М.І. Швідлера і багатьох інших вітчизняних і зарубіжних учених [83-88].

У даний час в гідро- і термодинаміці пористого середовища різні потоки води та газу часто виражають феноменологічно за допомогою лінійних рівнянь виду:

$$\mathbf{J} = k \times X,\tag{1.7}$$

60

де J - інтенсивність відповідного потоку;

k - коефіцієнт переносу маси або енергії в даному потоці;

Х – узагальнена рушійна сила, що викликає перенесення.

Слід зауважити, що виразити математично фільтраційний або дифузний потік так, щоб формули відображали реальне переміщення потоку по поровому простору вкрай складно, тому рівняння (1.7) описує процеси переносу як єдиний рух фіктивного суцільного середовища через деякий простір, яке насправді зайняте пористим середовищем. Однак необхідно пам'ятати, що рівняння цього виду описує модельну картину, засновану на гіпотезі суцільного середовища і має цілком певні обмеження.

Гідравлічні опори під час руху рідини в пористому середовищі пропорційні швидкості потоку і в'язкості рідин. Ці опори аналогічні опору тертя при русі рідини в трубах. Але на відміну від руху рідини в трубах характер її течії в мікронеоднорідному пористому середовищі має свої особливості [37].

Якщо уявити фільтрувальний шар у вигляді паралелепіпеда (рис.1.11), сторони якого паралельні осям координат і мають довжину dx, dy, dz, то відповідно кількість речовини q, що дифундує в одиницю часу через грань dx, dy, на вході в фільтрувальний шар, визначається таким рівнянням (1.8) [99-104]:



Рисунок 1.11 – Дифузія водо- та газовикидів через фільтруючий шар ППМ

Відповідно на виході кількість речовини $q_{\textit{вих}}$:

$$q_{\rm BMX} = dxdy(P_z + \frac{\partial P_z}{\partial z})dz \tag{1.8}$$

Зміна кількості речовини Δq , яка дифундує в одиницю часу через площу dx, dy визначається виразом 1.9:

$$\Delta q = dxdy\left(P_z - \frac{\partial P_z}{\partial z}dz\right) - dxdy\left(P_z + \frac{\partial P_z}{\partial z}dz\right) = -4dxdydz\frac{\partial P_z}{\partial z},\qquad(1.9)$$

Важливою характеристикою фільтруючого шару ППМ є пористість, що дорівнює відносній об'ємній частці порового простору в матеріалі. Пористість визначає кількість рідини, яке може утримуватися в деякому обсязі пористого середовища (якщо рідина цілком заповнює цей простір) [131, 180]. Якщо для зразка з однорідною пористістю матеріалу об'ємом V обсяг пор складає Vn, то коефіцієнт пористості цього зразка буде рівним:

$$m = \frac{V_{\rm n}}{V} = \frac{S_{\rm nop}L}{SL} = \frac{S_{\rm nop}}{S},\tag{1.10}$$

Якщо уявити пори у вигляді капілярів циліндричної форми, то їх площа відповідно складе:

$$S_{\text{nop}} = n\pi r^2, \qquad (1.11)$$

де *n*, *r* - число і радіус пор відповідно.

Таким чином, рівняння (1.10), перетвориться до виду:

$$m = \frac{n\pi r^2}{s},\tag{1.12}$$

У разі, якщо відомі об'єм, маса пористого тіла і щільність компактного матеріалу, пористість П можна визначити відповідно до рівняння (1.13):

$$\Pi = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\rm H}},\tag{1.13}$$

Пори в ППМ діляться на наступні типи [153, 154]:

- відкриті пори (По), які сполучені з поверхнями пористого тіла і беруть участь
 фільтрації рідини або газу при наявності градієнта тиску;
- тупикові (*Пт*) частково заповнюються рідиною, але не впливають на проникність пористого матеріалу;

— закриті (Пз) не беруть участі в фільтрації рідини або газу.

Таким чином, загальна пористість матеріалу становить:

$$\Pi = \Pi_o + \Pi_m + \Pi_{3,} \tag{1.14}$$

Різниця між повною і ефективною пористістю можна узагальнити коефіцієнтом об'ємної зв'язності k_{VS} :

$$k_{VS} = \frac{\Pi_{VS}}{\Pi_{VO}},\tag{1.15}$$

Цей коефіцієнт приймає значення від $k_{VS}=0$ в стані повної компактності до $k_{VS}=1$ при повністю відкритій структурі порового простору. Розподіл пористості в матеріалі можна визначити різноманітними сучасними методами [8, 132, 136].

Важливою характеристикою пористого середовища є показник просвіту S(n)що є відношенням площі просвітів Sp в перетині до площі всього перерізу S:

$$S(n) = \frac{s_p}{s},\tag{1.16}$$

Величина просвіту залежить від того, через яку точку і в якому напрямку проводиться зріз ППМ. Тому пористість і просвіт є різними математичними

об'єктами і хоча між ними існує зв'язок, звичайне ототожнення цих понять є помилковим, оскільки поняття просвіту є більш складним [158].

Для визначення фільтраційної здатності пористого матеріалу важливе значення має розподіл пор за розмірами, цей розподіл може бути нормальним:

$$f_i = \frac{1}{(\sqrt{2\pi\sigma})^2} \exp\left[-\frac{\left(d_{n_i} - d_{n_{\rm cp}}\right)^2}{2\sigma^2}\right],\tag{1.17}$$

Щільність ймовірності розподілу *f_i* і середньоквадратичне відхилення о визначається співвідношеннями (1.18, 1.19):

$$f_i = \frac{\Delta V_{n_i}}{\Delta d_{n_i} \sum_{i=1}^{n} \Delta V_{n_i}},\tag{1.18}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n} \left(d_{n_{i}} - d_{n_{cp}}\right)^{2} \Delta V_{n_{i}}}{\sum_{1}^{n} \Delta V_{n_{i}}}},$$
(1.19)

при кількості інтервалів розмірів пор $\Delta d_{ni} = n$.

Логарифмічно нормальний розподіл, визначається співвідношенням:

$$f_{i} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} lg\sigma} \exp[-\frac{(lgd_{n_{i}} - lgd_{n_{\rm cp}})^{2}}{2lg^{2}\sigma}],$$
(1.20)

Розподіл пор за розмірами використовують для визначення таких розповсюджених характеристик, як максимальний і середній розміри пор.

1.5. Висновки і постановка завдань досліджень

На сьогоднішній день в нашій державі накопичено 25 млрд. т твердих промислових відходів. Інвентаризація та статистична звітність за останні 10 років свідчить, що на підприємствах України щороку утворюється 1 млрд. твердих промислових відходів. Із них 100 млн. т токсичних, а 2,5...3,5 млн. т високотоксичних, які за європейськими стандартами належать до першого класу небезпеки. Кількість підприємств, на яких фіксують токсичні відходи перевищує 2500. Загальний обсяг накопичення токсичних відходів становить 4,5 млрд. т, а поточні витрати на їх утримання становлять щорічно більше 25% від вартості виробленої продукції.

Проаналізувавши сучасні тенденції створення ППМ, виникає необхідність у комплексному дослідженні та розробці науково-практичних принципів прогнозування, моделювання структури та властивостей ППМ з відходів промислового виробництва, розробці нової, на основі наявних, технології отримання порошкових виробів з підвищеними механічними та функціональними властивостями із регульованою пористістю для очищення рідин та газів на основі комп'ютерно-інформаційних технологій.

Це підтверджується необхідністю та своєчасністю розробки даних принципів концептуальних підходів та технологічних принципів управління процесами створення ППМ з відходів промислового виробництва.

Ряд актуальних питань було вже вирішено [75, 77, 78, 83-85, 88, 159-207], зокрема:

- обґрунтована та експериментально підтверджена ефективність використання для одержання ППМ порошків сталі ШХ15, що отримані у результаті утилізації шліфувальних шламів підшипникового виробництва;
- удосконалена схема сухого радіально-ізостатичного пресування з метою отримання довгомірних градієнтних проникливих матеріалів та запропоновані нові конструкції інструменту для реалізації методу СР-ІП з використанням стандартного пресового обладнання;

- вперше проведено комплексне дослідження впливу пороутворювача на формування структури градієнтних пористих проникливих матеріалів.
 Показано, що спрямоване регулювання структури ППМ дає можливість підвищити ступінь очищення при одночасному збільшенні проникливості та брудоємності фільтрів;
- вперше запропонована та експериментально відпрацьована технологічна схема поетапного формування градієнтних фільтрів. Показано, що використання як пороутворювача порошку карбаміду CO(NH₂)₂ дає можливість регулювати пористість шарів, оптимізувати їх товщину та забезпечити у фільтрах високі експлуатаційні властивості.

Тому на основі проведеного аналізу проблем прогнозування та створення ППМ, огляду існуючих методів, засобів, моделей їх розробки та застосування було показано, що актуальним є проведення теоретичних та експериментальних досліджень, які спрямовані на отримання багатошарових фільтрувальних пористих проникних матеріалів з відходів промислового виробництва (порошку сталі ШХ15) із 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.

Зважаючи на щойні зауваження, виникли такі завдання досліджень:

- створити нову, на основі наявних, технологію отримання порошкових виробів з підвищеними механічними та функціональними властивостями на підставі моделювання процесів, які відбуваються при отриманні порошкових та гранульованих матеріалів;
- на основі континуальної теорії пластичності пористого тіла виготовленого методом радіально-ізостатичного пресування розробити теорії прогнозування розподілу пористості за перерізом ППМ;
- розробити методи розрахунку моделей випадкових пор у ППМ на етапі засипки матеріалу в бункер з урахуванням фізичної основи складових компонентів вихідного матеріалу;

- визначити фактори, які сприяють неоднорідності розподілу пористості при радіально-ізостатичному пресуванні ППМ та становити взаємозв'язок між технологічним режимами отримання ППМ і експлуатаційними характеристиками готового продукту;
- розробити комп'ютерно-імітаційні моделі для оптимізації технологій отримання виробів з порошків на всіх етапах їх виготовлення для отримання складових пористих циліндрів методом радіально-ізостатичного пресування;
- експериментально дослідити та апробувати пористі структури ППМ, які мають відповідати оптимальному поєднанню експлуатаційних характеристик у процесі роботи;
- розробити нову технологію для нанесення комбінованих покриттів для пористих проникних матеріалів для підвищення корозійностійкості;
- впровадити у виробництво технологію створення багатошарових ППМ з відходів промислового виробництва для очищення рідин та газів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Створення та розробка ППМ неможлива без вимірювання та контролю властивостей вихідних матеріалів і готових виробів. Головним у цьому також є виявлення взаємозв'язку між структурою та властивостями ППМ в умовах розробки та експлуатації. Саме тому в рамках цієї роботи було застосовано комплексний підхід до проведення досліджень із застосуванням сучасних апробованих методик і обладнання для проведення експериментів, технологічного контролю процесів виготовлення матеріалів, створення ППМ і нанесення захисних покриттів, точної обробки експериментальних даних, що забезпечило б отримання достовірних результатів досліджень.

Тому вивчення методів та дослідження властивостей вихідних порошків для подальшого створення ППМ є досить актуальним та практичним завданням.

2.1. Характеристика матеріалу та об'єкту дослідження

За останній період часу основну увагу фахівців усе більше привертає проблема переробки відходів виробництва – стружки, шламів, шлаків у металевий порошок, який застосовується як вихідний матеріал при виготовленні різних деталей машин [80]. Розроблено ряд технологічних процесів отримання металевих порошків зі стружки чавуну і сталей, шліфувальних шламів шарикопідшипникової сталі ШХ15 [187].

Перспективними для подальшого використання є відходи, що утворюються в процесі шліфування кілець шарикопідшипників, які виготовлені зі сталі ШХ15, так як в них міститься значна кількість легуючих елементів, таких як Cr, Mn, Si [172].

Відомо, що в ПАТ СКФ-Україна кожен рік утворюється до 400 тонн відходів (шламів), що містять 60–70% металевих фракцій, які практично не переробляються, а вивозяться в спеціальні захоронення або на звалища,

погіршуючи тим самим екологію, що призводить до виплати суттєвих штрафів підприємствами. У роботі [111] дослідженні основні властивості шламу сталі ШХ15. Встановлено, що хімічний склад шламу ШХ15 за вмістом Cr, Mn, Si практично не відрізняється від хімічного складу сталі ШХ15 до її шліфування. Хімічний склад порошку, який ми одержали зі шламу сталі ШХ15, що обробляється при виготовленні підшипників на ПАТ СКФ - України вивчали за допомогою спектрографа марки СТЭ-1. В таблиці 2.1 наведені результати дослідження.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад відходів промислового виробництва порошку сталі ШХ15 та сталі ШХ15

Матеріал	Вміст хімічних елементів, (%)								
	С	Si	Ni	Mn	Cr	O ₂	Cu	Р	
Порошок сталі ШХ15 після утилізації	1,5	0,3	0,16	0,15	1,44	1,2	-	0,037	
Сталь ШХ15	0,95 ÷ 1,05	0,17	0,30	0.20÷ 0.40	1.30 ÷ 1.65	-	0,2÷ 0,37	0,027	

Визначено, що в шліфувальному шламі є абразивні включення, форма і розмір яких залежить від типу шліфувального круга і режимів шліфування. Об'ємна доля абразивних часток в шламі ШХ15 становить 4,7...12,4%, а розмір таких часток 0,0146...0,272 мм. Шліфувальний шлам – це конгломерат, який містить певну кількість міцно щеплених між собою елементарних мікрозавитків різної форми довжиною 40...114 мкм, шириною 10...25 мкм і товщиною 0,6...1,2 мкм. Шлам має низьку густину у вихідному стані, яка в 68....86 разів менша густини сталі ШХ15. При нагріванні шламу в середовищі повітря до температури, вищої точки Кюрі, він втрачає здатність намагнічуватись, суттєво

окислюється. Шлам ШХ15 має сильно розвинуту поверхню, яка рівна $5,52 \ m^2/c$ що в 3,8...18,4 разів вища питомої поверхні звичайних порошкових матеріалів.

Шліфувальні шлами мають ряд переваг [171, 172]:

- високий вміст металу;
- наявність легуючих домішок, що дозволяють використовувати порошок для фільтрувальних матеріалів;
- невисока ступінь окислення металевих частинок.

Шліфувальний шлам за зовнішнім виглядом – порошкоподібний продукт характерного для окислів заліза чорного кольору, що містить грудки (рис.2.1); вміст заліза – 60–85 %; вміст двоокису кремнію – 25 %; вологість – 10 %; насипна густина – 0,32–0,40 г/см³, пікнометрична густина – 5,29 г/см³.

За гранулометричним складом порошок сталі ШХ15, отриманий із шліфувального шламу, відповідає певним вимогам [382].

Дещо менший вміст хрому в шламових частинках, ніж в сталі ШХ15, пояснюється тим, що частина його міститься в окислах, які входять у нерозчинний осад. У нерозчинному осаді міститься 11,9 % хрому, 35 % заліза, 12 % кремнію. Після шліфування деталей, які піддаються окисленню, в шламі також вміщується іржа.



Рисунок 2.1 – Порошок сталі ШХ15 отриманий із шліфошламу ×280

Технологічна схема утилізації підшипникового шламу [159, 160] дає можливість отримувати високоякісний металевий порошок з частинками регулярної форми та розмірів (рис.2.2).



a)

б)

Рисунок 2.2 – Частинки порошку сталі ШХ15 отримані за новою технологією переробки шламових відходів: а) ×250, б) ×500

Форма частинок порошку визначалася за ГОСТ 18318–73 і металографічним методом. Для цього частки порошку різних партій заливалися у спеціальні обойми акриловим компаундом з подальшим виготовленням шліфів. Підготовка шліфів проводилася за методикою [248].

Характер розвиненості поверхонь частинок, розподіл структурних складових в об'ємі матеріалу досліджували на модульному комплексі Dimic 1000 (рис.2.3), який є оптичною 3D–системою контролю і складається з блоків зчитування, обробки та представлення інформації.

Гранулометричний склад порошку досліджувався методом ситового аналізу, з використанням вібросита моделі 029 № 124–85 (ГОСТ 18318–94).

Насипна густина порошку визначалася за ГОСТ 19440-94.



Рисунок 2.3 – Схема (а) та загальний вигляд (б) модульного комплексу оптичного аналізу зображень Dimic 1000: 1 – стенд; 2 – багатоволоконний оптичний кабель;3 – контролер; 4 – відеооптична система; 5 – ПК з розробленим програмним забезпеченням

Пікнометрична густина порошку визначалася відповідно до загальноприйнятої методики у пікнометрі об'ємом 25 см³. В якості пікнометричної рідини використовували толуол. Вакуумування порошку і рідини не проводили.

Текучість порошку визначали за методикою передбаченою ГОСТ 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.

Щільність 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 [162]. Частота вібрацій – 22,3 Гц, час ущільнення – 15 с. Для підвищення формуємості в такі порошки вводять допоміжні матеріали, спеціальні зв'язки (парафін, 12%-ний водний розчин полівінілового спирту), які потім виводяться або в процесі спікання, або відразу після спікання заготовки. Покращенню формуємості може сприяти також використання пороутворювача, наприклад, порошок карбаміду CO(NH₂)₂ [375].

Порошок карбаміду CO(NH₂)₂ у якості пороутворювача був вибраний за такимиперевагами:

- оптимальними є пороутворювальні добавки, які в процесі спікання розчиняються без утворення рідкої фази при температурі нижче температури спікання, та без утворення компонентів, які забруднюють основний матеріал [196, 195];
- пороутворювач повинен бути змазкою та зв'язкою, зменшуючи вплив тертя при пресуванні, тим самим покращуючи пресування та формування [364].

На рис.2.4 представлена фотографія порошку карбаміду CO(NH₂)₂. Форма частинок пороутворювача має форму волокон різної довжини та діаметру (довжина лежить у межах 100–300 мкм, діаметр – 10-50 мкм).



Рис.2.4 – Фотографія частинок порошку карбаміду CO(NH₂)₂

Враховуючи, що характеристикою формуємості порошку є його здатність зберігати надану йому в результаті пресування форму, при якій пресовки після видалення з прес-форми не осипаються і не мають розшарувань [375], а також
те, що чим більша пористість, тим вища проникливість, нами вибрана величина міцності на стиск мінімальною (σ_{ст}=1 МПа), а величина тиску пресування лежала в межах 5-100 МПа.

Результати досліджень впливу на формуємість порошків ШХ15 різних фракцій від вмісту пороутворювача представлені на рис.2.5.



Q, %

Рис.2.5 – Залежність формуємості порошків сталі ШХ15 від вмісту пороутворювача для різних фракцій.

Аналіз результатів дослідження (рис.2.5) досвідчує, що мінімальний вміст пороутворювача значно підвищує формуємість порошку, що досліджу\ться і складає 5-6%. Тому на основі даних результатів при пресуванні заготовок фільтрувальних ППМ із порошку ШХ15 у вихідну шихту вводили не менше 5% карбаміду.

2.2. Обладнання та методика отримання фільтрувальних ППМ з відходів промислового виробництва сухим радіально-ізостатичним пресуванням

У сучасних умовах розвитку науки і техніки при виробництві виробів необхідно прагнути до підвищення ефективності на всіх етапах виготовлення і використання продукції, впровадження маловідходних, енергота ресурсозберігальних технологій. Одним із важливих напрямків порошкової металургії є створення ППМ, працездатність та сфера застосування яких визначається наявністю взаємозв'язаної структури пор. Хоча ця структура формується протягом усіх операцій технологічного процесу, проте вирішальний етап технології – це етап формування заготовок, який визначає не тільки їх структуру, розміри, форму, густину, продуктивність процесу, безпеку і культуру праці, але й впливає на ряд найважливіших властивостей готового продукту. Крім цього, сам метод формування значною мірою залежить від складності форми, геометричних розмірів виробу, його експлуатаційних властивостей тощо.

Тому комплексне дослідження закономірностей процесу ущільнення ППМ, що спрямоване на створення і впровадження вдосконалених технологій, обладнання та інструменту є актуальним науковим і практичним завданням у сфері сучасного матеріалознавства, порошкової металургії та обробки матеріалів тиском.

З кожним роком зростає потреба в матеріалах з високою та чітко регульованою пористістю по об'єму виробу. Для сучасної техніки нові раціональні технології, що розробляються, повинні комплексно задовольняти вимоги до властивостей виробів, їх виготовлення, безпеки та культури праці та повинні забезпечувати відносно мінімальні енергосилові параметри, гнучкість виробництва тощо [27, 88, 178].

Аналіз наявних технологічних процесів порошкової металургії засвідчує, що процеси консолідації ППМ на етапі формування заготовок, мають вирішальний вплив на якість та економічні характеристики при виготовленні таких виробів. При цьому традиційні процеси пресування такі як гідростатичне, гідродинамічне, магнітно-імпульсне, еластостатичне, осьове, мундштучне формування, прокатування тощо, володіючи певними перевагами, мають ряд обмежень і тому не повністю вирішують проблему виготовлення якісних виробів [179-181]. Вибір того чи іншого способу формування деталей із ППМ визначається вимогами до властивостей виробу, енергосиловими витратами, видом і культурою виробництва [161, 183].

Для підвищення надійності роботи та довговічності пристрою нами була спроектована вдосконалена установка для пресування ущільнювальних матеріалів різного типу: металічні та керамічні порошки, графіт, волокна, дріт, сітка, тощо (рис.2.6) [77-83].

У запропонованому пристрої жорстка циліндрична рама, що складається із набору пластин, є основним елементом, який сприймає осьові зусилля. Вона здатна витримувати осьові зусилля із великим запасом міцності за рахунок рівномірного розподілення навантаження на кожну пластину окремо і дозволяє розвивати високі тиски пресування. Можливість створювати більш високі тиски дає можливість отримувати вироби з ущільнювальних матеріалів з більшим діапазоном густини, тобто розширює асортимент отриманих виробів без збільшення металоємкості пристрою – фільтрувальні матеріали, кеглі та ін. Пластинчаста рама також дозволяє покращити технологічність конструкції всього пристрою загалом, оскільки корпус у процесі пресування зазнає тільки радіальні та тангенціальні напруження, що значно збільшує його надійність, і, як наслідок, надійність всього пристрою.

Π

0

р

і На рис.2.7 представлений зовнішній вигляд пристрою для пресування нористих порошкових матеріалів.

н Принципова схема пресувального комплексу, який складається з пристрою яля пресування ППМ та каркасу, наведена на рис.2.8.

Η

0



Рисунок 2.6 – 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, 6, 7, 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.



Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд пристрою для пресування пористих порошкових матеріалів



a)



Рисунок 2.8 – Принципова схема (а) та загальний вигляд пресувального комплексу: 1 – пристрій для пресування ППМ, 2 – каркас

2.3. Матеріали та методи нанесення захисних покриттів для ППМ

2.3.1. Матеріали та методи нанесення електродугових алюмінієвих покриттів на метали для їх подальшого оксидування. Покриття отримували шляхом розпилення електродних дротів за допомогою електродугового металізатора ЕМ-17 із модифікованою системою розпилювання [92], за якої електрична дуга горить в каналі розпилювальної головки, що дає змогу одержувати концентрованіший потік метало-повітряної суміші (рис 2.9) і дрібнодисперсні покриття.



Рисунок 2.9 – Процес напилення

Металізатор живили постійним струмом із використанням випрямляча для зварювання (типу ВДУ-505). Параметри напилювання зразків після дробоструминного оброблення подано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри напилювання

сила струму, А	120
напруга, В	32
віддаль від сопла до поверхні	
напилювання, мм	120
тиск повітряного струменю, МПа	0,6

Для очищення стисненого повітря від твердих частинок, води і мінерального мастила використали фільтр для відділення вологи (типу 23–25–4–4ХЛ4). Перед нанесенням покриттів для збільшення шорсткості поверхні зразки обробляли абразивом. Для цього використали дробоструминний апарат інжекційного типу. Струмінь повітря під тиском 0,6 МПа забезпечував швидкість переміщення дробу ≈ 50 м/с. За абразив використали корунд (0,3...0,4 мм в перерізі, ГОСТ-11864-66). Сопло дробоструминного апарату розташовували на віддалі 150...200 мм під кутом 90° до поверхні зразка. Оброблювання тривало 60 с.

2.3.2. Методика формування оксидокерамічних шарів на металах. Оксидокерамічні покриття синтезували на легких сплавах Al, Mg, Ti i на алюмінієвих покриттях, одержаних методом електродугового напилення. Покриття формували в катодно-анодному режимі за співвідношення (Іа/Ік) 1 і 1,5 імпульсним струмом густиною 20 А/дм² в електроліті за раніше розробленою методикою [62] по такій схемі розташування зразків і подання електричних імпульсів (рис.2.10).



Рисунок 2.10 – Принципова схема процесу плазмоелектролітного оксидування: а) електролітна комірка; b) функція напруги; 1 - робочий електрод; 2 - електроліт; 3 - ванна; 4 - контур локалізації іскрових розрядів.

Для дослідження впливу хімічного складу та концентрації електроліту на характеристики отриманих керамічних покриттів вибрано два склади електролітів, а саме: №1: 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла (натрій силікатного); №2: 10 г/л КОН + 15 г/л рідкого скла (натрій силікатного) + 0.1 г/л СгО₂. Умови проведення плазмоелектролітного оксидування подано в табл. 2.3.

Електроліт	Анодний струм I _a ,	Катодний струм I _с ,	Тривалість,
N⁰	кА/м ²	кА/м ²	XB
1	2	2	120
1	2	3	120
2	2	2	90

Таблиця 2.3 – Умови проведення мікродугового оксидування сплаву Д16Т

Збільшення часу обробки зразка дозволяє отримати оксидні покриття товщиною до 500 мкм. Для вибору оптимального часу проведено дослідження кінетики росту керамічного покриття на суцільному сплаві Д16Т. Залежність швидкості наростання товщини останнього визначається параметрами проведення процесу. Цю залежність умовно можна розділити на окремі стадії залежно від товщини покриття (рис.2.11).

Перший етап (близько хвилини) відповідає за формування первинної оксидної плівки. На другому етапі, який умовно можна прийняти у межах від 25 до 100 мкм, швидкість наростання товщини становить приблизно 2 мкм/хв. В інтервалі 100 - 400 мкм (третій етап) швидкість рівна ~ 1 мкм за хвилину. На останньому етапі швидкість наростання товщини оксидного керамічного шару в часі змінюється нелінійно. Крім того, при даних рецептурах електролітів і умовах проведення електродугового оксидування можливе розтріскування покриттів, товщина яких перевищує 500 мкм. Тому, аналізуючи дані кінетики росту покриттів, було вибрано оптимальний час проведення досліду, а саме 90 і 120 хв.



Рисунок 2.11 – Кінетичні криві синтезу товщини оксидокерамічного покриття на монолітному сплаві Д16Т (1) та напиленому покритті із цього сплаву (2) при густині струму 2 кА/м2, співвідношенні Іс/Іа=0,9, електроліт 0,1% КОН + 0,1% рідкого скла



Рисунок 2.12 – Загальний вигляд установки для плазмоелектролітного оксидування

2.4. Розробка методики проведення металографічних досліджень

2.4.1. Теоретичні передумови для розробки алгоритму, який дозволяє використовувати кольорові ознаки зображень мікрошліфів матеріалів. Будь-який метод ідентифікації структури матеріалів для мікроскопічного аналізу грунтується на деякому поданні зображень. Є методи зіставлення, що використовують самі пікселі з відповідними їм значеннями інтенсивності, методи, що здійснюють пошук відповідності між точками контурів або крайовими точками, різними структурними або геометричними елементами, а також між мітками, що позначають конкретні фізичні об'єкти [42, 86]. Але всі наявні системи автоматичного аналізу не вирішують завдання у комплексі, їх головним недоліком є вузька спрямованість і мала гнучкість. Такі системи реалізуюсь лише базові методики, і лише деякі з них повністю автоматизовані.

У сучасних програмних забезпеченнях для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень за основу взято такий алгоритм розпізнання [231]. Нехай B(i, j)- вихідне зображення, значення B(i, j)- дорівнює яскравості в точці $(i, j) \in D$, i = 1,...,n, j = 1,...,m.

Зображення B(i, j) реальної сцени і сукупність зображень окремих об'єктів:

$$B(i, j) = H_1(i, j) + H_2(i, j) + \dots + H_s(i, j)$$
(2.1)

де *s* – число об'єктів сцени;

 $H_k(i, j)$ - зображення k-го об'єкта (k = 1...s).

Задача розпізнання зображення буде в даному випадку складатися із знаходження всіх об'єктів $H_k(i, j)$, що визначаються з критеріїв однорідності області [145]:

$$\frac{\max}{P \in R} |f(P) - m| \langle T$$
(2.2)

де *Т* – порогове значення;

- *P* визначена в *R* область;
- m середнє значення пік селів області P;

f(P) - функція розподілу яскравості.

На основі вище приведеного алгоритму за допомогою даних програм можна обчислити середню яскравість кожного об'єкту за шкалою яскравостей, що визначена у системах. За допомогою даної схеми у виділених програмах для аналізу зображень запропоновано таку послідовність алгоритмів для обробки і одержання характеристик металографічної структури:

- 1. Фільтрування зображення для вилучення випадкового шуму.
- 2. Попередня сегментація направлена на виділення однорідних областей.
- 3. Корекція об'єкту для визначення порогу яскравостей.
- Остаточна сегментація з використанням визначеного фонового значення, що дозволяє повністю визначити об'єкти.
- 5. Аналіз виділених об'єктів для визначення їхніх параметрів.

Взагалі якісний аналіз зображення проводиться для визначення таких параметрів об'єктів: середня яскравість, периметр, площа, мінімальний та максимальний діаметри, фактор форми, коефіцієнт форми та ін. За допомогою таких прикладних програм можливо визначити дані характеристики, необхідні для якісної та кількісної оцінки структури будь-якого матеріалу.

Основним об'єктом дослідження металографічного аналізу є зображення шліфа металу. При цьому точність і робастність методу фотограмметричного мікроаналізу прямо залежить від ефективності використаного подання зображення. Такі подання описують як низькорівневі ознаки зображень – значення інтенсивності окремих пікселів, так і високорівневі ознаки – структурні елементи і їх групи. Один зі низькорівневих методів автоматичного металографічного мікроаналізу – пошук інваріантних ознак, на основі яких відбувається ідентифікація зображень або структурних складових зображення. При цьому, введенні в систему автоматичного аналізу зображення мікрошліфу зазнають впливу негативних факторів, що призводять до змазаності, появі малоконтрастних і зашумлених ділянок і інших геометричних та фотометричних викривлень.

У роботах [156, 200] була розвинена інформаційно-математична модель подання кольорових металографічних зображень у форматі RGB, інваріантна щодо їхніх афінних і фотометричних перетворень. Ця модель визначає моменти кольору M_{pq}^{abc} для інваріантної області Ω так:

$$M_{pg}^{abc} = \iint_{\Omega} x^{p} y^{q} [R(x, y)]^{a} [G(x, y)]^{b} [B(x, y)]^{c} dx dy$$
(2.3)

Інваріантні характеристики зображень у цій математичній моделі визначаються рівнянням:

$$I = \left(X_{\frac{N}{2},\frac{N}{2}}\right)^2 - 2\sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} (-1)^k \frac{\binom{N}{2}!\binom{N}{2}!}{\binom{N}{2}-k-1!\binom{N}{2}+k+1!} X_{\frac{N}{2}-k-1,\frac{N}{2}+k+1} X_{\frac{N}{2}+k+1,\frac{N}{2}-k-1}$$
(2.4)

де *I* – інваріантна ознака, яка визначається еталонним зображенням.

За допомогою цієї моделі відбувається ідентифікація зображень мікрошліфів матеріалів за їх інваріантними ознаками, які визначені для всього зображення. Крім того, одним зі завдань металографічного аналізу є виділення об'єктів на зображенні мікрошліфу металу, для яких необхідно підрахувати значення ознак, на основі яких відбувається розуміння зображення, тобто визначення структурних складових, виділення дефектів і т.п., а також підрахунок різних характеристик зображення (наприклад, відносної долі фази, розміру і кількості включень і т.д.). Розвинена у роботах [201, 222] система інваріантних ознак зображень на основі моделі подання у форматі RGB не вирішує цього завдання.

Відбивна здатність – це здатність металу відбивати світлові хвилі певної довжини, які сприймаються оком людини як колір, деякі з цих кольорів зазначені у таблиці 2.4 [203].

Метал	Колір
Магній	Біло-сірий
Алюміній	Сірувато-білий
Титан	Сірувато-білий
Залізо	Блакитно-білий
Мідь	Червонувато-рожевий
Цинк	Блакитно-білий
Срібло	Білий
Олово	Сірувато-білий
Золото	Жовтий
Свинець	Сірувато-білий

Таблиця 2.4 – Сприйняття кольору людиною відповідно до металу

На сьогодні для металографічну аналізу використовуються кольорові зображення мікрошліфів таких сплавів, як сірі чавуни, сталі та мідні сплави [246, 129]. Кристалічні решітки структурних компонентів цих сплавів можуть відбивати світло в оптичному діапазоні з довжиною хвилі від 380 до 740 нм, тобто кольори від червоного до фіолетового. Кожен із кольорів оптичного діапазону має фізичні характеристики, які можна кількісно виміряти, а саме: спектральний склад, яскравість, насиченість.

Розробка і тестування алгоритму кольорової сегментації робили на основі зображень пористого тіла, отриманих за допомогою рентгенівського мікроскопу, укомплектованого 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, зі спеціальним додатковим окуляром для з'єднання із мікроскопом і для макрофотографування (рис.2.13, рис.2.14).



Рисунок 2.13 – Принципова схема (а) та вид томографа X-TEK 225/230 kV СТ (б)



Рисунок 2.14 – Рентгенівський мікроскоп під час процесу макрофотографування

Вихідне зображення є двовимірним сигналом, контури на зображеннях – одновимірним, а найнижче за рівнем абстракції піксельне подання зображень є безрозмірним (або, умовно, із розмірністю, що дорівнює нулю). Методи отримання таких подань можуть бути різними. Як основи структурних подань зображень можуть бути використані кольорові сегменти на зображенні, що будуються в рамках ознакового підходу [206].

Результат розподілення кольорів за цими сегментами на зображенні для виділення його структурних компонент наведені у таблиці 2.5.

	1	2	3	4	7	8	11	12
Hue (0360)	030	3060	0690	90120	180210	210240	300330	330360
Колір	Червоний	Жовто гарячий	Жовтий	Зелений	Блакитний	Синій	Фіолетовий	Червоний

Таблиця 2.5 – Розподіл кольорів за сегментами

Тому, зважаючи на наведені методи сегментації за кольором [204-206] було апробовано комп'ютерну технологію структурного аналізу на прикладі сучасного пакету прикладних програм Avizo[®], що використовує систему інваріантних ознак по колірних сегментах зображень для більш точної ідентифікації і визначення структури різних металів та матеріалів за їх кольоровими зображеннями [142, 207].

2.4.2. Модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D зображень для пористих проникних матеріалів. Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень для визначення якісних та кількісних характеристик металів або сплавів продиктовано науковими та виробничими завданнями, які з'ясувалися у сучасному матеріалознавстві.

Металографічні зображення можуть бути представлені комбінацією різноманітних структурних складових при різному співвідношенні: фазами з різноманітними розмірами, формою та кольором, а також межами зерен, що можуть бути представлені або окремими лініями на зображенні, або покривати зображення безперервною сіткою. Комбінація цих структурних складових може дати дуже складну картину, для інтерпретації якої програма, що аналізує, повинна мати чималий рівень інтелекту. Тому основну вимогу до якісного аналізу зображень можна сформулювати і поставити так: на отриманій під мікроскопом фотографії необхідно виділити структурні складові, а після цього класифікувати їх за яскравістю, розміром та формою. Практична реалізація цього завдання передбачає такі завдання, які вже стали класичними, як сегментація, фільтрування вад та виділення об'єктів з фону, визначення меж об'єктів, розпізнавання образів [208-210]. Для успішного проведення металографічного аналізу основним залишається питання надійності сегментації зображення. Через складність металографічних зображень немає жодної можливості заздалегідь визначити характеристики об'єктів. Тому процес сегментації повинен бути адаптивним і по можливості виділяти на зображенні всі об'єкти, які цікавлять, незалежно від їхніх розмірів або яскравості. При цьому повинна залишатись можливість втручання оператора в процес розпізнавання, принаймні для корекції об'єкту.

Актуальною залишається проблема дослідження пористості різноманітних проникних матеріалів під час їх експлуатації [41]. Дослідження пористості пов'язане з дослідженням металографічних зображень, на яких зафіксований стан пор на поверхні матеріалу [35, 212]. Параметри пор, зафіксованих на зображеннях, можуть використовуватись для прогнозу проникності, надійності пористих елементів.

Одним із методів прогнозування пористості у ППМ є дослідження металографічних зображень, на яких зафіксований стан поверхні ППМ на їх окремих ділянках. Ручна обробка великої кількості зображень є достатньо трудомісткою і дає можливість, переважно, отримати інформацію про сам характер пороутворення лише у площині зображення. Адаптація та застосування сучасних методів автоматизованої обробки зображень до конкретних завдань у сфері металографії дозволяє значно підвищити ефективність роботи операторів із зображеннями та отримати з них більше інформації про об'єкти досліджуваного фото. Зокрема є можливість отримання інформації про тривимірну структуру об'єктів на зображеннях, ґрунтуючись на інформації довимірних зображень чи їх серій, що дуже складно і, навіть, практично неможливо зробити вручну. Тому створення моделі і алгоритмів обробки для

вирішення проблеми оцінки пористості ППМ за її двовимірними кольоровими зображеннями є актуальним та практичним завданням сьогодення.

Система отримання і обробки інформації зображень матеріалів з аналізом тривимірної структури поверхні повинна містити джерело світла. Зразок матеріалу, що досліджується, освітлюється джерелом некогерентного світла. Відбите від поверхні зразка світло сприймається відеокамерою і передається для аналізу в комп'ютер. При відновленні тривимірної структури поверхні об'єктів розглядають два типи відбиття: дифузне і дзеркальне [2]. Об'єкти з дифузним відбиттям, що відбивають однакову світлову інтенсивність у всіх напрямках спостереження, є простіші для аналізу та відновлення 3D інформації зображень.

Можна показати, що для дифузної моделі відбиття інтенсивність точки поверхні визначається таким рівнянням [209]:

$$I_{\lambda} = I_a + I_{p\lambda}k_d(N \times L) \tag{2.5}$$

де *I_a* – інтенсивність розсіяного світла;

 $I_{p\lambda}$ – інтенсивність джерела світла;

k_d – дифузний коефіцієнт, який відображає рівень дифузного відбивання точки, що досліджується на поверхні:

$$N_{j} = \left\{ \frac{-p}{\sqrt{p^{2} + q^{2} + 1}}, \frac{-q}{\sqrt{p^{2} + q^{2} + 1}}, \frac{1}{\sqrt{p^{2} + q^{2} + 1}} \right\},$$
(2.6)

де похідні:

$$p = \frac{dz}{dx},\tag{2.7}$$

$$q = \frac{dz}{dy},\tag{2.8}$$

Nj – одиничний вектор нормалі до поверхні в досліджуваній точці;

L = (L_x, L_y, L_z) – одиничний нормалізований вектор, який задає напрям до джерела світла.

Нехай в приймачі маємо джерело світла з такими параметрами, що L=(0,0,1), тоді (2.6) з (2.7, 2.8) має вигляд:

$$I_{\lambda} = I_a + I_{p\lambda} k_d \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}},$$
(2.9)

З рівняння 2.9 видно, що отримано рівняння з чотирма невідомими p, q, k_d , Ia. Для обчислення похідних вектора нормалі 3D простору необхідно визначити значення I_a і дифузного коефіцієнту k_d . Як правило, це здійснюють експерементальним шляхом.

Для виділення сегментів зображення, де відсутні зміни дифузійного коефіцієнта k_d, необхідно провести відповідну кольорову селекцію зображення. У результаті селекції отримується просторовий сегмент зображення з нахиленою площиною з інтенсивністю I_λk_d. У зазначеному просторовому сегменті для точки, яка лежить на площині (в площині розташована пора), потрібно визначити k_d:

$$k_d I_{p\lambda} = (I_{\lambda kd} + I_a) \sqrt{tg^2 \theta + 1}, \qquad (2.10)$$

де $I_{\lambda k d}$ – інтенсивність точки поверхні, в якій розташована пора.

Для кольорової селекції площини порою, що досліджується, за ознакою кольору придатний алгоритм представлений у роботі [229].

Далі можна визначити інтенсивність фону на основі аналізу інформації про два зображення. Сформуємо штучне затінення пори зразка ППМ, з якого і отримується зображення.

Для кольорової селекції точок пори придатний алгоритм представлений у роботі [212].

Щоб отримати оцінку вектора нормалі пори розглянемо наступний клас пор. Нехай площина, на якій є пора, розташована горизонтально на висоті *z*_β. Для аналізу скористаємось рис.2.15, де схематично перерізами типу Pr(x, y), представлено пору, яка розташована горизонтально на висоті z_{β} . Перерізи пори зроблені площинами паралельними площині *YOZ*, сліди яких є на площині *XOY* прямі паралельні осі *OY*.



Рисунок 2.15 – Зображення пори за допомогою перерізів площини

Загальна аналітична модель пори з врахуванням висоти *z*_β матиме вигляд:

$$z_{\beta pr} = z_{\beta} + z_{pr}, \qquad (2.11)$$

де $z_{pr} = f(x, y)$.

Далі шукаємо оцінку похідних вектору нормалі пори, яка обмежена поверхнею S_{cr} , рівняння якої $Z_{pr}=f(x, y)$. Переріз пори площиною, яка розташована на відстані x від площини YOZ, що залежить від x, позначимо Pr(x,y).

Приймаємо для спрощення розрахунку оцінки вектора нормалі даної пори такі припущення:

— поверхня *S*_{pr} розташована повністю над площиною *XOY*;

— переріз тріщини Pr(x, y) не залежить від x, для всіх x, що належать відрізку $[x_1, x_n]$.

У цьому випадку повинна виконуватися умова:

$$P_r(x_a, y) = P_r(x_b, y),$$

(2.12)

$$\forall x_a \in [x_1, x_n], \forall x_b \in [x_1, x_n]$$

Перевірку цієї умови можна реалізувати програмно. З розгляду рис.2.19 видно, що існує зона значень [$x < x_1$; $x > x_n$], де умова (2.12) не виконується.

При виконанні (2.12) для точок пори, що належать перерізу *P_r*(*x*, *y*), *x∈*[*x*₁,*x_n*] похідна:

$$p = p(x, y) = 0,$$
 (2.13)

Підставивши (2.11) у (2.12) та (2.13), отримаємо:

$$q = q(x, y) = \sqrt{\frac{(tg^2\theta + 1)(I_{\lambda kd} - I_a)}{(I_\lambda - I_a)^2} - 1},$$
 (2.14)

де $I_{\lambda} = I_{\lambda}(x, y)$.

Звідси отримаємо вираз для оцінки похідних вектора нормалі пори для класу горизонтально розташованих пор, який скорочено позначимо *Prg*.

Оцінку вертикальної координати пори в 3D-просторі відносно поверхні площини елемента ППМ визначимо як:

$$z(x_{pr}, y_{pr}) = z_{pr} + \int_{x_0}^{x_{pr}} \frac{df(x, y_0)}{dx} + \int_{y_0}^{y_{pr}} \frac{df(x_{pr}, y)}{dy} dy, \qquad (2.15)$$

де y_{cr} – відома вертикальна координата відносно поверхні площини елемента ППМ $z_{cr} = f(x_0, y_0)$ в точці (x_0, y_0) , що належить проекції підсегмента пори на площину *XOY*. З (2.15) видно, що:

$$z_{prt} = f(x, y_{tnm}) = z_{prb} = f(x, y_{bnm}) = \rho \approx 0,$$
 (2.16)

Оцінка вертикальної координати в сегменті пори *Seg_{nm}* в 3D-просторі (2.15) з врахуванням (2.16), приймає таку форму:

$$z(x, y_{\sigma}) = \int_{y_{bnm}}^{y_{\sigma}} \frac{df(x, y)}{dy} dy = \int_{y_{bnm}}^{y_{\sigma}} \left(\sqrt{\frac{(tg^2\theta + 1)(I_{\lambda kd} - I_a)^2}{(I_{\lambda}(x, y) - I_a)^2}} - 1 \right) dy, (2.17)$$

Далі проведемо інтегрування по частинах, представимо оцінку площі пори у такій формі:

$$S_{nm} = -\int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} \int_{y_{bnm}}^{y_{\sigma}} \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy dy_{\sigma} = \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} [y - y_{tnm}] \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy, \quad (2.18)$$

За [205] маємо оцінку об'єму підсегменту пори Seg_{nm}:

$$V_{nm} = (b_{nm} - a_{nm})S_{nm} = (b_{nm} - a_{nm})\int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} [y - y_{tnm}] \frac{df(x_{nm}, y)}{dy} dy, \quad (2.19)$$

Нехай підсегмент пори Seg_{nm} представлено відеосигналом (2.17), тоді підставимо (2.18) в (2.20) і отримаємо оцінку об'єму підсегмента пори Seg_{nm}:

$$V_{nm} = (b_{nm} - a_{nm}) \times \int_{y_{bnm}}^{y_{tnm}} [y - y_{tnm}] = \left[\sqrt{\frac{(tg^2\theta + 1)(I_{\lambda kd} - I_a)}{(I_{\lambda}(x,y) - I_a)^2}} - 1 \right] dy, \qquad (2.20)$$

Щоб оцінити об'єм пори необхідно просумувати всі під сегменти пори:

$$\widehat{\mathbf{V}} = \sum_{n=0}^{N} \sum_{m=0}^{M} \mathbf{V}_{nm}, \qquad (2.21)$$

На краях пори обчислення об'єму доцільно зробити інтерполяцією значень об'єму. Для кожного краю пори така інтерполяція значень об'єму є лінійною і визначається об'ємом крайнього підсегмента і нульовим значенням об'єму на межі пори. На початку пори інтерполяція значень об'єму визначається об'ємом V_{00} . На кінці пори інтерполяція значень об'єму визначається об'ємом V_{00} . Ча кінці пори інтерполяція значень об'єму визначається об'ємом V_{00} . Ча кінці пори інтерполяція значень об'єму визначається об'ємом V_{00} . Ча кінці пори інтерполяція значень об'єму визначається об'ємом V_{00} . Ча кінці пори інтерполяція значень об'єму визначається об'ємом V_{00} . Ча кінці пори інтерполяція значень об'єму визначається об'ємом V_{00} . У результаті інтерполяції маємоя об'єм початку пори V_{ss} і об'єм кінця пори V_{end} , які додаються до початкової оцінки об'єма пори V(2.21), що дає оцінку об'єма пори вцілому:

$$V = V_{ss} + V_{end} + \hat{V}, \qquad (2.22)$$

На основі даної ілюмінаційної моделі зображення ми запропонували цю методику для пористої поверхні ППМ, а також методики оцінки параметрів пори. Було апробовано програмне забезпечення для аналізу 3D зображень – Avizo[®]. Завдяки цій методиці можна визначити довжину, об'єм пори, а також глибину пороутворення, а оцінка зміни кольору – встановлювати фазовий склад матеріалу ППМ.

Висновки до розділу 2

1. Показано технологію покращення властивостей металевих порошків сталі ШХ15, що полягає в додатковій операції обкатування–подрібнення з подальшим відпалом для зняття наклепування частинок.

2. Експериментально встановлено, що обкатування значно покращує технологічні властивості порошку сталі ШХ15, порівняно з порошком, отриманим за традиційною технологією, зокрема насипна густина збільшується у 1,5 рази, кут дійсного нахилу зменшується у 2 рази.

3. Показано обладнання та сформована методика отримання фільтрувальних ППМ з відходів промислового виробництва сухим радіально-ізостатичним пресуванням.

4. Дано характеристику матеріалам та методам нанесення електродугових алюмінієвих покриттів на ппм для їх подальшого оксидування.

5. Розроблена модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D зображень для пористих проникних матеріалів на основі ілюмінаційної моделі зображення.

РОЗДІЛ З

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ППМ ЗІ ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВГО ВИРОБНИЦТВА

3.1. Теоретичне підґрунтя основ методології для моделювання розрахунку реальної засипки порошку у форму

Методи моделювання невизначеності геометрії впливають на міцність складових компонентів, які знаходяться на початковій стадії заповнення форми [216-235], але моделювання випадкового розміщення порошку на етапі засипки у бункер з урахуванням фізичних параметрів складових повністю не досліджена.

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

Розробка методології розрахунку моделі випадкових пор у ППМ на етапі засипки матеріалу у бункер з урахуванням фізичної основи складових компонентів для двомірного випадку є на даний момент не вирішеною та надзвичайно важливою.

Сталь ШХ15 належить до високовуглецевих сталей і характеризується наявністю легувальних елементів таких як хром, марганець, які сприяють створенню дрібнозернистої структури.

Вихідним матеріалом для отримання фільтрувальних ППМ є порошок ШХ15, отриманий за відомою технологією [160, 230].

Для отримання фільтрувальних ППМ з високою проникливістю необхідно використовувати порошки з великим розміром частинок, в той же час як для отримання високої тонкості очистки необхідно використовувати порошки з малим розміром частинок. Ці протиріччя зумовлюють необхідність пошуку нових технологічних прийомів і методів, які б дозволили створювати такі структури ППМ, що забезпечать найбільш оптимальне поєднання експлуатаційних характеристик [219].

Крім того, слід відзначити, що практика застосування нових матеріалів на основі металевих порошків показує, що реалізація у повному обсязі їх міцнісних і експлуатаційних характеристик потребує суттєвого збільшення рівня прогнозування фізико-механічних властивостей матеріалів та розробки нових методів моделювання, який передбачає комплексний аналіз процесів формування матеріалів [220].

Нехай середній розмір кульок рівний d, а заповнюють вони частку об'єму $\alpha \in (0; 1)$ від загального об'єму контейнера (рис.3.1). Для опису випадкового розподілу кульок пропонується описувати пори між ними (пустоти) за допомогою такої моделі.



Рисунок 3.1 – Приклади візуалізації засипки двомірної упаковки за розробленою комп'ютерно-імітаційною моделлю [54, 71, 72].

Нехай ξ – пуасонівська випадкова міра, що досліджується, інтенсивність якої пропорційна мірі Лебега з коефіцієнтом λ. Випадкова множина пор буде задаватися як:

$$A = \bigcup_{x \in \xi} B(u, \frac{d}{10}) \tag{3.1}$$

Центри кульок – це випадкові точки, радіус яких це відстань, яка розміщується між частинками (рис.3.2).



Рисунок 3.2 – Варіант заповнення двомірного бункеру кульками відповідного розміру *d*.

Упаковки сфер в загалом класифікують за формою розподілу розмірів сфер і за густиною заповнення. За розподілом розмірів сфер розрізняють упаковки рівних сфер, сфер з східчастим розподілом і з безперервним розподілом сфер за розмірами [224, 250].

В упаковках рівних сфер їх радіус можна вважати загальним параметром і вилучити його з числа узагальнених координат.

Обов'язковою умовою побудови математичної моделі випадкового заповнення форми частинками є визначення координат пакованих сфер з рівномірним розподілом за об'ємом пакованого контейнера [380]. Для цього повинні бути використаний спеціальні програми генерації псевдовипадкових чисел із заданим законом розподілу.

Дослідження фізико-структурних властивостей цих засипок на математичних моделях проводиться методом статистичних випробувань (метод Монте-Карло) окремих випадкових заповнень, на основі чого здійснюється відповідна статистична обробка [186].

Для фіксованої точки та простору ймовірність попасти у дану потрібну випадкову множину (пори) *А* буде рівна:

$$P(u \in A) = P\left\{B\left(u, \frac{d}{10}\right) \cap \varsigma \neq \emptyset\right\} = 1 - \exp\{-\lambda \mid B\left(u, \frac{d}{10}\right) \mid\} == 1 - \exp\{-\frac{4}{3}\pi \frac{d^3}{10^3}\lambda\}$$
(3.2)

Припустимо, що діелектрична проникність частинок рівна ε . Тоді електростатичний потенціал φ всередині матеріалу порошинок буде задовольнятися рівнянням:

$$a(u)\Delta_u \varphi = 0, \tag{3.3}$$

де a(u) = 0, якщо $u \in A$ і $(u) = \varepsilon$, якщо $u \notin A$

Це випадкове поле стаціонарне і обертово-інваріантне, так як цими властивостями володіє пуасонівська міра. При цьому, значення випадкового поля *a* в точках, які віддалені на відстань більшу $\frac{d}{10}$, незалежне. Тому існує усереднене значення \bar{a} , яке відповідає діелектричній проникності композитного матеріалу. Для \bar{a} можна буде отримувати різні значення.

У двомірному випадку для більш простих випадкових полів *а* узагальнюююче значення *ā* можна точно обрахувати. Саме тому, модель випадкових пор потрібно ускладнити. Однак, корисно буде оцінити *ā* для даного випадку.

На підставі теоретичних даних закордонних та вітчизняних вчених [72, 73] та на розробках науковців [72, 73] під керівництвом заслуженого діяча науки та техніки України, професора Рудя В.Д. у Луцькому національному технічному університеті (м. Луцьк, Україна) розроблено ряд комп'ютерно-імітаційних моделей упаковки частинок для монодисперсних і полідисперсного випадку засипки порошків [72, 73].

Як приклад на рис.3.3 наведено результат моделювання заповнення 3Dформи 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 [74].

Розміри елементів визначаються відносними одиницями щодо розміру куба. Обсяг елементів упаковки характеризує щільність заповнення в заданому обсязі.

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.



Рисунок 3.3 – Комп'ютерна програма для моделювання заповнення упаковки 3D-форми частинками порошку для монодисперсних і полідисперсного випадку засипки

На підставі отриманих результатів було розраховано залежність пористості від радіусу, отримані дані наведено у таблиці 3.1, а також побудували гістограму розподілу заповнення часток, яка зображена на рис.3.4.

Таблиця 3.1 – Залежність пористості від радіусу

R, піксель	Пористість, %
$R_1 = 250$	41,1
$R_2 = 150$	34,2
$R_3 = 50$	28,1



Рисунок 3.4 — Гістограма розподілу часток по об'єму циліндричного бункера: 1 — біля стінок бункера $R_1 = 250$ піксель; 2 — на відстані $R_2 = 150$ піксель; 3 — $R_3 = 50$ піксель

Отримана гістограма дає наочне уявлення про розподіл частинок за розмірами за умови, що інтервали радіусів у фракціях однакові. При розрахунках n – число частинок в інтервалі радіусів від r_i до r_j належать до середнього $r_{i cep}$, тобто задовольняється умові $Q_n = \bar{h}(r)$, що й характеризує диференціальний розподіл частинок за об'ємом бункера [72].

3.2. Розробка методики розрахунку фізичних параметрів, які закладаються для дослідження реальних упаковок (двомірний випадок)

Аналізуючи більшість вітчизняних та зарубіжних моделей консолідації порошків [220-227], автором запропонована нова методика розрахунку фізичних параметрів, які закладаються для дослідження реальних упаковок (двомірний випадок) [201, 228].

3.2.1. Опис задачі та вихідні умови для моделювання. Нехай, область *G ∈ R*³ заповнена дрібними металевими кульками (рис.3.1).

Необхідно встановити інтегральні характеристики отриманого матеріалу такі, як, наприклад, діелектрична проникність.

Для вирішення данної задачі використовують такий підхід. Вважаємо, що в результаті заповнення області *G* гранулами виникли стаціонарні, ізотропні випадкові поля $\{\xi_{ij}(u), u \in \mathbb{R}^3\}$, що описують діелектричну проникність сукупності.

Якщо до границь області прикласти електричний потенціал ϕ , то потенціал *U* всередині області є рішенням задачі Діріхле [67-24]:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^{3} \xi_{ij} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} U = 0\\ U/\partial G = \varphi \end{cases}, \qquad (3.4)$$

Оскільки коефіцієнти ξ_{ij} мають складну природу, то пряме рішення задачі неможливе. Тому, пропонується використовувати метод усереднення. Припускаємо, що $\forall i,j \in \mathbb{Z}$ $\xi_{ij} \in$ ергодичним, а область *G* достатньо велика для проявлення цієї властивості. Тобто очікується, що замість рівняння (3.4) можна буде записати:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^{3} \overline{\xi_{ij}} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} U = 0\\ U/\partial G = \varphi \end{cases}, \qquad (3.5)$$

з деяким "усередненим" значенням ξ_{ij} .

У рамках зазначеного підходу були розглянуті такі простіші випадки:

- 1. Одновимірний простір, тобто *G* ∈ R. Замість випадкового поля $\xi(u), u$ ∈ R розглядалася періодична функція *p*: R → R.
- 2. Багатовимірний простір із тією ж періодичною функциєю $p: \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$, де d > 2.

3.2.2. Одновимірний випадок (площина). Нехай *G* =[-1;1], в такому випадку система рівнянь (3.5) переписується так:

$$\begin{cases} x_{\varepsilon}^{\prime\prime}(u) = p_{\varepsilon}(u)x_{\varepsilon}(u) \\ x_{\varepsilon}(-1) = x_{\varepsilon}(1) = 1 \end{cases}$$
(3.6)

де $p_{\varepsilon}(x) = p\left(\frac{x}{\varepsilon}\right)$, а $p: R \to R$ – періодична функція з періодом 1.

Рішення даної системи можна записати через ймовірнісне представлення:

$$x(u) = M_u exp\{-\int_0^\tau p_\varepsilon(\omega(s)) ds\},$$
(3.7)

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

Так як міра відвідування вінеровського процесу заданного на *R* є абсолютно неперервною відносно міри Лебега [232], тоді доречі така рівність:

$$\int_0^\tau p_\varepsilon \left(\omega(s) \right) ds = \int_{-1}^1 p_\varepsilon \left(u \right) l_\tau(u) d, \tag{3.8}$$

де $l_{\tau}(u) = \int_{0}^{\tau} \delta_{u}(\omega(s)) ds$, локальний час вінерівського процесу в точці u.

При цьому рішення задачі визначається:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^{3} \overline{\xi}_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} u(x) = 0, \\ u_{\partial G} = g \end{cases}$$
(3.9)

де G – обмежена область з гладкою границею,

g – деяка функція.

и – рішення «усередненної» задачі:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^{3} \bar{\xi}_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} U = 0, \\ U/_{\partial G} = \varphi \end{cases}$$
(3.10)

Тоді:

$$Msup\{|u_{\varepsilon}(x) - u(x)| : x \in G\} = O(\varepsilon^{\kappa}), \qquad \kappa > 0.$$

Частинки порошку ШХ15 вважатимемо ідеальними сферами розміром 50, 70 та 100 мкм. Основні фізичні властивості порошку сталі ШХ15 наведені у табл.3.2, 3.3

Таблиця 3.2 – Механічні властивості порошку сталі ШХ15

Межа	Marea Minuagati	Відносне	Ударна	Твердість за
текучості		звуження	в'язкість	Брінелем
σ _{0,2} , ΜΠa	$O_{\rm B}$, WII Ia	ψ, %	KCU, Дж/м ²	HB
710	1670	35-55	44	179-207

Таблиця 3.3 – Фізичні властивості порошку сталі ШХ15

Модуль пружності Е, Гпа	Густина р, кг/см ³	Коефіцієнт теплового розширення, а, °С
211	7812	11,9

Частинки порошку можна класифікувати одним класом частинок, вимірюючи її об'ємний еквівалентний діаметр, якщо розподіл розміру частинок базується на цьому еквівалентному діаметрі [11]. Апроксимована частинка порошку класифікується діаметром (рис.3.5). Інші класи розмірів частинок створюються шляхом масштабування апроксимованого кластера за допомогою відповідних коефіцієнтів масштабування, отриманих через співвідношення еквівалентних діаметрів інших розмірів [11].



Рисунок 3.5 – Кумулятивний розподіл қ розміру частинок порошку ШХ15





Рисунок 3.7 – Експериментально-дослідна установка для заповнення порошком форми у вигляді циліндру (а) та заповнення форми порошком (б) ×500

У таблиці 3.4 наведені середньостатистичні результати засипки кулькоподібних полідисперсних частинок в циліндричний бункер H×D = 400×300.

Вид бункера	Розмір бункера, Н×D (мм)	Кут (α°)	Діаметр часток (мкм)	Пористість * (%)	Середнє координаційне число *
Циліндр	220×40	10	50	41,1	0,33

T C	2		•							•
	σΚΔ	L _ ()	CUODU1	парам	etnu I	THOLE	ecv '	засипии	TOP	MIIIV1D
гаолиц	л Э	гО	CHOBIII	napam	cipn .	проц	CC y .	Sacrinkri	mor	юшків

Циліндр	220×40	10	70	40,5	0,31
Циліндр	220×40	10	100	39,1	0,29

* - середньостатистичні дані із 10 ÷ 15 засипок

Було проведено розрахунок відносного відхилення отриманих експериментальних значень пористості зразків від відповідних теоретичних даних з урахуванням фізичних параметрів порошків.

Щоб перевірити розрахункові значення проводилась серія експериментів для циліндричних зразків ППМ Ø40 мм і h=220 мм із різними комбінаціями процентного вмісту вихідних компонентів. Після проведення ряду досліджень структурно-неоднорідних матеріалів у таблиці 3.5 представлені результати основних технічних параметрів реальних засипок.

Крім цього, відносне відхилення результатів отриманих на основі розробленого програмного забезпечення розрахунку пористості та експериментальних даних засипки, буде розраховуватись за формулою:

$$\delta_{\Pi} = \frac{\Pi_{\text{експ}} - \Pi_{\text{прог}}}{\Pi_{\text{експ}}},\tag{3.11}$$

де П_{експ}– експериментальне дослідження пористості;

П_{прог} – програмне дослідження пористості.

При цьому, переважно, основні фізико-механічні характеристики пористих проникних матеріалів мають лежати в межах інженерної похибки.

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

Таблиця 3.5 – Результати основних технічних параметрів реальних засипок

Maca, 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

Згідно здійсненого аналізу вплив похибок не виходить за межі інженерної похибки, тому ними можна нехтувати.

У таблиці 3.6 наведені вибірка густини упаковки в кубі бункера сфер діаметром 0,1мм і густина упаковки як середнє значення лінійної густини. Ці дані наведені для різних значень густини і товщини упаковок визначені експериментами та за допомогою програмного забезпечення (рис.3.3).

Таблиця 3.6 – Густина упаковки і середньоквадратичне відхилення щільних упаковок сфер

№ досліда	H/R	ρв	ρв	\overline{v}	$\sigma(v)$
		контейнері (програма)	контейнері (експеримент)		
1	20	0,4581	0,4623	0,4759	0,11685
2	20	0,4498	0,4522	0,4740	0,12382
3	20	0,4566	0,4621	0,4710	0,12342
Середнє значення	20	0,4548	0,4602	0,4736	0,12142
4	40	0,4706	0,4802	0,4788	0,09416
5	60	0,4721	0,4799	0,4763	0,08986
6	80	0,4753	0,4789	0,4838	0,08608
7	20	0,5104	0,5199	0,5189	0,12588

Для визначення густини заповнення елементів такого розподілу необхідно також мати на увазі вплив граничного ефекту. Для малої густини заповнення, коли з достатньою точністю можна вважати розподіл центрів мас елементів рівномірним, граничний ефект оцінюють величиною граничного шару, де ці центри відсутні. Так, для упаковок рівних сфер з малою густиною заповнення цей шар визначають радіусом сфер. В цьому випадку розподіл центрів сфер фактично знаходиться в об'ємі $(1-2R)^3$, якщо радіус *R* виражений в частинах контейнера як одиничний куб.

Виходячи з цього, густину заповнення по числу *N* рівних сфер в упаковці визначають з виразу:

$$\rho = \frac{4}{3}\pi R^3 \frac{N}{(1-2R)^3} = \frac{\rho_1}{(1-2R)^3}.$$
(3.12)

Для сфер R=0,05 поправка до густини заповнення в представницькому об'ємі складає 1,37. Для розподілених за розмірами сфер з густиною розподілу f(R) густину заповнення визначають за формулою:

$$\rho = \frac{4}{3} \pi N \int_{0}^{R_{\text{max}}} \frac{R^3}{(1-2R)^3} f(R) dR.$$
(3.13)

Аналогічно можна виразити граничний ефект для представницького контейнера будь-якої форми.

Для визначення дисперсності з урахуванням граничного ефекту необхідно у виразах (3.12) і (3.13) замість об'ємів сфер $4/3 \pi R^3$ указувати їх поверхню 4 πR^2 . Вони достатньо точно визначені для будь-якої опуклої форми частинок заповнювача, де під радіусом розуміється середній напіврозмір частинок заповнювача.

Описаний облік граничного ефекту справедливий тільки для малої густини заповнення, практично не вище 0,2. Із збільшенням густини заповнення вплив межі стає складнішим унаслідок деякого зростання густини заповнення в діапазоні від радіусу до двох радіусом від межі контейнера.

Інтегральна густина композиції розраховується динамічно в процесі проведення модельного експерименту. Розрахунок дисперсії часток проводиться після зупинки експерименту. На рис. 3.8 наведено результати розрахунку дисперсності композиції. Добре помітно вплив граничного ефекту.



Рисунок 3.8 – Аналіз дисперсності композиції ППМ

Для щільних упаковок середнє значення лінійної густини також вище, ніж відносний об'єм усіх сфер в контейнері. На рис. 3.9 наведена залежність граничного ефекту по середній густині і відносному об'єму сфер від густини заповнення і товщини упаковки.




Рисунок 3.9 – Залежність граничного ефекту по середній густині і відносному об'єму сфер (100 мкм) від густини заповнення (а) і товщини упаковки (б): 1 – програмний розрахунок; 2 – експериментальні дані

3.3. Моделювання нової сучасної системи автоматизації для виготовлення проникних матеріалів зі відходів машинобудівного виробництва





К

Рисунок 3.10 – 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.

За допомогою розробленого комплексу реалізується технологія СР-ІП, при застосуванні якої можливе виготовлення ППМ різного призначення з порошкових та інших ущільнювальних матеріалів. При цьому найбільш актуальним є отримання ППМ складної геометричної форми, або виробів із спеціальних матеріалів (відходів промислового виробництва).

Фільтрувальні ППМ виготовлені за допомогою даних установок [83-85] відповідають сучасним вимогам до якості виробів такого призначення.

Стійкими сучасними тенденціями промислового розвитку є зростання вимог до якості усіх видів виробів. Отримати нові пористі проникні матеріали з гарантованими властивостями можливо за допомогою традиційної технології порошкової металургії, при цьому необхідно прогнозувати та контролювати параметри їх структури в процесі виготовлення, до яких належать такі: гранулометричний склад шихти, форма часток, щільність формованої заготовки, якість контактів, схема пресування, пористість, густина та їх розподіл по об'єму. Однак, методи порошкової металургії не завжди забезпечують однорідність властивостей всередині матеріалів, і не дають можливість отримувати структурні характеристики матеріалів на якісному рівні. Підвищити ефективність традиційних технологій, а також ввести безвідходне виробництво виробів широкого цільового призначення, зберігати енергію, скорочувати трудові затрати та контролювати параметри структури пористих порошкових матеріалів у процесі їх виготовлення можливо за допомогою моделювання з використанням комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації виробництва [27, 33, 35, 75].

Нагальні проблеми створення пористих середовищ вирішуються на основі

застосування комп'ютерного моделювання, автоматизації, сучасних САПрсистем, яке дозволяє оптимізувати технологію отримання пористих проникних матеріалів [233].

З аналізу відомих технологічних процесів створення пористих проникних матеріалів у порошковій металургії [42, 84, 197, 154, 117-182] виходить, 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.

Для моделювання обладнання різноманітного призначення та технологій отримання ППМ доцільно створювати спеціалізовані системи моделювання на основі використання об'єктно-орієнтованих модулів параметризації відповідно до параметричного підходу.

У розробленій об'єктно-орієнтовній САПр механізм параметризації реалізований з використанням системи параметричного креслення і моделювання T-FLEX CAD та Pro/ENGINEER, які стали базою для розробки системи моделювання параметричного проектування установок для сухого радіально-ізостатичного пресування (рис.3.11-3.13).



a)



Рисунок 3.11 – Система моделювання параметричного проектування установок для СР-ІП пористих проникних матеріалів на базі T-FLEX CAD (а) та Pro/ENGINEER (б)

Один із важливих аспектів конструкції установки для сухого радіальноізостатичного пресування пористих проникних матеріалів полягає у розрахунку сил і напруги в деталях.



Рисунок 3.12 – Система розрахунку сил і напруги в деталях проектування моделі установки для сухого радіально ізостатичного пресування пористих проникних матеріалів на базі Pro/MECHANICA Wildfire



Рисунок 3.13 – Моделювання процесу засипки порошку у форму для радіально-ізостатичного пресування з використанням Pro/ENGINEER

Для отримання широкого спектру виробів необхідні сучасні технології обробки матеріалів тиском і порошкової металургії. Вони переважно здатні забезпечити виробництво виробів зі спеціальними властивостями, виготовлення яких іншими методами складне або неможливе.

Один із важливих аспектів конструкції установки для сухого радіальноізостатичного пресування пористих проникних матеріалів полягає у розрахунку сил і напруги в деталях (рис.3.14).



Рисунок 3.14 – Епюри зміни радіального і тангенціального напруження по товщині циліндра ізостату для пресування

Прогрес у порошковій металургії й обробці матеріалів тиском переважно визначається вдосконаленням процесів пресування. Вони належать до основних етапів виробництва і визначають не лише розміри, форму, асортимент, енергосилові витрати, але й істотно впливають на ряд найважливіших властивостей готового продукту. При цьому важливо керувати якістю виробів, механізувати й автоматизувати процеси пресування, устаткування та інструменту, прогнозуючи їх властивості на початковій стадії формування та допомогаючи створенню теоретичних основ технології отримання пористих порошкових матеріалів

3.4. Визначення розподілу густини пористого проникного циліндра за радіусом при радіально–ізостатичному пресуванні

Метод радіально-ізостатичного пресування полягає в тому, що на відміну від більш поширеного осьового пресування в жорстких матрицях, зусилля до порошку прикладається у радіальному напрямку. Однією із переваг даного методу вважають рівномірність розподілу густини по об'єму пресовки. Справді, затрати на протидію зовнішньому тертю у випадку радіального пресування, з цієї точки зору, виявилися на порядок менші. Ця обставина і стала першопричиною при виборі методу отримання довгих циліндричних пустотілих виробів.

Саме цим керувалися Б.А. Борок і В.Д. Мейерсон у своїх роботах [243, 244], де описувався даний метод. Згодом їх послідовники та прибічники почали шукати теоретичне виправдання однорідності розподілу густини. Щоправда, вже на початку 80-х років думки дослідників дещо розійшлися, хоча більшість схилялась на користь того, що густина має розподілятися рівномірно по радіусу.

Певним виправданням та реалізацією цього були публікації М.Б. Штерна та І.Ф. Мартинової, де результат покладений в основу обчислень, спрямованих на визначення робочого тиску за умов радіального обтиснення [245, 246]. У той же час, більш послідовний підхід, який запропонував О.В. Михайлов, ґрунтувався на застосуванні методу скінчених елементів не підтверджував рівномірного

розподілу густини по радіусу [247]. Такий результат було отримано обчислювальним шляхом, різниця у поглядах певний час зберігалась.

Для визначення розподілу густини пористого проникного циліндра за радіусом при радіально-ізостатичному пресуванні необхідно дати опис геометричній моделі процесу пресування ППМ, розрахувати напруження та швидкості деформацій при цьому та визначити поле густини пустотілого ППМ.

Для досягнення цього використаємо континуальну теорію пластичності пористого тіла у модифікації, запропоновану в наукових роботах [190, 204]. При цьому буде отриманий результат, який матиме відносно простий аналітичний вигляд, що дозволятиме аналізувати фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густину.

Геометричну модель ППМ як пустотілий циліндр представлено на рис.3.15.



Рисунок 3.15 – Геометрична модель прикладання напружень на ППМ як пустотілий циліндр

Припускаємо, що циліндр на рисунку 1 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 $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_{\varphi}$. Дотичні напруження не є визначальними і в подальшому ігноруються.

У свою чергу радіальна дія, що визначається швидкістю v_r обумовлює існування швидкостей деформацій $e_r = \frac{\partial v_r}{\partial r}$, а також $e_{\varphi} = \frac{v_r}{r}$. Ці компоненти разом із компонентою осьової деформації $e_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}$ задовольняють рівняння збереження маси (рівняння нерозривності).

$$e = e_z + e_r + e_\varphi \tag{3.22}$$

де *е* – швидкість зміни об'єму, яка пов'язана зі швидкостями зміни пористості та густини виразом:

$$e = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{1 - \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$
(3.23)

Згідно із відомими технологіями радіального обтиснення, висота на змінюється, тому далі вважатимемо, що $e_z = 0$

Далі також будуть використані перші два інваріанти тензорів напружень та швидкостей деформацій, які подаються так:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\varphi) \tag{3.24}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{(e_r - e_{\varphi})^2 + (e_z - e_{\varphi})^2 + (e_r - e_z)^2}$$
(3.25)

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_{\varphi})^2 + (\sigma_z - \sigma_{\varphi})^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}$$
(3.26)

Далі використаємо модель пластичності пористого тіла, вільного від впливу третіх інваріантів або параметрів Лоде–Надаї [21-23]. Тому компоненти девіаторів напружень та швидкостей деформацій подібні. Це виражається такою тензорною рівністю:

$$\frac{\sigma_z - \sigma_r}{\sigma_z - \sigma_r} = \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{e_r - e_\varphi} = \frac{\sigma_\varphi - \sigma_z}{e_\varphi - e_z}$$
(3.27)

117

Зокрема, її наслідком є рівність:

$$\frac{\sigma_z - \sigma_r}{e_z - e_r} = \frac{\sigma_\varphi - \sigma_z}{e_\varphi - e_z} \tag{3.28}$$

Варто наголосити, що процес деформування, який має місце при радіально– ізостатичному пресуванні, відповідає плоскій течії. Тому, незважаючи на відсутність осьової компоненти швидкості, осьова компонента тензора напружень відмінна від нуля і легко визначається з рівняння (3.28):

$$\sigma_z = \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{e_r - e_\varphi} e_z + \frac{e_r \sigma_\varphi - e_\varphi \sigma_r}{e_r - e_\varphi}, \qquad (3.29)$$

яке за допомогою умови $e_z = 0$ набуває вигляду:

$$\sigma_z = \frac{e_r \sigma_\varphi - e_\varphi \sigma_r}{e_r - e_\varphi} \tag{3.30}$$

Далі особливу роль відіграватимуть інтенсивності девіаторів швидкостей деформацій та напружень:

$$\gamma = \frac{\sqrt{e_r^2 + (e_r - e_{\varphi})^2 + e_{\varphi}^2}}{\sqrt{3}}$$
(3.31)

$$\tau = \gamma \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{e_r - e_\varphi} \tag{3.32}$$

Внаслідок сформульованих спрощень набувають конкретного вигляду і вирази для середнього тиску та інтенсивності девіатора напружень:

$$p = \frac{1}{3} \left(\frac{e_r(\sigma_r + 2\sigma_\varphi) - e_\varphi(2\sigma_r + \sigma_\varphi)}{e_r - e_\varphi} \right)$$
(3.33)

$$\tau = \frac{\sqrt{e_r^2 + (e_r - e_{\varphi})^2 + e_{\varphi}^2}}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_r - \sigma_{\varphi}}{e_r - e_{\varphi}}$$
(3.34)

Основна ідея побудови розв'язку полягає у застосуванні двох етапів. На першому з них виходимо з припущення, що поле густини є однорідним.

Насправді вона не є однорідно розподіленою. Саме для того, щоб цю неоднорідність визначити, ми повертаємось до рівнянь, які описують поверхню навантаження.

Отже, почнемо з припущення, що густина розподілена однорідно. Із рівняння нерозривності (3.22) за умови, що $e_z = 0$, в цьому випадку випливає, що:

$$e_r = \frac{1}{2}e - \frac{b}{r^2} \tag{3.35}$$

$$e_{\varphi} = \frac{1}{2}e + \frac{b}{r^2}$$
(3.36)

$$v_r = \frac{1}{2}er + \frac{b}{r} \tag{3.37}$$

Рівняння (3.35) – (3.37) містять швидкість зміни об'єму *е* та константу інтегрування *b*. Для того, щоб визначити цю константу використовуємо умову:

$$v_r = 0$$
 якщо $r = R_1$ (3.38)

$$0 = \frac{1}{2}eR_1 + \frac{b}{R_1} \tag{3.39}$$

Задовольняючи ці умови, знаходимо:

$$b = -\frac{1}{2}eR_1^2 \tag{3.40}$$

Звідси виводимо ряд рівнянь

$$e_r = \frac{1}{2}e + \frac{\frac{1}{2}eR_1^2}{r^2}$$
(3.41)

$$e_{\varphi} = \frac{1}{2}e - \frac{\frac{1}{2}eR_1^2}{r^2} \tag{3.42}$$

$$e_r - e_{\varphi} = \frac{R_1^2}{r^2} e \tag{3.43}$$

Тепер переходимо до визначення поля напружень. Для того ми використовуємо рівняння (3.41) –(3.43):

$$\sigma_r - \sigma_{\varphi} = \frac{3(e_r - e_{\varphi})\sigma_r}{2e_r - e_{\varphi} + 3e\chi} = \frac{3\frac{R_1^2}{r^2}\sigma_r}{(\frac{1}{2} + \frac{3R_1^2}{2r^2}) + 3\chi},$$
(3.44)

а також рівняння квазістатики, яке часто називають рівнянням рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\varphi}}{r} = 0 \tag{3.45}$$

Підставляючи (3.44) у (3.45), приходимо до простого звичайного диференціального рівняння:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{6R_1^2 \sigma_r}{3rR_1^2 + r^3(1+6\chi)} = 0 \tag{3.46}$$

Загальний розв'язок рівняння (3.46) можемо подати у вигляді, який включає невідому константу інтегрування *с*:

$$\sigma_r = \frac{r^2 + 3R_1^2 + 6r^2\chi}{r^2}C \tag{3.47}$$

Для її знаходження використовуємо умову, що за відсутності внутрішньої порожнини, напруження буде розподілене рівномірно та буде рівним радіальному тиску *p_{rad}*:

$$R_1 = 0: \sigma_r = (1 + 6\chi)C = p_{\text{rad}}$$
(3.48)

За його допомогою знаходимо всі компоненти тензору напружень та інваріанти напруженого стану:

$$\sigma_r = \frac{r^2 + 3R_1^2 + 6r^2\chi}{r^2} \frac{p_{\rm rad}}{(1+6\chi)}$$
(3.49)

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_r - \frac{3\frac{R_1^2}{r^2}}{\left(\frac{1}{2} + \frac{3R_1^2}{2r^2}\right) + 3\chi} \sigma_r$$
(3.50)

$$\sigma_r - \sigma_\varphi = \frac{3\frac{R_1^2}{r^2}}{(\frac{1}{2} + \frac{3R_1^2}{2r^2}) + 3\chi} \sigma_r$$
(3.51)

$$p = \frac{6\chi}{1+6\chi} p_{\rm rad} \tag{3.52}$$

$$\tau = -\frac{\sqrt{6 + \frac{18R_1^4}{r^4}}}{1 + 6\chi} p_{\text{rad}}$$
(3.53)

$$\frac{p^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} = (1 - \theta)\sigma m \qquad (3.54)$$

 $\varphi = 1$

$$\chi = \psi = \frac{a}{\theta} \tag{3.55}$$

$$p = \frac{6\chi}{1+6\chi} p_{\rm rad} \tag{3.56}$$

$$\tau = -\frac{\sqrt{6 + \frac{18R_1^4}{r^4}}}{1 + 6\chi} p_{\rm rad} \tag{3.57}$$

Значення p_{rad} знаходимо, розв'язуючи однорідну задачу про радіальне стиснення циліндра, який не містить порожнину. Розв'язок представлений послідовністю таких рівнянь:

$$e_z = 0 \tag{3.58}$$

$$e = 2e_r \tag{3.59}$$

$$\gamma = -\sqrt{\frac{2}{3}}e_r \tag{3.60}$$

$$p = +\sqrt{1-\theta_0} \frac{2e_r \psi}{\sqrt{\left(-\sqrt{\frac{2}{3}}e_r\right)^2 \varphi + (2e_r)^2 \psi}} \sigma_m \tag{3.61}$$

$$\tau = \sqrt{1 - \theta_0} \frac{-\sqrt{\frac{2}{3}}e_r \varphi}{\sqrt{(-\sqrt{\frac{2}{3}}e_r)^2 \varphi + (2e_r)^2 \psi}} \sigma_m$$
(3.62)

$$\sigma_r = p - \frac{\tau}{\sqrt{6}} \tag{3.63}$$

Отже,

$$P_{rad} = \sigma_r = -\frac{\sqrt{1-\theta_0}\sigma_m\sqrt{\varphi+6\psi}}{\sqrt{6}} \tag{3.64}$$

Підставляючи значення φ та ψ та пам'ятаючи, що пористість відповідає рівномірному її розподілу, отримаємо:

$$p_{\rm rad} = -\sqrt{1-\theta_0}\sigma_m \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{a}{\theta_0}}$$
(3.65)

На підставі результатів, отриманих раніше, можна безпосередньо перейти до визначення поля густини. Тому скористаємось першими з визначальних співвідношень – рівняннями (3.22 - 3.28). Зауважимо, що раніше ми ними ще не користувались. Подамо його спершу у вигляді:

$$\frac{p^2}{a}\theta + \tau^2 = (1-\theta)\sigma_m \tag{3.66}$$

Зауважимо, що воно містить інваріанти тензора напружень, які є нелінійними функціями *r*. Саме це рівняння є лінійним щодо пористості θ . Слід зауважити, що в цьому випадку це значення пористості вже є наступним наближенням до істинного поля густини. Попереднім, або нульовим наближенням, було $\theta = \theta_0$.

Розв'язуючи це рівняння відносно *θ*, отримаємо рівняння для уточненого поля густини:

$$\theta = \frac{a(\sigma_m^2 - \tau^2)}{p^2 + a\sigma_m^2} \tag{3.67}$$

Після підставлення у нього отриманих значень для *p*, *τ*, *p*_{rad}, маємо:

$$\theta = \frac{a\left(\sigma_m^2 - \left(-\frac{\sqrt{6+\frac{18R_1^4}{r^4}}}{1+6\chi}p_{\rm rad}\right)^2\right)}{\left(\frac{6\chi}{1+6\chi}p_{\rm rad}\right)^2 + a\sigma_m^2}$$
(3.68)

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

$$\theta_0 = 1 - \frac{R_{2i}^2}{R_2^2} (1 - \theta_i) \tag{3.69}$$

Тут і надалі R_{2i} – це початковий радіус заготовки перед радіально– ізостатичним навантаженням, θ_i – початкова пористість.

Параметр *а* доцільно визначити із експерименту на всебічне стиснення, апроксимуючи криву «тиск–пористість» як $p = \frac{a}{\theta}$. 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)

Розрахункова залежність пористості наведена на рис. 3.16 Як видно з розрахунків та проведення практичного дослідження пористість змінюється при зміні радіусу циліндричної заготовки ППМ (пустотілого циліндру), який виготовлений методом радіально-ізостатичного пресування [250].



Рисунок 3.16 – Залежність пористості *θ* від радіусу *г (см)* заготовки

3.5. Моделювання властивостей ППМ

Як свідчить вітчизняний та світовий досвід останніх років, успіх розв'язання проблем, що з'являються при створенні нових матеріалів, залежить від якості та рівня прогнозування процесів та явищ, які супроводжують ці технології. Втім, прогнозування та моделювання в порошковій галузі потребують подальшого вдосконалення теоретичних уявлень та їх втілення у якісних методах та алгоритмах, які реалізуються за допомогою сучасних обчислювальних середовищ, програм та візуальних пакетів із застосуванням відповідної комп'ютерної техніки.

Розробка сучасного програмного забезпечення для прогнозування, моделювання, аналізу та дослідження структури пористої структури багатошарового фільтрувального матеріалу з металевих порошків, отриманого методом сухого радіально-ізостатичного пресування, є одним із актуальних питань сучасного матеріалознавства.

Для практичного створення потрібної пористої структури ППМ, яка буде відповідати оптимальному поєднанню експлуатаційних характеристик, необхідно встановити взаємозв'язок між технологічними режимами їх отримання і експлуатаційними характеристиками.

3.5.1. Моделювання пористої структури в фільтрувальних ППМ. Моделювання пористої структури конкретного одношарового ППМ з порошку сталі ШХ15 здійснювалося в пакеті прикладних програм *MatLab*. За описаною вище методикою було розроблено програмне забезпечення на мові програмування С++ [147, 251], використовуючи теоретичні підстави та розрахунки, сформульовані у п.3.4.

Оскільки фільтр має форму витягнутого кругового циліндра (рис.3.17), то моделювання проводилось для таких параметрів технологічного процесу: діаметр оправки — 40 мм, діаметр армованої еластичної оболонки — 80 мм.



Рисунок 3.17 – ППМ з порошку сталі ШХ15 Ø40×220 мм виготовлений методом сухого радіально-ізостатичного пресування

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

Для початку роботи з програмою необхідно ввести початкові дані для моделювання. Для цього редагуємо файл *Begin.txt*, вводячи необхідні параметри для моделювання багатошарового фільтра (рис.3.18).

Begin - Securit	3.0	
Batte - Dpanne : De	puer Big Orpania	_
81.* 1	// внижний радиус	-
maxtime = /	Конечний исинент времени	
eps11on ~ 0.00005	// Тлиность решения ураднений равновесия	
ni- 0.1	// PEOROFUHICIAND RAPAMETP IN 111	
aaxiter = 90000	// максимальное число итераций в решении уравнений равновесия	
max_teta_incre spewenn 1.02	us + // Максимально возводное увеличение лиристости за один ваг по	
max_teta_decre apiemenn 0.995	аз = // Накомально возможное уменьдение пористости за вдин шаг по	
begin_tets =	// Начальное значение порястостя	1
PL0-	// Удельное Лапласовское давление	
£2-	//Скорость осевой деформации	
Min_tet=		

D:\ДОКТОРСЬКА\ФIЛЬТР\Filter КУЗЬМОВ\Filter\Radial2.exe	
dt[73]= 0.00134218 time = 0.0705008	^
step of time = 73 itev=262	
IGradi = 9.98709e-006	
dt[74] = 0.00134218	
time = 0.071843 step of time = 74	
iter=165 Grad! = 9.14647e-006	
epsilon=1e-005 d+[75]= 0 00134218	
time = 0.0731852	
step of time - 75 iter=171	
Grad = 9.53464e-006 epsilon=1e-005	
dt[76]= 0.00134218 time = 0.0745273	
step of time = 76 itev=225	
IGradi = 7.29618e-006	E
d	*
201900000 LOUNC BCI 220000 DIMODINIO	

a)

б)

Рисунок 3.18 – Введення початкових даних (а) та процес обчислення (б) структурних характеристик ППМ

Визначений за результатами наших розрахунків розподіл пористості та радіальної швидкості при моделюванні радіально-ізостатичного пресування ППМ показаний на рис.3.19.



Рисунок 3.19 – Виведення графічних залежностей впливу радіальної швидкості та розподілу пористості при моделюванні радіально-ізостатичного пресування ППМ

Завдяки розробленому методу комп'ютерного моделювання є можливість не тільки визначити розподіл пористості та інших характеристик порошкового проникного матеріалу, але й встановити взаємозв'язок між технологічним режимами їх отримання і експлуатаційними характеристиками [253, 254].

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

Перспективними методами отримання ППМ (пористих проникливих матеріалів), є методи, спрямовані на створення ППМ з градієнтними властивостями, у яких розміри та кількість пор змінюються в напрямку фільтрації. У таких ППМ тонкість фільтрації буде визначатися шаром із мінімальним розміром пор, проникливістю є інтегральна величина, яка визначається пористою структурою всього матеріалу а забруднювач у процесі

фільтрування розподіляється по всьому об'ємі фільтрувального елемента, завдяки чому збільшується ресурс роботи фільтра.

Для практичного створення потрібної пористої структури ППМ, яка буде відповідати оптимальному поєднанню експлуатаційних характеристик, необхідно встановити взаємозв'язок між технологічним режимами їх отримання експлуатаційними характеристиками.

На теоретичних засадах континуальних моделей поведінки пористого середовища при холодному пресуванні за допомогою методу скінчених елементів розроблена теоретична методика прогнозування розподілу пористості по перерізу фільтра. На основі розробленої методики було створене програмне забезпечення, завдяки якому можна здійснювати розрахунок параметрів багатошарових фільтрів при радіальному ізостатичному пресуванні.

Пластична складова поведінки матеріалу описується визначальними співвідношеннями узагальненої моделі Сат–Сlay, у формі, поданій в роботах М.Б. Штерна, В.Д. Рудя та ін. [308, 354-358]

$$\frac{\left(p+p_{0}\right)^{2}}{\psi} + \frac{\tau^{2}}{\varphi} = (1-\theta) \left(\frac{\sigma_{0}}{1+m}\right)^{2}$$
(3.70)

де $p = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ – шарова складова тензору напружень, $\tau = \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}$ – інтенсивність

девіатору напружень;

θ - пористість;

σ₀ - напруження течії нестисливої твердої фази. Інші змінні та параметри, які містяться в (3.67), виражаються за допомогою співвідношень:

$$\psi = \frac{2(1-\theta)^3}{3\theta}, \ \varphi = (1-\theta)^2$$
(3.71)

$$p_{0} = m\sigma_{0}\sqrt{(1-\theta)\psi}$$
(3.72)

$$\sigma_0(\omega) = a + b\omega^{\alpha} \tag{3.73}$$

де *ω*-еквівалентна деформація твердої фази пористого тіла, яка приймається як [237]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\sqrt{1-\theta}} \sqrt{\psi \left(e^{pl}\right)^2 + \phi(\gamma^{pl})^2}$$
(3.74)

де $e = e_{11}^{pl} + e_{22}^{pl} + e_{33}^{pl}$ - об'ємна складова тензору швидкостей незворотних деформацій;

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(e_{11}^{pl} - e_{22}^{pl}\right)^2 + \left(e_{22}^{pl} - e_{33}^{pl}\right)^2 + \left(e_{33}^{pl} - e_{11}^{pl}\right)^2 + 6\left(\left(e_{12}^{pl}\right)^2 + \left(e_{23}^{pl}\right)^2 + \left(e_{31}^{pl}\right)^2\right)} - \text{девіаторна складова того ж$$

тензору;

а, b – початкова границя текучості та коефіцієнт зміцнення, матеріалу твердої фази пористого тіла відповідно;

m – параметр, що характеризує різноопірність пористого матеріалу при розтягуванні та стисненні.

Така поведінка може бути зумовлена різними чинниками структури пористого тіла: наявністю плоских дефектів (тріщин) або зародженням нових пор. Припускається, що *m* задовільняє нерівність: $0 \le m \le 1$.

У рамках моделі, яка описана рівняннями (3.71) – (3.73), поточний стан пористого середовища при пружньопластичному деформуванні визначається трьома параметрами: θ, ω, m . Еволюція параметра ω описується рівнянням (3.74), в той час як еволюційне рівняння для пористості безпосередньо випливає з закону збереження маси:

$$\frac{d\theta}{dt} = (1-\theta)e^{pl} \tag{3.75}$$

Контури рівних значень пластичного потенціалу (контури навантаження) при різних значеннях θ та *m* в координатах (*p*, τ) наведені на рис.3.20 та 3.21.



Рисунок 3.20 –Поверхні текучості при m= 0, для пористостей: 1 – 0,4; 2 – 0,3; 3 - 0,.2.



Рисунок 3.21 – Поверхні текучості для пористості 0,2 при різних m: 1) m= 0,8; 2) m=0,4; 3) m= 0.

Припускається, що незворотна складова тензору швидкостей деформацій пов'язана з напруженнями принципом нормальності:

$$e_{ij}^{pl} = \lambda \, \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}}; \quad \lambda > 0 \tag{3.76}$$

де Ф - пластичний потенціал, який визначається рівнянням:

$$\Phi(\sigma_{ij}) = \frac{(p+p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} - (1-\theta) \left(\frac{\sigma_0}{1+m}\right)^2$$
(3.77)

λ - додатній множник, який підлягає виключенню.

Варто зазначити, що для m \neq 0 контури поверхонь навантажень або рівних значень потенціалу Φ не є симетричними відносно девіаторної площини p = 0. Безпосередньо з принципу нормальності виходить, що в цьому випадку

спостерігається наявність розпушення: швидкість зміни об'єму додатня за відсутності середнього тиску (дилатансія 2-го роду). Тому в подальшому викладі параметр *m* пов'язується як із вмістом площинних макродефектів, або можливістю їх утворення внаслідок внутрішньої декогезії, так і схильністю до дилатансії.

Для використання у методі скінчених елементів визначальні співвідношення (3.70) - (3.77) регуляризувалися за допомогою нелінійно-в'язких наближень так (при *m*=0).

$$\sigma_{ij} = \sqrt{1+n^2} \frac{\left[\varphi e_{ij} + (\psi + \frac{\varphi}{3})e\delta_{ij}\right]}{\sqrt{\psi e^2 + \varphi \gamma^2 + n^2}}$$
(3.78)

При цьому вводився параметр n, який відповідав за рівент швидкісної чутливості матеріалу. При *n=0* реологічна модель (3.78) стає ідеальнопри збільшенні *п* поведінка матеріалу пластичною. a асимптотично лінійнов'язкого випадку. наближається до Параметр *n* вводився ЛЛЯ регуляризації ідеально пластичної крайової задачі, яка в математичному плані не є коректною (тобто при малих змінах крайових умов розв'язок задачі може дуже змінюватися), і для її розв'язку небажано застосовувати напряму такі методи, що застосовуються для розв'язання пружних або в'язких задач. Для розгляду жорсткопластичної поведінки матеріалу бралося досить мале n(n=0,1).

Всі обчислення, що супроводжують даний аналіз виконані на основі однієї з версій методу скінчених елементів (МСЕ). Аналіз картини плину порошку при пресуванні проводиться в рамках уявлень Ейлера. Поля швидкостей розглядаються в поточній системі координат. На відміну від більшості версій МСЕ, що використовуються в даний час, є вільною від урахування пружної складової деформацій. Схоже припущення пов'язане з тим, що пружні характеристики порошку і пористої заготовки забезпечують дуже малі пружні деформації, що на декілька порядків менше, ніж пластичні. Ця обставина звільняє від необхідності залучати до розгляду поняття і методи, специфічні для механіки скінчених деформацій, зокрема зв'язані з вибором відповідної міри скінчених деформацій і актуальних напружень. Як наслідок, основні рівняння, що випливають із відповідного варіаційного принципу (або принципу віртуальних потужностей), а також із визначальних рівнянь, формулюються щодо вузлових швидкостей. На підставі отриманих полів швидкостей одночасно обчислюються пористість у кожному елементі.

Для розв'язку початково-крайових задач використовуються процедури покрокового інтегрування цих рівнянь, що є кінетичними для таких параметрів, як пористість. Після їх виконання отримані значення використовуються для формування матриці жорсткості для системи рівнянь щодо вузлових швидкостей. Як випливає з аналізу системи визначальних рівнянь, дана матриця сама залежить від шуканих швидкостей, у зв'язку з чим задача їх визначення є нелінійною на кожному кроці і вимагає використання ітераційних процедур. Тут використана процедура градієнтного спуску, що сполучена зі спеціальним способом завдання нульового наближення.

Для моделювання, аналізу та оптимізації процесів отримання складових пористих циліндрів методом радіального ущільнення порошків розроблена система «Математика ФІЛЬТР».

Теоретичне підгрунтя наступне – передбачається, що при засипці порошку в спеціальну капсулу є можливість створити сукупність циліндричних шарів, що містять різні типи порошків, які мають різні механічні характеристики. Система «Математика ФІЛЬТР» може також використовуватися для аналізу процесу радіального ущільнення системи коаксіальних, вкладених один в одного пористих циліндрів, що мають різну початкову пористість. Ця система моделює процеси перерозподілу щільності, а також зміну геометричних параметрів порошкових або пористих шарів, якщо капсула піддається радіальному обтисненню зовнішніми силами. Також допускається визначення розподілу щільності (пористості) в радіальному напрямку в усі моменти деформування, а також зміна товщини шарів, якщо задані початкові значення щільності, вихідні положення розділових ліній шарів і реологічні характеристики матеріалів у спеціальній формі. Основа розрахунків – теорія пластичного деформування і нелінійнов'язкої течії стискуваних матеріалів [258]. Система реалізована в середовищі «Математика-3». Необхідні для реалізації обчислювальні процедури, що містять покрокове інтегрування та ітерації, пов'язані з рішенням системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, розроблені додатково.

Для запуску системи «Математика ФІЛЬТР» необхідно ввести початкові значення щільності кожного шару і координати ліній, що розділяють циліндричні шари. Реологічні характеристики матеріалу вводяться особливим способом. Передбачається, що поведінка матеріалу частинок порошку або каркаса пористого тіла в кожному шарі описується рівнянням (3.79):

$$\sigma = \sqrt{1 + n^2} \sigma_k \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + n^2 \gamma_k}}, \qquad (3.79)$$

де *n*-часове відчуття;

 σ_k , γ_k - параметри апроксимації, які визначаються з аналізу кривої напруження-швидкість деформування для матеріалу частинок порошку ППМ

При цьому константа σ_k може розглядатися як напруженість течії. Для процесів холодної деформації можна вважати n=1. Система дозволяє також враховувати наявність осьового притиску капсули, для чого спільно зі швидкістю радіального обтиснення *v* допускається введення осьової швидкості деформації e_z . Система використовується для розрахунку і оптимізації процесів отримання фільтрів на основі порошкових матеріалів при радіально-ізостатичному пресуванні (рис.3.22, 3.23).



Рисунок 3.22 – Моделювання багатошарового ППМ з відпорними радіусами кожного циліндру та їх густини при радіально-ізостатичному пресуванні



Рисунок 3.23 – Розрахункова залежність напруження від швидкості деформації ППМ



Рисунок 3.24 – Розподіл густини по радіусу кожного шару ППМ в різний момент часу деформування



Рисунок 3.25 – Узагальнений розподіл густини по радіусу кожного шару ППМ в різний момент часу деформування

Проведене моделювання підтвердило нерівномірність розподілу пористості і якісно відповідає розрахунковим даним (рис.3.24 та 3.25).

Процес ущільнення відбувається аналогічно процесу накопичення деформацій. На ділянках ППМ, які розташовані ближче до зовнішньої поверхні (останні шари), спостерігається збільшення пористості. Вивчено вплив густини на розподіл пористості ППМ.

В зонах, розташованих біля осі стержня капсули, величина накопиченої деформації нижча (рис.3.24, 3.25). 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.

Моделювання пористої структури складових пористих циліндрів ППМ з порошку сталі ШХ15 здійснювалося у пакеті прикладних програм *MatLab*. За описаною вище методикою авторами було розроблено програмне забезпечення на мові програмування C++ (програма «FiltrTotal»), що і дало змогу змоделювати

процес радіально-ізостатичного пресування з заданою пористістю ППМ кожного шару окремо [251, 253, 254].

На рис.3.26 представлено зовнішній вигляд програми «FiltrTotal», завдяки якій можна оптимізувати процес отримання складових пористих циліндрів методом радіального ущільнення порошків.

No. and an					_		SCOTI A
-							
Постановка задач	42		Виреден	ня результа	etia		
		Begenspeit og 1	et et inats	NAVABLE (Delle 14	engenti	Полікациянати сре	Distance of
Технополчні парам	метри						
agramed place sectores 1.1	a Deserver receipent for reperfects sade	1.0					
nutina angle denotes end	11 E.2 0.55						
An another Property and	21 0.3 0.64	0.8					
	20						
No gat reporters	n •	0.6					
Обчистивалые пар	раметри						
Kineserte ayuna 🛛 10		0.4					
		0.2					
Jirma Mildy 75 (1994)	-	0		24.5		4.1	
		0	0.2	0,4	0.6	0.8	10

Рисунок 3.29 – Зовнішній вигляд програми «FiltrTotal»

in .						
Постановка задач		Ingenegati de 1-	Виседения результи	an an II an		TT.
Технополны параметри			Childy and the contract of	Angeneti Pelkano	And a Contra Laboration of	
Aproposition and the second se	Reserver resigned in reperties unde	0.53	Пориг	стість		
T in grant data	11 8.2 0.55	0.52				
Reading Systems E.S.	21 0.5 0.64	0.51-				
the and insertions	40	0.5				
Обчисповальні паражит		0.49-				
Кланать ауклас Бо		0.48				
		0.47				
		0.48				
	T.	0.45				
Construction of the state	4	0.44				_

Рисунок 3.27 – Визначення пористості ППМ у заданий момент часу (в режимі «реального» часу)

Розмір частинок.	Π_{uporp} .	Пексп.	Макс. розмір пор.	Серед. розмір пор.	Коефіцієнт проникл	Тонкість фільтрув
MM	%	%		МКМ	МКМ	МКМ
0,6-0,8	39,54	41,0	240	195	254	100-110
0,5-0,63	39,87	40,5	200	161	154	75-85
0,4-0,5	38,45	39,0	185	117	96	50-65
0,315-0,4	37,05	38,5	140	92	62	35-45
0,25-0,315	36,78	37,0	95	59	33	25-35
0,2-0,25	35,01	35,5	75	43	17	20-25
0,16-0,2	34,87	33,5	65	33	14	15-18
0,125-0,16	31,68	32,0	52	30	6	10-14
0,080-0,125	29,54	30,5	31	16	4	7-9

Таблиця 3.7 – Фільтрувальні властивості ППМ з порошку сталі ШХ15

3.5.2. Комп'ютерно-імітаційне моделювання нанесення захисних покриттів на деталі типу «циліндр». Деталі конструкційного призначення, зокрема і ППМ, в різноманітних механізмах, установках, обладнанні піддаються зношуванню, корозії тощо. З метою вирішення цієї проблеми актуальним є нанесення комбінованого захисного покриття, що значно підвищить зносо- та корозійну стійкість деталей [69, 103].

На даний час розглядаються питання, пов'язані з процесом взаємодії поверхонь, що контактують у процесі їхнього взаємного переміщення. Створення і підбір триботехнічних матеріалів грунтуються на вирішенні взаємопов'язаних задач на основі вивчення механіки тертя і фізико-хімічних явищ, що відбуваються на поверхні.

Контакт взаємодії твердих тіл спостерігається лише в окремих зонах, розміри і густина розміщення яких залежать від величини прикладеного навантаження, а також від напружено-деформованого стану контактів. Ці контакти залежать від геометричної форми мікронерівностей і механічних властивостей поверхневого шару [244-248]. Електрометалізація є одним зі способів нанесення металевих покриттів на металеві і неметалеві поверхні. Цей метод активно застосовують для створення захисних зносостійких та антикорозійних покриттів на сталях.

Для нанесення корозійностійкого захисного електрометалізаційного покриття на деталях конструкційного призначення активно використовують метод вакуумно-дугового напилення та плазмоелектролітного оксидування (ПЕО), який є одним із найбільш сучасних і перспективних методів отримання на поверхні металів і сплавів захисних шарів, що мають комплекс важливих характеристик. Властивості отриманих покриттів визначаються складом електроліту і режимами процесу ПЕО.

Колективом авторів [111, 218] було нанесено комбіноване захисне покриття на деталі конструкційного призначення – втулки. Втулки були виготовлені з відходів промислового виробництва, а саме порошку сталі ШХ15 з додаванням міді та без неї (рис.3.28).



Рисунок 3.28 – Загальний вигляд втулок після нанесення комбінованого покриття

На цьому етапі було вивчено проблему напилення на деталь та постало питання розробити програмне забезпечення, яке буде моделювати та досліджувати процес нанесення на деталь захисного покриття. Це значно зменшить витрати часу на обчислення.

У даному програмному забезпеченні повинно якомога повніше відбивати всі основні фактори й взаємозв'язки, що характеризують реальні ситуації, критерії та обмеження. У нашому випадку – це час нанесення, товщина захисного шару та вид покриття. До того ж програма має бути наскільки універсальною (щоб охоплювати якнайширше коло близьких за призначенням об'єктів), так і простою (щоб сприяти виконанню необхідних досліджень із мінімальними затратами).

Для відтворення та порівняння захисного покриття методом ПЕО і електрометалізізаційним методом у розробленому програмному забезпеченні (рис.3.29) необхідно задати дані, виведені на екран. Задаємо: внутрішній діаметр деталі, зовнішній діаметр, висоту деталі, а також характеристики, які стосуються методів напилення:

- продуктивність напилення;
- дефектний шар;
- знос поверхні;
- густину матеріалу;
- швидкість обертання деталі;
- швидкість переміщення металізатора відносно напилювальної поверхні.

leytipsawið paneteg, sne 50 Secora (swi) 100 Inco nosegani, sne 1 yotnina kafegaaty Beecra (spying, tylouð 2.69 – –	Зленцина дахитер, онг 55 Продуктивноть напитення, к// год 1 Деректина шар, кин 1	Шандость обертання датал, мляя 15 Шандость перечишення метальатора відносно кальтованох поверон, мицов 10	Елетроматаладшёне напилення Вил. Вил. Вил. Виртрішнє напилення Копр Магод плавию електролітанного сколдувани Вил. Вил. Вил. Вил. Вил. Вил. Вил. Вил. Вил. Вил. Вил.
		Старт	

fletaal norniny	Seation	E test	CTHHE !	10.000
the room the cutto	1 North Least	J 1		

Рисунок 3.29 – Інтерфейс програми «Комп'ютерно-імітаційне моделювання для напилення захисних середовищ на деталь» [223,272]

Після введення всіх необхідних початкових даних проводимо інтерактивне обчислення параметрів напилення (рис.3.30).

Старт	
Обчаксаюты пористисть	
Деталі досліду Графіки Візуальна модель	
Товщина напилення: 300 мкм	
Час напилення ESS: 100 сек (1.667 хв)	
Час напилення РЕО: 1344 сек (299.117 хв)	

Рисунок 3.30 – Результати обчислення параметрів напилення захисного покриття на втулку

Для побудови необхідних графічних залежностей у даному програмному забезпеченні розроблений відповідний модуль «Chart» (рис.3.31 та 3.32).



Рисунок 3.31 – Графічна залежність товщини електродугового напилення відносно часу нанесення



Рисунок 3.32 – Графічна залежність товщини плазмоелектролітного оксидування відносно часу нанесення

За наочність комп'ютерного моделювання даного програмного забезпечення відповідає модуль «Clearness» (рис.3.33).



Рисунок 3.33 – Наочність комп'ютерного моделювання процесу нанесення покриття

Висновки до розділу 3

Показано, що невизначеність геометрії впливає на міцність складових компонентів, які знаходяться на початковій стадії заповнення форми та наведено

теоретичні передумови моделювання випадкового розміщення порошку на стадії засипки у бункер з урахуванням фізичних параметрів.

2. Розроблена вперше методика розрахунку фізичних параметрів, які закладаються для дослідження реальних упаковок (двомірний випадок), що дозволяє визначати вплив фізичних параметрів порошку на процес засипки його у форму.

3. Вперше розроблена комп'ютерна система, яка дає можливість визначати розподіл густини по радіусу кожного шару ППМ в різний момент часу деформування.

4. Встановлено та підтверджено комп'ютерним моделюванням, що при пресуванні фільтрувальних елементів циліндричної форми розподіл величини пористості нерівномірний. Зі збільшенням радіуса величина пористості зростає.

5. 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 вказаний опір має місце.

6. Вперше проведено аналіз та розрахунок розподілу густини за радіусом пустотілого ППМ, отримано методом радіально-ізостатичного пресування. Під час проведення теоретичних розрахунків отриманий результат, який дозволяє аналізувати фактори, що сприяють неоднорідності розподілу густини.

7. Вперше розроблено програмне забезпечення – комп'ютерну програму «Комп'ютерно-імітаційне моделювання для напилення захисних середовищ на деталь» (свідоцтво №71207) для розрахунку захисного покриття на ППМ з відходів промислового виробництва.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ОТРИМАННЯ ППМ З ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Ущільнення ППМ при радіально-ізостатичному пресуванні

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. Це стало можливим завдяки істотному прогресу в розумінні основних особливостей поведінки порошкових матеріалів у процесі їх ущільнення, створення відповідних математичних моделей.

Важливе місце також займають модельні експерименти прогнозування залежностей властивостей пористих матеріалів від технологічних параметрів отримання виробів з використанням аналітичних, числових та числовоаналітичних.

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

Комп'ютерне моделювання поведінки фільтрувальних елементів, що ущільнюються, при радіально-ізостатичному пресуванні, встановлення закономірностей зміни форми елемента, розподілу пористості та інших параметрів, що визначають експлуатаційні властивості, є актуальною проблемою.

Найбільш поширеним методом моделювання деформаційної обробки порошкових пористих матеріалів є метод скінчених елементів [279].



Рисунок 4.1 – Пористі порошкові ППМ простої і складної форми

На даний момент є ряд публікацій, в яких проведені експериментальні [88, 46, 281] і теоретичні дослідження [35, 194, 250, 283] за визначенням розподілу пористості в фільтрах, форма яких порожнистий циліндр. У той же час, закономірності ущільнення порошкових фільтруючих елементів складної форми не досліджені.

Досліджуючи літературні джерела [27, 67, 88, 178, 183, 283] можна зробити висновок, що перспективними методами отримання ППМ є методи, які направлені на створення ППМ з анізотропною структурою, у яких розміри та кількість пор змінюються в напрямку фільтрації. У таких ППМ тонкість фільтрації буде визначатися шаром з мінімальним розміром пор, проникливістю є інтегральна величина, яка визначається пористою структурою всього матеріалу, а забруднювач у процесі фільтрування розподіляється по всьому об'єму фільтрувального елементу, що дозволяє збільшити ресурс роботи фільтру. **4.1.1. Ущільнення порошкового фільтрувального елемента складної форми** при радіально-ізостатичному пресуванні. Фільтрувальні ППМ у вигляді тіл обертання (труби, диски, колби тощо) все більше розповсюджуються у різних галузях техніки, так як вони володіють мають високу технологічність конструкції. Основні вимоги до геометрії таких виробів у забезпеченні точності зовнішніх та внутрішніх розмірів.

Активно такі ППМ, що використовуються, характеризуються досить високою технологічністю виготовлення. Розміри і форма таких виробів визначаються габаритами пристроїв, складовою частиною яких вони є. Збільшення продуктивності цих пристроїв зі збереженням габаритів дає можливість значно підвищити ефективність їх використання.

Моделювання виконано на основі континуального підходу. Як визначальні співвідношення використовували співвідношення теорії пластичності пористого тіла [261]. Визначення форми заготовки, що ущільнюється, а також полів щільності, напружень і деформацій виконано на основі методу скінченних елементів [15].

Найбільш придатні для пресування еластичні оболонки із поліуретану, який витримує багатократні деформації при тисках до 600 МПа. Ці оболонки добре зберігають пружні властивості, технологічні – при виготовленні, і мають хороші а

д Точність пресовки, яка отримана радіально-ізостатичним пресуванням, валежить від точності виготовлення внутрішньої поверхні еластичного інструменту (рис.4.2).

- 3
- i
- й
- Н
- i
- B
- Л
- a
- •


Рисунок 4.2 – Форма для пресування фільтрувальних ППМ зі сферичним дном.

Для порівняння та аналізу готового виробу розглядалися дві схеми ущільнення: радіальне (рис.4.3, а) та осьове (рис.4.3, 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.



Рисунок 4.3 – Схеми радіального (а) та осьового (б) ущільнення: 1 - порошок, що ущільнюється, 2 - оправка, 3 - кришка, 4 - стінка

У зв'язку з симетрією при моделюванні розглядали половину осьового перерізу. Вважали, що оправка нерухома. Також вважали, що при радіальному ущільненні нерухома кришка (3 на рис.4.3), а при осьовому ущільненні нерухома стінка (4 на рис.4.3).

Поверхня поліуретану, на яку здійснювалося силове навантаження, переміщалася з постійною швидкістю в радіальному (радіальне ущільнення), або в осьовому (осьове ущільнення) напрямку.

У початковий момент відбувається ущільнення стінки фільтруючого елемента. Розподіл пористості по радіусу стінки фільтра нерівномірний. Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Отриманий результат відповідає даним, наведеним в роботах [88, 178]. Розподіл величини накопиченої пластичної деформації також нерівномірний. Максимальна величина накопиченої деформації - у внутрішній поверхні стінки фільтра, мінімальна - у зовнішній поверхні. На рис.4.4, 4.5 представлений розподіл пористості і накопиченої пластичної деформації при осьовому ущільненні. Найбільш інтенсивно порошок ущільнюється в області дна фільтра. Розподіл пористості по радіусу дна нерівномірний (рис.4.4, а). Зі збільшенням радіуса пористість зростає.



Рисунок 4.4 – Схематичне зображення розподілу пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при осьовому ущільненні.



Рисунок 4.5 – Результати розподілу пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при осьовому ущільненні

При подальшому пресуванні відбувається збільшення відносної щільності стінки і поширення процесу ущільнення на дно фільтрувального елемента. Проте, як видно з рис.4.4, у кінці процесу пресування величина пористості в зоні дна фільтра значно вище, ніж в області стінки. Характер зміни пористості по радіусу стінки залишається таким же, як на початку пресування. Розподіл пористості по висоті стінки нерівномірний: у нижній і верхній частині (рис.4.4, а) пористість вище.

Величина накопиченої пластичної деформації розподілена за об'ємом фільтра аналогічно розподілу відносної щільності. В зоні дна фільтрувального елемента вона нижче.

Ущільнення порошку в зоні стінки відбувається менше. У внутрішній поверхні стінки пористість нижче, а у зовнішній - вище. Величина накопиченої пластичної деформації вище в області внутрішньої поверхні стінки.

У зв'язку з цим була розглянута радіальна схема ущільнення, при якій порошок ущільнювали в радіальному напряму (рис.4.6). Результати моделювання представлені на рис.4.7 – 4.9.



Рисунок 4.6 – Схема радіально-ізостатичного пресування для отримання ППМ у вигляді колби

На першому етапі більш інтенсивно ущільнюється стінка, а на другому етапі – дно фільтрувального елемента. Внаслідок величини пористості та накопиченої пластичної деформації розподілені більш рівномірно.



Рисунок 4.7 – Схематичне зображення розподілу пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при радіальному ущільненні



Рисунок 4.8 – Переміщення порошку у ППМ у горизонтальному (a) та вертикальному (б) при радіальному ущільненні



Рисунок 4.9 – Результати розподілу пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б) при радіальному ущільненні

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.

При радіальному застосуванні навантаження відбувається більш інтенсивне ущільнення матеріалу в зоні стінки фільтра. Дно фільтра ущільнюється менше (рис.4.10).

У разі застосування схеми осьового ущільнення спостерігається більш інтенсивне ущільнення дна фільтра. Стінка фільтра при цьому також ущільнюється, але менш інтенсивно.

Зі збільшенням радіуса величина пористості стінки і дна фільтра зростає, а величина накопиченої пластичної деформації зменшується.



Рисунок 4.10 – ППМ у вигляді колби, які отримані з порошку ШХ15

4.1.2 Ущільнення багатошарового ППМ при радіально-ізостатичному пресуванні. Методом радіально-ізостатичного пресування отримують також багатошарові фільтри, пористість шарів яких відрізняється (рис.4.11). Завдяки наявності змінної пористості має місце більш рівномірній розподіл забруднювача по об'єму порівняно з одношаровими фільтрувальними елементами, що дозволяє збільшити ресурс роботи фільтру. При цьому очищення ефективне [283, 284].

При пресуванні багатошарових фільтрів навантаження знімається після ущільнення кожного шару. У порожнину між отриманим шаром і еластичним елементом, що прийняв первісну форму, засипається новий порошок, далі процес пресування триває. Для розширення асортименту фільтрувальних пористих порошкових виробів, економії сировини та витрат на виготовлення суцільний еластичний вкладиш можна виготовляти як набір вкладишів один в один. Це дає змогу керувати товщиною шарів і отримувати вироби з більш широким діапазоном розмірів, а також дозволяє покращити технологічність та культуру пресування.



Рисунок 4.11 – Двошаровий ППМ виготовлений методом радіальноізостатичного пресування

Схема пресування фільтра, що має форму пустотілого циліндра, наведена на рис.4.12. Переміщення внутрішньої поверхні порошку 1 в напрямку зменшення радіусу обмежено жорсткою оправкою 2. Зовнішня поверхня виробу переміщається в радіальному напрямку під впливом еластичного елемента. При моделюванні вважали, що ця поверхня рухається з постійною швидкістю. На торцях циліндра переміщення в осьовому напрямку вважали рівним нулю. Величина початкової пористості засипаного порошку була 0.8. Діаметр оправки дорівнював 20 мм.

Початковий зовнішній діаметр одношарового фільтрувального елемента (та внутрішній діаметр еластичного елемента) дорівнював 40 мм.

Розглядалося також ущільнення 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.



Рисунок 4.12 – Схема ущільнення ППМ циліндричної форми: 1 - порошок, що ущільнюється, 2 - оправка

Результати моделювання з розподілу пористості по перерізу фільтрувальних елементів наведені на рис. 4.13.

При ущільненні одношарового фільтра розподіл пористості нерівномірний (рис.4.13, а). Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Отриманий результат відповідає даним, наведеним в роботах [183, 192]. Зі збільшенням рівня деформації різниця між величинами пористості матеріалу у внутрішньої і зовнішньої поверхонь фільтра зменшується.





Рисунок 4.13 – Розподіл пористості по радіусу (мм) в одношаровому (а), двошаровому (б) і тришаровому (в) ППМ

На рис. 4.13, 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 приводить до того, що настає момент, коли зовнішній шар ущільнився і обидва шари продовжують деформуватися одночасно.

Ущільнення шарів тришарового фільтра відбувається аналогічно (рис.4.13, в). Товщиною і пористістю шарів можна управляти за рахунок зміни початкової пористості засипаного порошку, внутрішнього діаметра еластичного елемента, а також тиску пресування.

На рис. 4.14 та 4.15 зображено структуру двошарового та тришарового ППМ відповідно.



×250

Рисунок 4.14 - Структура двошарового ППМ: І – й шар розмір частинок порошку (-0,200+0,160) мм; ІІ – й шар розмір частинок порошку (-0,160+0,100) мм



×250

Рисунок 4.15 – Структура тришарового ППМ з порошку ШХ15: І – й шар розмір частинок порошку (-0,315+0,200) мм; ІІ – й шар розмір частинок порошку (-0,200+0,160) мм; ІІІ – й шар розмір частинок порошку (-0,160+0,100) мм

Результати моделювання розподілу пористості при поетапному процесі ущільнення дво- та тришарового ППМ наведені на рис.4.16, 4.17.



Рисунок 4.16 – Моделювання розподілу пористості для поетапного ущільнення двошарового ППМ: а) ущільнення першого шару, засипка другого; б) ущільнення другого шару



Рисунок 4.17 – Моделювання розподілу пористості для поетапного ущільнення трихшарового ППМ: а) ущільнення двох шарів, засипка третього; б) ущільнення третього шару

б)

При радіально-ізостатичному пресуванні багатошарових ППМ циліндричної форми розподіл величини пористості нерівномірний. Зі збільшенням радіуса величина пористості збільшується.

4.1.3. Ущільнення ППМ з розвинутою поверхнею при радіальноізостатичному пресуванні. Підвищення продуктивності ППМ без зміни їх розмірів, що може бути досягнуто через збільшення площі робочої поверхні за рахунок її ускладнення [183, 270, 289].

На рис. 4.18 показана еластична оболонка для пресування виробів з гвинтовими зовнішньою і внутрішньою поверхнями, стержень для її відливання. На рис. 4.19 – гвинтові ППМ з порошку сталі ШХ15 і технологічне оснащення для їх пресування, яке розроблено у Білоруському національному технічному університеті [81-84]. Варто зазначити, що гвинтові фільтри з тими ж габаритними розмірами мають більшу площу робочої поверхні порівняно з гладкою циліндричною або квадратною трубою.



Рисунок 4.18 – Оболонка для Рисунок 4.19 – Гвинтові фільтри і пресування гвинтових виробів і форма для їх отримання стержень для її відливання

Один з способів збільшення площі робочої поверхні ППМ – формування ребристої бічної поверхні, оскільки саме така трансформація забезпечує ефективніше використання виробів. Початкові дані при проектуванні ребристих ППМ слід задавати важаючи на досвід розробки технології і устаткування для радіального пресування. Так, не дивлячись на те, що коефіцієнт Пуассона матеріалу еластичного передавального середовища (зокрема, поліуретану) наближається до 0,5, існують обмеження за формою і мінімальною товщиною елементів еластичних форм для пресування. Тому в перелік початкових даних повинні входити такі показники, як мінімальна відстань між сусідніми зубами, радіуси переходів між поверхнями, максимальна висота зубів залежно від розмірів пресування, тобто параметри, що визначають технологічність і принципову можливість виготовлення конкретного виробу.

Розглянемо послідовність оптимізації розмірів виробу з перерізом (рис.4.20, 4.21). Початковими параметрами є: B - товщина стінки; L_s - довжина внутрішньої дуги ребра; D_u і D_s – дотичні до зовнішнього і внутрішнього діаметрів фільтру відповідно; φ_1 - мінімальний кут нахилу бічної сторони ребра.



Рисунок 4.20 – Переріз ППМ з ребристою бічною поверхнею



Рисунок 4.21 – Переріз ППМ з ребристою бічною поверхнею з розмірами для подальшого моделювання

Приймемо наступний порядок розрахунку:

– обчислення довжини дуг L_l , L, L_p і кутів α , φ , β усередині фільтру;

– визначення попередніх (розрахункових) значень кута α (позначається як

 (α_p) і розрахункової кількості зубів z_p ;

– уточнення кількості зубів шляхом відкидання дробової частини *z_p*;

– розрахунок кута α , кута σ та довжини бічної сторони ребра c усередині фільтру;

– визначення загальної довжини периметра усередині фільтру:

$$L_0 = (L + L_s + 2c)z; (4.1)$$

 розрахунок коефіцієнта збільшення площі поверхні усередині фільтру по відношенню до гладкого циліндра:

$$K_s = \frac{L_0}{\pi D_u},\tag{4.2}$$

– обчислення кутів β_1 , γ_1 , σ_1 , довжини дуги L_{sl} і довжини бічної сторони ребра зовні фільтру c_l , встановлення загальної довжини периметра із зовнішнього боку фільтру:

$$L_{01} = (L_1 + L_{s1} + 2c_1)z, (4.3)$$

 визначення коефіцієнта збільшення площі поверхні зі зовнішнього боку фільтру:

$$K_{s1} = \frac{L_{01}}{\pi (D_u + 2B)}; \tag{4.4}$$

– обчислення середнього значення коефіцієнта збільшення поверхні:

$$K = (K_s + K_{s1})/2. \tag{4.5}$$

Розглянемо залежність коефіцієнта *K* від відношення $K_D = Ds/Du$ для фільтру з параметрами: $\varphi_1 = 5^\circ$, B = 3 мм, $D_u = 74$ мм при змінній кількості зубів (рис.4.22). Переривчастий характер згаданої залежності пояснюється округленням в меншу сторону заздалегідь встановлених значень. За даною залежністю можна визначити оптимальні значення K_D і *z*. Існує прийнятний діапазон співвідношень внутрішніх і зовнішніх діаметрів ППІМ з точки зору максимально можливого збільшення їх поверхні з урахуванням прийнятих технологічних обмежень. Кількість зубів на виробах потрібно приймати парним, що спрощує їх виготовлення.



Рисунок 4.22 – Залежність коефіцієнта K від відношення $K_D = Ds / Du$

Порошкова заготовка ППМ з розвиненою бічною поверхнею, еластична деформувальна оболонка і жорстка формотворна оправка утворюють разом реологічно і геометрично неоднорідну систему. Постійний взаємовплив ППМ та еластичної оболонки в процесі пресування не дають можливості отримати адекватне рішення задачі з визначення напружень, деформацій і, в підсумку, розподілу щільності в пресуванні. При цьому геометрична неоднорідність визначається конфігурацією пресування і, відповідно, інструменту, а реологічна - фізико-механічними властивостями матеріалів порошку, еластомеру і оправки. Тоді задача з розрахунку кінетичних характеристик процесу деформування зазначеної системи зводиться до визначення зон, які займають відповідні матеріали, встановлення співвідношень між напруженнями і деформаціями для кожного матеріалу і розв'язання системи диференціальних рівнянь в часткових похідних для розрахунку компонент тензорів напружень і деформацій.

Відносна щільність пресування визначається виразом:

$$\vartheta = \frac{P}{P_{\text{KOM}}} = \frac{V}{V_{nn}},\tag{4.6}$$

де *р*, *р*_{ком} – поточна щільність пресування і матеріалу порошку;

V, *V*_{nn} – обсяг матеріалу порошку і поточний обсяг пресування відповідно.

Визначимо відносну об'ємну деформацію пресованого порошку *θnn* таким виразом:

$$\theta_{nn} = \frac{V_{nn0} - V_{nn}}{V_{nn0}},$$
(4.7)

Як рівняння, яке об'єднує тиск пресування зі щільністю, приймемо відношення:

$$p = p_{\rm Kp} \left[\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\vartheta (1 - \vartheta_0)} \right], \tag{4.8}$$

де *P_{кp}* - критична величина тиску пресування, що відповідає максимальному ущільненню;

b – показник ступеня, сталий в значному інтервалі щільності матеріалу.

Після певних перетворень отримуємо:

$$p = p_{kp} \left[\frac{\theta_{nn}}{1 - \vartheta_0}\right]^d,\tag{4.9}$$

Так як тиск пресування пов'язаний з відносною об'ємною деформацією через модуль об'ємного стиснення:

$$p = K_v \theta_{nn}$$

причому $K_V = K_V(p)$, то:

$$K_{\nu} = p_{kp} \frac{\theta_{nn}^{b-1}}{(1-\theta_0)^{b'}}$$
(4.10)

З огляду на порівняно невеликі зміни коефіцієнта Пуассона пресованого порошку при пресуванні [178], а також для спрощення розрахунку він приймається сталим. Модуль об'ємного стиснення пов'язаний з модулем Юнга таким співвідношенням:

$$K_{\nu} = \frac{E}{3(1-2\mu)},\tag{4.11}$$

3 урахуванням виразів (4.10) з (4.11) отримаємо:

$$E = 3(1 - 2\mu)K_{\nu} = 3(1 - 2\mu)\frac{\theta_{nn}^{b-1}}{(1 - \theta_0)^b},$$
(4.12)

Для еластичної оболонки і оправки, відповідно, маємо:

$$\overline{E} = f(\theta_n), \overline{\overline{E}} = E_{cm}, \tag{4.13}$$

де $E = f(\theta_n)$ – визначається експериментально;

*Е*_{ст} - модуль Юнга матеріалу оправлення;

За аналогією з [183], отриманою для еластомеру, систему рівнянь для розрахунку процесу спільного деформування порошкової заготовки і деформувального інструменту остаточно можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{c} \left((1 - \overline{\mu}) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \overline{\mu} \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{G} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right) = 0; \\ x, y \in \overline{\Omega}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{c} \left((1 - \overline{\mu}) \frac{\partial u_y}{\partial y} + \overline{\mu} \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{G} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right) = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(c \left((1 - \mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(G \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(c \left((1 - \mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(G \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(c \left((1 - \mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \overline{\mu} \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{G} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{c} \left((1 - \overline{\mu}) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \overline{\mu} \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{G} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{c} \left((1 - \overline{\mu}) \frac{\partial u_y}{\partial y} + \overline{\mu} \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{G} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right) = 0; \\ x, y \in \overline{\Omega}, \end{cases}$$

де $\overline{\Omega}$, Ω , $\overline{\Omega}$ – область, яку займає порошок між оболонкою та оправко відповідно;

$$\exists e \ \varepsilon_x = (\overline{\varepsilon_x}, \varepsilon_x, \overline{\varepsilon_x}), \ \varepsilon_y = (\overline{\varepsilon_y}, \varepsilon_y, \overline{\varepsilon_y}), \ u_x = (\overline{u_x}, u_x, \overline{u_x}), \ u_y = (\overline{u_y}, u_y, \overline{u_y})$$

Запропонована математична модель спільного деформування геометрично і реологічно неоднорідної системи «дискретне ущільнювальне тіло – деформувальний інструмент», що стоврена на рівняннях класичної теорії пружності з параметрами тиску пресування, фізико-механічних властивостей матеріалів, дозволяє розглядати реологічно і геометрично неоднорідну систему з однакових позицій. Це забезпечує встановлення залежності між компонентами тензорів напружень деформацій при радіальному пресуванні заготовок ППМ з розвиненою бічною поверхнею.

Розглянемо процес пресування ППМ з розвинутою бічною поверхнею у вигляді повздовжніх ребер, утворених дугами окружностей з розмірами, які розраховані з точки зору максимізації коефіцієнта збільшення поверхні при виконання технологічних операцій. Розрахункові значення визначені на рис.4.20 та 4.21. Матеріал еластичної оболонки – поліуретан Адіпрен Л-167. Порошок, що пресується – порошок сталі ШХ15. Тиск пресування – 100 МПа.

Результати моделювання на основі приведеної математичної моделі представлено на рис.4.23, 4.24.



Рисунок 4.23 – Розбиття площини січення ППМ на кінцеві елементи





Рисунок 4.24 – Деформований стан системи

Приймаючи термінологічні напруження, направлені перпендикулярно поверхні контакту еластичного інструменту та порошку нормальними, а напруження, які направлені по дотичній до цієї поверхні в площині, перпендикулярна осі пресовки, дотичними, проведемо аналіз результатів моделювання.

Величина напружень по контуру пресовки не є постійною. Ця обставина визначається властивостями матеріалу еластичної оболонки та конфігурацією поверхні пресовки. Завдяки геометричній неоднорідності 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 пресуємого ППМ, що зумовлено перетіканням поліуретану під дією тиску. З рис. 4.24 видно, що вирішальний вплив на розподіл густини по об'єму пресовки ППМ дає рівень і співвідношення величин нормальних та дотичних напружень.

На рис. 4.25 – ППМ з розвинутою поверхнею.



Рисунок 4.25 – ППМ з розвинутою поверхнею

Моделювання процесу пресування при ущільненні ППМ на основі порошку сталі ШХ15 показало, що характер розподілення густини по контуру пресовки не змінюється. Це вказує на визначальну роль характеристик матеріалу деформувального інструменту в процесі пресування, що забезпечує одну з основних вимог до пористих проникних матеріалів – рівномірність розподілу густини по об'єму [103, 105, 289в].

4.2. Прогресивна технологія спікання ППМ з відходів промислового виробництва

Сучасний етап розвитку порошкової металургії характеризується процесом непереривного збагачення її новими ідеями отримання фільтрувальних ППМ. Однак безпосереднє використання тільки таких порошків та технологій отримання фільтрів не доцільне: по-перше, складно отримати бездефектний

високоефективний фільтр, по-друге, в сучасних умовах розвитку ринкової економіки та промисловості значно зростає вартість та знижується проникливість фільтрувальних ППМ, по-третє, з кожним днем зростають вимоги щодо використання сучасних та перспективних фільтрувальних матеріалів у всіх галузях промислового комплексу.

Для того, щоб підвищити конкурентноздатність і конкурентоспроможністі, розширення області застосування і асортименту фільтрів на сучасному етапі розвитку світової промисловості пропонується модифіковувати та спрощувати процеси отримання фільтрувальних ППМ, зокрема при спіканні.

Економічна ефективність виробів з порошкових матеріалів забезпечується не тільки за рахунок експлуатаційних якостей, але й на етапі їх виробництва за рахунок застосування дешевої сировини та енергозбереження на всіх стадіях технологічного процесу [27, 80]. Для визначення собівартості фільтрувальних пористих порошкових матеріалів велике значення відіграє аналіз витрат, які нерозривно пов'язані з технологією. Так, найбільшу частку в собівартості при виробництві ППМ методами порошкової металургії займають витрати на основні матеріали та електроенергію (80-90 %). Традиційні способи спікання фільтрувальних ППМ потребують достатньо потужного пічного устаткування зі захисними середовищами. Витрати на спікання складають 40-50 % від собівартості продукції [290, 189]. Саме ці обставини і стали передумовою для розвитку нових способів спікання фільтрувальних матеріалів.

На основі СВС-методу розроблені нові енергозберігаючі технології [89, 241] виготовлення ППМ для фільтрування механічних забруднень.

Як CBC-реагенти, здатні до екзотермічної взаємодії, зазвичай використовують метали (Ti, Ta, Zr, Nb та ін.) як пальне, і неметали (B, C, Si та ін.) як окисники. Головні вимоги до структури початкової системи – забезпечення умов для ефективної взаємодії реагентів. Шихта в CBC-процесах може знаходитися у вакуумі, на відкритому повітрі, в інертному або реагуючому газі під тиском. У створенні CBC-системи можуть брати участь всі хімічно активні при високих температурах речовини як реагенти (хімічні елементи,

індивідуальні сполуки, багатофазні структури) та інертні речовини як наповнювачі або розчинники. Як реагенти можна використовувати також мінеральну сировину та промислові відходи [89].

Всі процеси СВС належать до гетерогенних, тобто швидка реакція і тепловиділення пропорційні питомій поверхні реагентів. Тому, відповідно, чим менший розмір часток компонентів у СВС-процесі, тим більша швидкість самого процесу. На практиці у будь-яких системах СВС розмір часток реагентів не повинен перевищувати 200 мкм. Хоча досить часто використовують порошки частинами трохи 50 мкм [242].

Експериментально встановлено, що CBC-процес реалізується в широкому діапазоні компонентів, що відповідають певним вимогам [251, 348]. Так для безгазових систем CBC реалізується в діапазоні концентрацій 0,4 – 2,5. При цьому швидкість CBC-процесу змінюється в діапазоні 1,6 – 25,0. Оптимальне співвідношення реагентів відповідає утворенню сполук (синтез кінцевих продуктів) з найвищою теплотою утворення, якщо CBC-процес приводить до синтезу одного продукту. Швидше всього розповсюджується хвиля синтезу за стехіометричною сумішшю. У таких сумішах, як правило, горіння стаціонарне, тобто швидкість розповсюдження хвилі CBC зразком однакова в будь-який момент часу. При деякому фіксованому для кожної системи співвідношення компонентів з'являється границя горіння. Так, для сумішей Ti + C він відповідає співвідношенню C:Ti = 0,32.

Принципово фіксований для кожної системи співвідношень компонентів працює над попереднім горінням. Наприклад, для змішувача Ті + відповідає відповідності С: Ті, рівне 0,32.

Залежно від теплових реакцій взаємодії реагентів в безгазовій системі швидкість горіння по-різному реагує на розміри зразка. Для системи з високою теплотою реакції (наприклад, у системі Ті + С) швидкість їх горіння майже не залежить від діаметра зразка, навіть при дуже малих значеннях (менше 1 см), за рівнем ефективності теплових результатів в зоні реакцій, що значно перетворює рівень теплового теплопостачання. Однак для багатьох інших CBC-систем (малоплинних), в яких рівень теплових процесів недостатньо високий,

тепловтрати починають відбуватися при розмірі зразка ≈1 см, призводячи до зменшення швидкості горіння, недогоранню і навіть до загасання.

Перспективним напрямком для створення фільтрувальних ΠΠΜ ε отримання фільтрів з відходів промислового виробництва, а зокрема з порошку сталі ШХ15. Саме тому була розроблена технологія пресування методом СР-ІП подальшим спіканням допомогою саморозповсюджуючого 3 за Для вихідними високотемпературного синтезу. приготування суміші компонентами є порошок титану марки ПТС-1, сажа (С) та порошок сталі ШХ15 після додаткової обробки [88, 292].

Компоненти були змішенні у співвідношенні 45% Ti, 45% ШХ15 (з розміром частинок -200+160 мкм) та 10% $C(250 \ r - Ti; 250 \ r - ШХ15; 60 \ r - C)$ у кульовому млині. Поєднання Ti + C + ШХ15 вибране для підвищення швидкості CBC– спікання для отримання анізотропних властивостей ППМ з пористою структурою.

Оптимальний при СР-IП, з точки зору формувальності, для суміші Ti+C+ШX15 становив Р = 140 ...160 МПа.

В основі технології СВС–спікання ФМ з відходів промислового виробництва лежить процес горіння сумішей порошків (*Ti+ШX15+C*) на повітрі без попереднього нагрівання (рис. 4.26).









Рисунок 4.26 – Отримання ППМ на основі *Ti+C+ШX15* за допомогою CBC – процесу

Після проведення CBC–спікання (t_{сп}=30 сек) далі відбувається самовільне поступове охолодження готового виробу протягом 30 сек.

У процесі синтезу йде реакція з утворенням карбіду металічної суміші титану з порошком ШХ15 (рис.4.27):

$$(Ti + IIIX15) + C = (Ti + IIIX15)C + Q$$



Рисунок 4.27 – Зображення хвилі СВС-процесу при спіканні ППМ

На рис. 4.28 наведена структура фільтрувального ППМ на основі карбіду металічної суміші титану з порошком ШХ15.



Рисунок 4.28 – Структура ППМ на основі *Ti+C+ШX15* (40% *Ti*, 40% *ШX15* та 20% *C*) за допомогою СВС – процесу

На рисунку 4.29 наведені ППМ із суміші порошків титану та відходів промислового виробництва як трубки та конуса, одержаного методом СР-ІП та CBC–спіканням.



Рисунок 4.29 – Загальний вигляд ППМ на основі карбіду титану та ШХ15

Виготовленні дослідні партії ППМ 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 та емульсії від 1 л/год до 1000 л/год; по мастильних речовинах від 0,5 1 л/год до 200 л/год;

- неперервність роботи (до регенерації) при визначеній продуктивності не менше 30 год, а термін служби – не менше 1 року;
- профілактика відбувається методом регенерації;
- корозійностійкі.

Із урахуванням того, що пороутворювач випаровується на початку процесу спікання, знайдено розподіл великих і малих пор на початку спікання.



л Рисунок 4.31 – Розподіл пористості по перерізу двошарового фільтру після спікання

п Застосувавши запропоновану методику можна відстежувати еволюцію вмісту маленьких і великих пор у процесі спікання.

- р
- И

4.3. Нанесення захисного покриття на вироби конструкційного призначення та ППМ з відходів промислового виробництва

Для нанесення корозійностійкого захисного електрометалізаційного покриття на деталях конструкційного призначення використали метод вакуумнодугового напилення та плазмоелектролітного оксидування (ПЕО), який є одним із найбільш сучасних і перспективних методів отримання на поверхні металів і сплавів захисних шарів, що мають комплекс важливих характеристик. Властивості отриманих покриттів визначаються складом електроліту і режимами процесу ПЕО.

Колектив авторів [269-271] наніс комбіноване захисне покриття на деталі конструкційного призначення – втулки, що працюють в умовах реверсивнопоступального тертя. Втулки були виготовлені з відходів промислового виробництва, а саме порошку сталі ШХ15 з добавлянням міді та без неї (рис.4.32).



Рис.4.32 – Загальний вигляд втулок після нанесення комбіновано покриття

4.3.1. Визначення товщини комбінованих захисних покриттів. Одним із важливих параметрів покриття є його товщина [293, 294]. Комбіноване захисне покриття, утворене двома видами покриттів: напиленим електродуговим і плазмоелектролітним оксидокерамічним шаром (ОКП), досліджували на спресованих втулких різного складу. Під №1 було позначено деталь, основний матеріал якої був спресований порошок зі сталі ШХ15, а під №2 – основа

складається зі порошку ШХ15 та включень міді (рис.4.33). Спочатку визначали товщину електродугового покриття. Для точності результатів проводили мінімум три дослідження на одному зразку. Перше значення товщини для зразка №1 становило 83 мкм, друге – 78 мкм, третє – 86 мкм. Середнє значення товщини становить 82,8 мкм.







Рисунок 4.33 – Зображення товщини електрометалізаційного покриття: а) зразок № 1; б) зразок № 2, ×100

Аналогічно визначалась товщина зразка №2. Перше значення товщини становило 43 мкм, друге – 49 мкм, третє – 45 мкм. Середнє значення товщини становить 45,6 мкм.

Дослідження товщини другого шару покриття (оксидокерамічного) визначали аналогічно. Отже, середня товщина електродугового покриття становить 82,8 мкм, а середня товщина оксидокерамічного шару становить 25 мкм (рис.4.34).

Отже, середня товщина комбінованого захисного покриття зразка №1 становить 107,8 мкм.





а) б) Рисунок 4.34 - Зображення товщини: а) напиленого електрометалізаційного покриття, ×100); б) оксидокерамічного покриття, ×100

Середня товщина електродугового покриття становить 45,6 мкм, а середня товщина оксидокерамічного шару становить 25 мкм.

Отже, середня товщина комбінованого захисного покриття зразка №2 становить 70,6 мкм (рис.4.35).



Рисунок 4.35 – Зображення товщини: а) оксидокерамічного покриття, ×100; б) напиленого електрометалізаційного покриття, ×100



Рисунок 4.36 – Графічна залежність товщини покриття від методу нанесення: а) зразка № 1; б) зразка № 2

На основі отриманих даних можна зробити висновок про те, що товщина електрометалізаційного покриття залежить від складу основного металу спресованої втулки (рис.4.36).

Отже, провівши певні експерименти, було встановлено, що на товщину покриттів суттєво впливає хімічний склад основного металу спресованої втулки.

Таким чином досліджено, що електрометалізаційне покриття утворюється приблизно у два рази тонше для втулки, в складі якої міститься мідь.

Однак товщина електродугового покриття в лужному електроліті на обох втулках однакова.

Товщина ОКП, як зазначалось вище, яка визначає їх функціональні властивості, переважно залежить від режимів синтезу та складу основного металу. Визначення їх взаємного впливу є необхідним для встановлення оптимальних режимів формування покриттів.

Такий параметр встановлювали на цирконієвому сплаві складу Zr-2,5%Nb. Синтез ОКП проводили в лужних електролітах, основним складом яких є КОН та рідке скло з концентрацією відповідно 3...10 г/л та 2...15 г/л з додаванням перекису водню, гліцерину, оксиду хрому за густини струму 5...20 А/дм², що узгоджується з попередніми дослідженнями.

На основі проведених досліджень [113, 121, 80] встановлені оптимальні параметри процесу синтезу і склади електролітів для отримання ОКП з пропонованими властивостями.

Було виявлено, що товщина ОКП t пов'язана з часом обробки τ . Зі збільшенням часу обробки товщина покриву зростає. На рис. 4.37 показані залежності товщини оксидокерамічного покриву t від часу синтезу його τ в менш та більш концентрованих електролітах. Так за меншої концентрації електроліту за той самий час отримаємо покриття меншої товщини.



Рисунок 4.37 – Залежність *t* для ПЕО сплаву Zr-2,5%Nb: *1* – 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. + 0,1 г/л CrO₃ + 10 г/л гліцерину + 10 г/л H₂O₂; 2 – 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. + 0,1 г/л CrO₃ + 10 г/л гліцерину; *3* – 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. + 0,1 г/л CrO₃

Так, покриття, синтезоване за однакового співвідношення струмів, проте в електролітах різної концентрації, зростає з різною швидкістю.

Залежність росту ОКП на цирконієвому сплаві від часу синтезу є специфічною. На початку процесу синтезу в електроліті складу 10г/л КОН+15г/л р.с+0,1г/лGrO₃ (рис.4.38) він росте зі швидкістю 5 мкм/хв (для співвідношень струмів $I_a/I_c = 20/20$ та 10/15 А/дм²). Покриття в такому ж електроліті за менших

струмів $I_a/I_c = 10/10 \text{ A/дм}^2$ росте повільніше (3 мкм/хв). Однак, швидкість росту покриття зменшується за подальшого синтезу приблизно в 2 рази (таблиця 4.1).



Рисунок 4.38 – Залежність росту покриву від часу в електроліті 10г/л КОН+15г/л р.с+0,1г/лGrO₃ за різних густин струмів (див. табл. 4.1).

В електроліті складу 10г/л КОН+15г/л р.с.+0,1г/л GrO₃+10г/л гліцерину (рис.4.39) досягти бажаної товщини покриття за той самий час можна значно швидше. Після 20 хв синтезу швидкість росту його уповільнюється у 2...3 рази.



Рисунок 4.39 – Залежність росту покриву від часу в електроліті 10г/л КОН+15г/л р.с.+0,1г/л GrO₃+10г/л гліцерину за різних густин струмів (див. табл.4.1)

Аналіз товщин одержаних покриттів показує, що на сплаві Zr-2,5%Nb максимальна швидкість формування іскрового покриття в електроліті складу 10г/л КОH+15г/л p.c+0,1г/л GrO₃ становить 5 мкм/хв, а в електроліті 10г/л
КОН+15г/л р.с.+0,1г/л GrO₃+10г/л гліцерину становить 9 мкм/хв. Такі значення в подальшому спадають та відповідають найбільшим густинам струмів. Отже, щоб синтезувати покриття найбільшої товщини, потрібно поєднувати співвідношення густин струмів зі складом електроліту.

					скл	ад елек	гроліту	/,				
	I ₂ /I _c ,	Γ/Π										
		КОН	СОН рідке скло		CrO ₃	КОН	рідке	скло СгО ₃		гліцерин		
№	а су А/дм ²	$\frac{10}{10}$		5	0,1	10	15		0,1	10		
		V_{g_I} ,		V_{ξ}	$V_{g_{II}}$,		Ι,		$V_{g_{II}}$,		
		МКМ	і/хв	МК	м/хв	мкм/хв			XB			
1	20/20	5,	0	3,0		9,0			i			
2	10/15	5,	0 2		,5	6,	0		3,0)		
3	10/10	3,	0	1	,2	4,	0		1,5	;		

Таблиця 4.1 – Швидкість росту покриття на цирконієвому сплаві

Збільшення густини струму ПЕО також прискорює ріст покриття, проте для цирконієвого сплаву його швидкість нерівномірна, зменшуючись у процесі оксидування.

Діаграма швидкості росту ОКП на цирконієвому сплаві залежно від концентрації електроліту та співвідношення густини струму за один і той же час наведена на рис. 4.40.



Рисунок 4.40 – Вплив параметрів обробки на товщину покриву, синтезованого на цирконієвому сплаві протягом 20 хв (див. табл.4.2)

	0				•	•
Гаолиня 4.2-	Склал ви	користов	vваних	електро) П1Т	ΊR
	enand pu	nopmerez.	Juli	• · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		

No	Склад електроліту, г/л										
JI⊡	КОН	рідке скло	CrO ₃	гліцерин	H_2O_2						
1	10	15	0,1								
2	10	15	0,1	10							
3	10	15	0,1	10	10						

Нижче подані режими синтезу спресованої втулки.

-

Зразок, №	Хімічний склад спресованої втулки	Електроліт	Співвідношення густини струму, А/дм ²	Час синтезу т, хв
1	ШХ15+ графіт+ мідь	3 грами/літр КОН+2 грами/літр рідкого скла	20	80
2	ШХ15+ графіт	3 грами/літр КОН+2 грами/літр рідкого скла	20	150

Таблиця 4.3 – Режими синтезу втулок

Дослідження зразка № 1.

У мікроструктурі втулки, спресованої зі стального порошку видно мідні включення, включення графіту та фериту (рис.4.41, а).

Після здійснення електродугового напилення, яке проводилось за режимів, описаних у розділі II, зазначено, що межа напилення покриття є досить рівною і чітко видимою (рис. 4.41, б). Це пояснюється рівномірністю напилення електрометалізаційного покриття (рис. 4.42).



a)



б)

Рисунок 4.42 – Мікроструктура зразка: а) до електрометалізаційного напилення; б) мікроструктура зразка після електрометалізаційного напилення, ×100



a)



Рисунок 4.42 – Мікроструктура зразка після електрометалізаційного напилення: а) ×250; б) ×400

При збільшенні розмірів фотографій видно рівну границю напиленого шару. Межа напилення огинає зерна основного металу. Графітові зерна розміщені нерівномірно по об'єму металу.

Структура основного металу зразка не змінилась, а структура напиленого електрометалізаційного шару стала темнішою та більш однорідною (рис.4.43).



a)

Рисунок 4.43 – Мікроструктура зразка після травлення: а)×100; б) ×250; в) $\times 400$

Дослідження зразка № 2.

У структурі спресованої втулки спостерігаються незначні графітові включення (рис. 4.44, а). Структура більш однорідна. Після здійснення електродугового напилення, яке проводилось за режимів, описаних у попередньому дослідженні, видно, що межа напилення покриття є досить рівною і чітко видимою (рис.4.44, б).



a)



Рисунок 4.44 – Мікроструктура зразка: а) до електрометалізаційного напилення; б) мікроструктура зразка після електрометалізаційного напилення, ×100

Межа, яка розділяє напилене електрометалізаційне покриття, не широка, що свідчить про досить високу адгезію такого покриття (рис. 4.45).





а) б) Рисунок 4.45 – Мікроструктура зразка після електрометалізаційного напилення: a) ×250; б) ×400 Протравивши зразок 0,5...3% спиртовим розчином плавикової кислоти HF, спостерігаємо чітку границю між покриттям і основним металом зразка (рис.4.46). Видно також, що напилений шар біля самої границі є дещо темніший.



Рисунок 4.46 – Мікроструктура зразка після травлення: а)×100; б) ×250; в) ×400

При збільшенні концентрації спиртового розчину чітко видн мікроструктуру напиленого електродугового покриття. У ній є зерна основного металу покриття Al та включеннями, які розміщені вздовж границі між основним металом зразка.

4.3.2. Дослідження мікроструктури плазмоелектролітно-оксидованого електродугового покриття. Мікроструктура плазмоелектролітно оксидованих покриттів має вигляд однорідної, характерна деякою пористістю (рис.4.47, 4.48). Після травлення спостерігаємо більш чітку межу розподілу напиленого електрометалізаційного покриття і покриття, яке виникає в результаті плазмоелектролітного оксидування.



Рисунок 4.47 – Мікроструктура оксидокерамічного покриття на напиленому електрометалізаційному шарі: а) ×250; б) ×400



Рисунок 4.48 – Мікроструктура оксидокерамічного покриття на напиленому електрометалізаційному шарі після травлення: а) ×100; б) ×250; в) ×400

Після травлення бачимо чітку межу розподілу електрометалізаційного та оксидокерамічного покриття. Правий край електродугового покриття дещо світліший від лівого. Це зумовлено реакціями окислення, які проходять під час синтезу. Також значне підвищення температури спричиняє зміну структури напиленого покриття. Зерна на оксидокерамічному покритті не виділяються.

Мікроструктура оксидокерамічного покриття однорідна. Границя між електродуговим та плазмоелектролітним покриттям чітка і рівна (рис.4.50).

Поверхня покриття виглядає об'ємною та рельєфною. Це є наслідком активних окисних процесів, які відбуваються під час синтезу, залежать від сили струму, складу електроліту та часу синтезу.



Рисунок 4.50 – Мікроструктура плазмоелектролітно оксидованого електродугового покриття а) ×100; б) ×250; в) ×400

Після травлення ми спостерігаємо, що границя між покриттями стала чіткіше виражена. Біля неї покриття є світлішим, а край покриття значно темніший. Це пояснюється тим, що спочатку синтез відбувається дуже повільно, а після електричного пробою пришвидшується.



Рисунок 4.51 – Мікроструктура оксидокерамічного покриття на напиленому електрометалізаційному шарі після травлення: а) ×100; б) ×250; в) ×400

4.3.3. Фазовий склад оксидокерамічних покривів. Хімічний, фазовий склади та механічні властивості оксидних покривів близькі до оксидної кераміки. Їм властива висока абразивна зносотривкість, корозійна тривкість та жароміцність. Крім того, покрив, отриманий плазмовим електролітичним оксидуванням, має високу адгезійну міцність до поверхні підкладки, завдяки чому є можливість протистояти високим термоциклічним навантаженням.

Наявність в електролітах фосфатів, ванадатів, сульфатів і т.п. може приводити до формування в покривах складних оксидних фаз, комплексних сполук, втілених аніонних або катіонних груп, колоїдних частинок [175-299]. У кислих електролітах отримуються покриви на основі η-Al₂O₃ з розміром зерен ~100 нм [300].

Склад електролітів разом з матеріалом підкладки, режимом та часом обробки є визначним фактором процесу мікродугового оксидування, який суттєво впливає на склад, структуру та властивості покривів, що отримуються. Для реалізації плазмохімічних реакцій в розрядних каналах використовуються як кислотні [301, 252] так і лужні [303, 304] електроліти, причому другим надається перевага, так як у них можна отримати покрив більшої товщини та твердості і вони є більш екологічно привабливі. Концентрація лугу в таких електролітах досягає 0,4%; силікату натрію, силікату калію або їх суміші до 1%. Практично не досліджені електроліти з концентрацією лугу до 0,1%, і більше 1% з добавкою рідкого скла 0,5...1,5 %.

Покриви, сформовані в електролітній плазмі з будь-якого електроліту протягом перших кількох хвилин синтезу рентгеноаморфні [305].

Плазмові технології отримання захисних покривів мають активно застосовуються. Серед них особливо перспективним є синтез їх на вентильних металах в плазмі іскрових розрядів в системі метал-електроліт. При цьому покрив має полікристалічну структуру, близьку до кераміки. Особливістю оксидної плівки на вентильних металах є її уніполярна провідність в контакті з електролітом. Важливі у формуванні пористого оксидного шару електроліти та режими, у яких формуються ці покриви. Структура та склад плазмоелектролітних покривів визначаються умовами їх формування. Властивості таких покривів визначаються їх складом та структурою, які залежать від матеріалу основи, складу електроліту та режиму обробки.

Оксидокерамічний покрив, синтезований на цирконієвому сплаві Zr - 2,5%Nb, містить найбільше моноклінної фази ZrO₂ (96...98%) з параметрами гратки: a=5,1459,b=5,2115, $c=5,3128,\beta=99^{0}22'$. Рентгеноструктурним аналізом виявлено також проміжні фази, такі як ZrO ($\approx 0,5\%$) та Zr₂O (1,5...3,3%).

Вважається, що діоксид цирконію є *n*-напівпровідником і що його структурі властиві кисневі вакансії [306]. При високій температурі (900...1000 ⁰C) ZrO₂ - напівпровідник *p*-типу та його структура характеризується наявністю кисневих іонів заміщення.

Нами було досліджено фазовий склад ОКП, отриманих в різних електролітах за різних режимів обробки для деталі типу «втулка» (рис.4.1). Виявлено, що їх структура майже однакова. Так, покрив синтезований в електроліті складу 3r/л КОН + 2r/л рідкого скла при співвідношеннях струмів $I_{\kappa}/I_a=1$ та часі обробки $\tau=20$ хв, складається з 98,4% моноклінної фази ZrO₂. 1,4% ZrO та 0,2% Zr₂O (рис.4.52 *a*).





Рисунок 4.52 – Рентгеноструктурний аналіз оксидокерамічних покривів, синтезованих на цирконієвому сплаві зарізних режимів обробки: а $3\Gamma/\pi$ КОН+ $2\Gamma/\pi$ р.с., $I_{\kappa}/I_{a} = 1$, $\tau = 20$ хв; $6 - 10\Gamma/\pi$ КОН+ $15\Gamma/\pi$ р.с., $+0,1\Gamma/\pi$ GrO₃+ $10\Gamma/\pi$ H₂O₂, $I_{\kappa}/I_{a} = 1,5$, $\tau = 40$ хв.

В більш складному електроліті 10r/лKOH + 15r/л рідкого скла + 0,1г/л GrO₃ + $10r/лH_2O_2$, коли $I_{\kappa}/I_a=1,5$ ат=40 хв утворється покрив, який містить 96,1% моноклінного оксиду цирконію, 3,3% гомогенної фази ZrO та 0,7% не стехіометричного оксидуZr₂O (рис.4.52 б).

Слід зауважити, що з'єднання ZrO є нестабільним при температурах вище 1200°С і вміст цієї фази при звичайному окисленні складає 15,0–25,0%. При плазмохімічному ж окисленні цирконію оксид складу ZrO міститься в невеликій кількості (1...3%). Найбільш стійким є стехіометричний

4.4. Дослідження плазмоелектролітно-оксидованого електродугового покриття ППМ

Системні дослідження впливу електролітів на можливість реалізації анодноіскрового процесу проаналізовані в роботах [238]. Для оксидування ППМ використовуються розчини солей (NaCl, NaClO₃, NaI, NaNO₃), розчини кислот (HCl, фосфорної, лимонної, винної та адипінової). Найбільш поширені і прості електроліти на основі розчину КОН. В попередніх роботах показано, що придатність електроліту для формування ОКП визначають експериментальним шляхом [312]. Для досліджень вибрали електроліти на основі розчину КОН та рідкого скла.

На рисунку 4.53 представлено пористий проникний матеріал з порошку сталі ШХ15 після нанесення електрометалізаційного покриття (а) та ПЕО (б).



Рисунок 4.53 – ППМ з порошку сталі ШХ15 після нанесення електрометалізаційного (а) та ПЕО покриття (б)

Синтез ОКП на цирконієвому сплаві в електроліті 10 г/л КОН та 15 г/л рідкого скла та співвідношення $I_a/I_c = 20/20$ (рис.4.54) забезпечує формування покриву вже рожевого кольору досить високої мікротвердості (16 ГПа).

Таке підвищення концентрації лугу та рідкого скла в електроліті (I_a/I_c становило 20/20 A/дм²) призвело до деякого пониження мікротвердості оксидокерамічного покриву на титановому сплаві, що становить 9 ГПа. Такий покрив є шорштким, а ще більш гладкими можна зробити в електроліті 15 г/л КОН та 5 г/л рідкого скла та за іншого співвідношення струмів 10/15 A/дм² (табл.4.4).



Рисунок 4.54 – Оксидокерамічний покрив, синтезований в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л рідкого скла на ППМ

N⁰		склад електроліту г/л	, ,	I_a/I_c , A/IM^2	τ, x b	Η _μ , ГПа	t,
	КОН	Рідке скло	GrO ₃	лдм	ЛЬ	1 1 1 a	IVI KIVI
		Ц	ирконієви	ий 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

Таблиця 4.4 - Режими обробки покривів на цирконієвому сплаві

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.4.55 зображені фрактографії синтезованого цирконієвого сплаву на поверхні ППМ.



Рисунок 4.55 – Фрактографія синтезованого цирконієвого сплаву ППМ

Завдяки створенню на поверхні цирконієвих сплавів оксидного шару (рис.4.56) можна суттєво підвищити їх експлуатаційні характеристики. Наприклад, створення ОКП шляхом оксидування, в процесі якого між деталлю та електролітом виникають електричні дуги малої протяжності, забезпечує зростання мікротвердості і, як наслідок, підвищується його зносотривкість та корозійна стійкість.



Рисунок 4.56 – Оксидокерамічний покрив на цирконієвому сплаві: злам сплаву з покривом (а) (×100); оксидокерамічний покрив (б) (×1000);

Мікроструктура плазмоелектролітно-оксидованих покриттів ППМ має вигляд однорідної пористості (рис.4.57). Після травлення спостерігаємо більш чітку межу розподілу напиленого електрометалізаційного покриття і покриття, яке виникає в результаті плазмоелектролітного оксидування.



Рисунок 4.57 – Шліф цирконієвого сплаву на ППМ з покривом (×500)

4.5. Хромоалітування фільтрувальних ППМ

У [107] розглянуто метод, який полягає в наступному – при комплексному термодифузійному насиченні збільшується дифузійна рухливість атомів хрому і, як наслідок, можливість присадки хрому на поверхні ППМ. Це обумовлено утворенням твердих розчинів та інтерметалідних сполук Cr, Al, Fe, які зміцнюють та добре захищають поверхню матеріалу від окислення.

Для випадку хромоалітування фільтрувальних ППМ з порошку ШХ15 брали порошок хрому дисперсністю не більше 20 мкм.

Рекомендований базовий склад суміші для хромоалітування має такий склад: хром – 30-60%; алюміній – 2,5-10%; окисел алюмінію – 40-60%; активатор – 0,8-5%.

На основі базового складу проведені дослідження термодифузійного покриття фільтрувальних елементів з порошку ШХ15 для очистки малоагресивних середовищ. Процес проводили у закритому контейнері в атмосфері водню при температурі 950⁰С протягом 4 год.

Мікроструктуру зрізу покриття вивчали за допомогою сканувального електронного мікроскопу CAMSCAN з аналізатором EDX. Під час дослідження з'ясувалося, що при вмісті алюмінію 5% отримується покриття товщиною 0,2 мм з концентрацією приблизно 10-12%Al та 14-15%Cr. Структура мікродифузійного покриття фільтрувального матеріалу показана на рис.4.58.



Рисунок 4.58 – Мікроструктура покриття фільтруючого матеріалу:

- 1 зона покриття;
- 2 перехідний шар;
- 3 основний матеріал фільтруючого ППМ

Характеристики фільтруючих ППМ – пористість, коефіцієнт проникливості, величину пор спечених зразків із порошку ШХ15 визначали за ГОСТ 18898-89, ГОСТ 25283-93, ГОСТ 26849-86 відповідно. Результати досліджень наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Гідродинамічні властивості зразків ППМ із спечених порошків ШХ15 зі захисним покриттям системою Cr-Al [61]

		П	Параметри фільтруючих ППМ						
N₂	Товщина	H	Коефіцієнт	Розміри пор	р, мкм				
зразка	оифузіиного шару, %	Пористість, %	проникливості, 10 ⁻¹³ м ²	максимальні	середні				
1	0,29	39	8,4	20,0	15,2				
2	0,30	40	30,8	20,7	15,8				
3	0,31	41	31,6	22,0	16,0				
4	0,28	40	31,7	21,8	16,0				
5	0,26	42	32,0	22,4	16,2				

Проведені результати досліджень дозволили показати високоефективний спосіб підвищення міцності та корозійної стійкості фільтруючих ППМ.

Порівняльні дані по зносостійкості показали, що застосування двохшарових та трьохшарових фільтруючих матеріалів на основі порошку ШХ15 та пороутворювача для очищення малоагресивних середовищ дало змогу за рахунок їх покращених властивостей (висока хімічна стійкість, необхідна механічна міцність, рівномірний розподіл пор по всій поверхні фільтрації, підвищена проникливість та брудоємність, за рахунок забезпечення об'ємного фільтрування, можливість регенерації) збільшення тривалості експлуатації фільтруючого матеріалу в 1,5–2,0 рази.

4.6. Висновки до розділу 4

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

2. Моделювання процесу пресування при ущільненні ППМ на основі порошку сталі ШХ15 показало, що характер розподілення густини по контуру пресовки не змінюється. Це вказує на визначальну роль характеристик матеріалу деформувального інструменту в процесі пресування, що забезпечує одну з основних вимог до пористих проникних матеріалів – рівномірність розподілу густини по об'єму.

3. Показано, що після СВС-процесу ППМ мають покращенні властивості, а саме: вловлюють механічні домішки дисперсністю 15-500 мкм; ефективність очищення повітряно0газових сумішей н еменше 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 1 л/год до 200 л/год; неперервність роботи (до регенерації) при визначеній продуктивності не менше 30 год, а термін служби не менше 1 року; профілактика відбувається методом регенерації.

4. Для нанесення корозійностійкого захисного електрометалізаційного покриття на деталях конструкційного призначення запропонували метод вакуумно-дугового напилення та плазмоелектролітного оксидування. Встановлено, що властивості отриманих покриттів визначаються складом електроліту і режимами процесу ПЕО.

5. Розроблена нова технологія нанесення корозійностійкого захисного покриття на ППМ. Синтез ОКП на цирконієвому сплаві в електроліті 10 г/л КОН

та 15 г/л рідкого скла та співвідношення I_a/I_c = 20/20 забезпечує формування покриву ППМ досить високої мікротвердості (16 ГПа).

6. На основі експериментальних досліджень запропоновано високоефективний спосіб підвищення міцності та корозійної стійкості фільтруючих ППМ – хромоалітування. Застосування даного способу показало збільшення тривалості експлуатації фільтруючого ППМ в 1,5–2,0 рази.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ППМ З ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

5.1. Дослідження структурних характеристик ППМ

5.1.1. Обробка 3D зображень ППМ при металографічному аналізі. Один із найбільш інтуїтивних і найбільш потужних методів для візуалізації даних 3Dзображення у Avizo[®] є прямо об'ємний рендерінг, параметри випромінювання та поглинання світла віднесені до кожної точки обсягу. Моделювання пропускання світла через певний обсяг зображення дозволяє відображати будь-які дані без побудови проміжних полігональних моделей [214, 215]. Avizo[®] здатний виконувати прямий рендерінг у режимі реального часу, навіть для дуже великого обсягу даних. Таким чином, обсяг надання інформації може миттєво виділити відповідні області певних даних [213].

Металографічні зображення можуть бути представлені комбінацією різноманітних структурних складових при різному співвідношенні: фазами, якими властиві різноманітні розміри, форми та кольори, а також межі зерен, що можуть бути представлені або окремими лініями на зображенні, або покривати зображення безперервною сіткою. Тому основну вимогу до якісного аналізу зображень можна сформулювати і поставити так: на отриманій під мікроскопом фотографії необхідно виділити структурні складові, а після цього класифікувати їх за яскравістю, розміром та формою. Практична реалізація цього включає в себе такі задачі, які вже стали класичними, як сегментація, фільтрування вад та виділення об'єктів з фону, визначення меж об'єктів, розпізнавання образів [35, 163, 211, 213, 314].

Утворення 3D зображення за допомогою програмного середовища Avizo[®] здійснюється накладанням плоских поперечних розрізів відповідного діапазону по висоті готового пористого порошкового матеріалу (рис.5.1).



Рисунок 5.1 – Візуалізація отриманого зображення поперечного перерізу пористого порошкового матеріалу: а) 3D-зображення з використанням Avizo[®]; б) рентгенограма

Суть роботи Avizo[®] ґрунтується на системному розумінні морфології та мікроструктури дослідного зразка. Ці знання мають першочергове значення при оцінці якості готового продукту. Для повної та якісної оцінки зразка необхідно визначити та дослідити основні морфологічні параметри структури, а саме:

- визначення кількості частинок різного розміру та форми;
- визначення структурних дефектів зразка;
- визначення форми пор та форми частинок;
- визначення загального розподілу пор у розрізі та за всім об'ємом;
- визначення загального розподілу певних форм частик за периметром і об'ємом.

На рис.5.2, показані структури ППМ з відходів промислового виробництва, отримані методом сухого радіально-ізостатичного пресування.







Рисунок 5.2 – Мікроструктури ППМ з відходів промислового виробництва

За допомогою програмного забезпечення Avizo[®] ми отримали точні розміри певної ділянки зрізу (рис.5.3). У середовищі Avizo[®] можливо вимірювати лінійні, кутові та полярні розміри. Також можливо проводити розрахунок об'єму, площі, периметру об'єкту.

За допомогою програми Avizo[®] можна визначити найбільш слабкі місця ППМ, які можуть призвести до руйнування конструкції. На рис.5.4 червоним кольором показано найбільш уразливі місця виготовленого ППМ з відходів промислового виробництва.



Рисунок 5.3 – Визначення лінійних розмірів та встановлення відповідних зв'язків між даними частини зрізу шліфу ППМ за допомогою Avizo[®]



Рисунок 5.4 – Визначення зносостійкості та «проблемних» місць у структурі ППМ

Металографічні зображення шліфів ППМ представлені 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 покрив зображення безперервною сіткою. Комбінація цих структурних складових (площинні та просторові) для ППМ з відходів промислового виробництва представлені на рис.5.5.

Кінцевим завданням металографічного аналізу за допомогою прикладних програм слід вважати статистичну обробку отриманих у процесі вимірювання характеристик об'єктів, визначення середніх значень цих величин, а також побудова графічних залежностей для візуалізації процесу аналізу.







б)

Рисунок 5.5 – Визначення та аналіз структурних складових (пористість, максимальний та мінімальний діаметр пор, максимальні та мінімальні розміри частинок) ППМ у форматі 3D-зображення: а) ППП з розміром частинок вихідного порошку – 0,1 мм; б) ППП з розміром частинок вихідного порошку – 0,063 мм

На рис.5.6 – 5.9 наведено основні структурні характеристики пористого проникного матеріалу з відходів промислового виробництва з відповідною пористістю.

1.1		ASIS	al state	ni wiwin w	(e) at all	Co-Initialial	141.00						
4		44	NB objects 192	a (1110) 1	The manual	AND DEL DRUGEL	waters						
1			e			1		• 1	1	- 4		1.4	-
-			Sector Sector	denate certal	Reveale a	No Conter Mil	Revolution 2	-	Sandara Sandara	International Contract	Phantake Salar	-	
			1000	10005 (%)	Internet in	12 19 19	11-	14/0825			_		1.
4		2	30007	24,446 82	2018406	10,044,000	10	Visitio					
8	_	1			30 2401	20.040		A 201204-4					
#.			0.000	N.0.700	447,5975	10.00		1000004					
1			1000	1000010		141221		1 COLORN					
-	-		200	1000.000	and the second second	POLICEPT .		1001141					-
	-			- Andrews	in the second			- Income					-
8	- 6	-	Alashing and a second		Ange Mr.	200100					·······		-
-		-	1.1	Contrast Contrast		a service		and the second se					
8	-	14	1000	1 1000 100	1.0101	20 million and	-	COLUMN 1	10				-
41	-	12	1014	1110 200	STATISTICS.	1110010		Australia					
8	-	11				011100		of Male					
6		11	Briary.	10000100	MUR	10.0		107128					
7	_	15	1000	1000 110	THE OWNER.	0140004		111110	100				-
*	-	14	MAR.	1000.786	FRE BARE	27-002-04	N	8.04000	101				
1	_	12	2100	2000 077	#11.22M	10.07104		100000					
2		44	-14170	3004 31	104 (417)	N rishd	8	170457	100		10.000		
10		11	1000	1000.007	100 2404	20122011	4	101000	101				
		26	-012106	201033-000	490,0001	de Tribel		6 300000			100000000000000000000000000000000000000		
3 .		-15	THE R.	10075-0	897.0078	48-47973	1	1,708.000	4.6				
14		44	12039	1000.404	104.01	40.0073	100	2104011	1.446				
8		18	NAME.	1000 000	101100	21 March 1		1.90052	1000				
8			0000	12703-00	201,009	FROM STATE		130730					100
1		18 L	2014	279.540	407,0104	A COMPANY	10	1390005					1
1			6001	4718.070	BR. LTT.	ALC: NO.		2.111.000	100				
8		4	2000	104.03	111.000	11,4040							
<u>.</u>	_			MOC 388	Contract of the second s	-		10000					
ų	_	2.1		2000.001	THE REP.	10.000		1.00000	-				
	-					1000							
- 10	_				-			14000					
	-							10000					
8-	-		Access	Address the	and sold	10000		1 Total Color	100				
-					and second as	the second s		Testers	1000				
			1000	1000	and the second	to itse		1.000.000					
			100		10.480			COLUMN A		-			
			Marrie &	101101-00	al parts	124,2840	-	1404010					-
		36	104.0	100204-001	The root of	100 Dillored		Courses.	811				
		41	ators	Annual and	1000 0.550	CONTRACTOR OF		1.070.02.1	441		100 C		
17			2000	1987 1987	STA SHOP	TTL DOWN		1540040	-	10	101 - C		
10		44	10011	11110-000	34.476.00	1001000	100	2 8/6/68	0	116	1.		
		44	4040	10000	1001225	110,000.0		111111	-	115			40
20 C		44	10Mag	artist top.	000.0734	Sale Mag	1	1.0007716	101	340	i i i i i i i i i i i i i i i i i i i		44
6		40	Man	71828.48	1014.408	104.000.00	1	1.00.0012	401	130	1.00		88 A.
100	-	-		And in France of France	the second s	and comments.		a constant	and the second se	144			-

Рисунок 5.6 – Основні структурні характеристики пористого проникного матеріалу (П=0,1)

	. Inc. For	-		1111		2			_			
31		지지 아닌	af all mills		Fizientialla	a la						
4	51.414	We alcours : 307										
		e		1			*				. 8.	1
		1000	(19/2)	And Services	Ban Cartor 1	Electronic .	100	- Owner	grout.	gang)		
-	1.1		ATOM OF	TRACING.	10.70045		A REPORT	1.000		1		
		344	1045-012	100.0014	2.090.001	100	1 314001	140				
1		ALL DO	12.003-00	100.77.84	AL DEPT.		1.050401		1.14			
		2004	-	201109	8.987000		PERMIT					· · · · · ·
-	1.1	200		100.000								_
-	-	400.5	1000	1000	1900	line in the second second	and the state	76				
	1	and a	TAN TON	No.	a manual	-	A HIGH PARTY					-
	-	1770	other set	And in case	EL TERM		C. SEC. ST.					
-		111	Property lies		a wanted.			100				
	1.1	700	3888.72	178 2274	3 342334		Common State	455				
		110	100.000	11111	L extent		1000000	114				
	- 11	86715	THOMAS		THE AREST.		C.MARCE	-		1	1	
	. 18	10,222.0	11000-01	402,5184	10 KING 1	10.00	10.0002000	- 477		1	2	
	11	1111	1000.000	100 6 60 4	CT MEMORY	20	10742344	1.000				
	- 18		-	- 1001100	1.21011		1110-000					
	11		ANT ALL	1 20100	10.000		C TRANS					
	1.2	10.01			17.34000		A DECEMPTOR OF					
-	- 2	100.000	and the second				C STORES					-
-			and the second	1000								
			1414 111	100 1001			10.00000					
-		201	1000				and a second					
			1400.778	200 (1941)	** 3,000		2.047.00	114				
	- 26	1000	450.015	ANI PLAN	10.000		LABORT	140				
		111/0	11207-001	271.0020	-		2.8769	100				
	1	-9140	1020-428	100.0	71 2002		10.00					
	1.10	22166	110 300	10.00	BURNIT .		2102001					
			10111		41.04000		1000	440.				
	1.0	400.000	10000	10.000			11000				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
	- 2-		1.00	and the second	144,000		Contraction of the local division of the loc					_
			1000 10	100	and the second		and the same	100				_
	- 2		and the second se	and the second	1000							
			12000 88				1000	100	-			
	-	1.000	10000	100.100			Littleto	101.0		-		
			104.00	500 /648	10.100104	285	1213676	-	1.1			
		2010	1000.728	100.000	11.07100		11000	-				
	- 39	4140	1100042	Sectors.	×.0			100	14			
	- 60	1947	Peace As	100.001	10.000		Lord	-				
	1.11	2000	3403 100	the day	71,98000	28	Los de	-	17			
	44	ATTR	COMMETTE:	122 1886	1010475		1 MARCEL				L	
			1000		TTI MA	- AL	1.00000					
		10000	1000	And a state of the	100.000		Contract of the local division of the local				<u> </u>	-
4	10.00	1.00			ALC: NOTE: N		A DESCRIPTION OF					

Рисунок 5.7 – Основні структурні характеристики пористого проникного матеріалу (П=0,2)

1.00	Locies in	and additional and Party											
	4.4	- C	T			4			+ 1				-1-
				1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.		and the second	0.0	and the second	17 11 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1		11		
		APRIL 1	(erg)	Bestadore (N)	On scotter -	Berjönder2	-	2000	(acae)	gent.	-		
	1.1	81000	1000000	Nimpor	91,04285		8 0449000			1		-	
	1	2014	60065-08	100.9550	\$710850	1	3 0 2428	.00					
		80005	12421123	44.01	- 11 871		20044214				U		
-		10104	1200.47	200,4950	28,4000		1.242008	- 22			10		_
	1.1	2150	100000	411 8000	13.95952		1.0000					_	-
-		10000		000.0000	an address							-	-
-	1.1	Card Inc.	11001-01	Par 4800	the little		14.00.000	100		1.4			+
-	1.1	Contract of the local division of the local	17581.15	ETA SATE	IN YOUR		a research	- 10				-	-
-	1.16	190302	10012100	THE OWNER	to April		a constant	-	1	1			-
	11:	2183	1000 1414	441 1000	2273941		L.main	100	111	1.1			
	12	10000	10013-00	875.8010	10.1100		118000	6404	12	1	17		
	18	204146	22283.44	841,9985	47.73781		112000	444	- 20	10			
	14	203663	22284 // 1	1 Million	46.44005		1000703	388	11	10	-11		
	14	176626	1000LU:AI	111070	10 ST		8 1121008	525	- 28				
	1.00	m0009	24480-04	26.7 (447)	94.00761		8.8067198			5			
	10	80028	700.25	638.1241	40.0004		8 71 88007	101	10			_	
	1.1	96500	10146.58	800.8470	52,50871		1 8008	800					
_	1.2		0001240	800 9904	10 1000	1.00	1404127	411				_	-
-	1.5.1	1101	000.000	201 200			A TRUE OF	-				-	-
-	- 1 -		200									-	-
-	1.2	-			10.000			10				-	-
	1.2		And in	The second		_	1 Codella						-
-	1.2		CONTRACTO IN CONTRACTOR	Ser Links			110.00					-	-
-	1.2	101110	10040.10	-	ar seats		A DOMESTIC						-
	1	-	Total di S	NYL BLUD	101000		1.48.000				1		-
		1000	1211.0.0	W11771P	10.000		8,214110	-	10	17	-		
		2783	1888.212	100 011.0	11.70000		1011030	100	.21	1			
	- 38	31200	STTR.DAS.	LEVEL AND	MACRES		1262110	NOT R	.33	100	12		
	- 11	211	606.74897	Mile .	100 C		31.1	- 100		1.1			
	- 38	2001	1110.744	100.0012	10.1011		PT 13100	-	- 100		100		
	1.78		474.8514	240.475	10.10		24.5	10	- M.			_	
	- 34	12130	Oversite	391,806	1410536		1000100	191				_	
		80078	8346.395	877 8/96	PRACEC		2006108					_	
-		100	0000	1011	CO.		1 1000	000					_
	1.2	10000	00000	100.000	1411		1171300					_	_
	1.2			100	1 2 2 2 2 2					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		-	-
		No. Col	1000400	No. OT N.	A REAL PROPERTY.		a solution	000	100			-	-
			10000	in and it.	CTI Call	-	19.5		100				-
-		1000	111 00 21	ALC: NO.	I See Tracht		A Low Fills	1.0	14				-
-	1.0	1000	100 100	Lab Dara	in provide		417.238		1.0				-
	44	100	Aur area	TRUBLES-	Los and		38.4		1.01				-
-	- 41	10110	danies in	at drawn.	199.0000		1.043100		1.00				
	1.00	a second	tenters rel	The second is	Fait correct								-

Рисунок 5.8 – Основні структурні характеристики пористого проникного матеріалу (П=0,3)

1.00		이 네 ㅋㅋㅋ		tel plana	I SCHOOL SEL							
4	1	M5 objects 211		. 1		4. [T M
-		-184,814000 100700	A1850 (M25)	BergCartant .	Servicement	Service 2	Mart	Popula (and)	Residences -	Testine:	nder.	
	T.		KORK OF	41 (1938)	18.2079			41	1	1		- · · ·
		1000	and the second		11 1000				- 1			-
	1	20100	Name of Concession, Name o	ALC: NOT THE OWNER.	TAX BOARD		10,007,001					-
		8018	2368 362	201.3476	4.180491		0.102642			1		-
	1.0	7244	2128.000	\$42,0417	8.200000		15 15276	100		1		
	1000	2001	2001.075	800 6274			22 40408	-) – J		
	0	3005	1415.000	575 1104	3.0	2	18-24104	- 890-				
	0.	100	\$25,7013	126.628	0.0	8	18.4	400	+	1 A A A A A A A A A A A A A A A A A A A		
	10.	201	2347.153	\$45,0004	1.340983	2		100	1	1	1	
	11		7108.046	NOC #100	1.017.0		10.0000	- 104	1	- 1		_
	14	204.0	BUTO DATA	711.0.08	11.00		11.001					_
			1000				A CONTRACT OF					_
				-	-	10						-
			ALC: NOT				201 BB 11					-
	11	10400	1001.416	444 17 19	27 00007		12 22 22 22			-		
	16	SOTT .	12012-0	426.6376	44 87523		8.74081	476				-
	10		100.144	800.8			210					
	20	LETE	6008 Total	406.0073	40 31380		0.40301	41		1		
	11-11	50760	041.011	242.018	424208	- 21	10,70242	210	- 21	1		
	- 38	10.00	2013016	20.5	2425		201245	1.5		5 1	1	
	- 31	100010	21187.00	80.07202	10.2014		11 Jawrs				1	
	- 18.	48115	7778.808	241.0.00	\$18036		1014	-741.				
	- 20		110.10	ALBITTE	ex et al.		A 1001 M			1		_
_		1000	7004.012	212,3414	ME 18004		1.41044	- 27		£		<u> </u>
	1.2.4	1000	and the second s		-	-				7		_
	- 2	- Contraction		-	00.00010							_
	0.0	10100		100.000	ALC: NO.			100				-
		2010	200 110	-	01000		110			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
	12	100112	1200 414	275 4164	TI PHONE		11 800.00					-
	1.0	207	446 1100	128	81271428		20.14(20)			1	1	
	- 36	00010	10012	448.1211	MI CTURE		the first state of the	100.0			(
	- 38	88,200	8908.008	802.0108	01944123	21	W-METHER!		24	1	0	
		2012	2100.007	38.4	10.71108		T DIMPL			1	-	
	10.1	1818	1917 22	2017120	10.01104		28.10529	1993	41	1		
		24194	ALEY ADD	8.10 ^{-10.00}	NA REPORT		W NEDRAL				1	
	- 2	11,000	Same	542,8587	00.04548		N BADDARY					
-	40		The second	1008.011	00.04548		1.90					
_	44	1.00	And and	100.000	100.000		10 00004	-		1	a	
-	10		20.4	100.00	100.00		a second	51				
	1	1	A STATE		-		-					
	- 41	1011	AND TWO	200.010	100 000		At an a state of the state of t	-				
	-							Lightshot	and shread owner	Contractor and Contractor	A15	
								CERTIFICATION CONTRACT	10 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 0	A MARK THE TAXABLE	an.or	

Рисунок 5.9 – Основні структурні характеристики пористого проникного матеріалу (П=0,4)

Інтегральні характеристики поророзподілення по січенню фільтрувального матеріалу представлено на рис.5.10 та 5.11.



Рисунок 5.10 – Розподіл зміни пористості по січенню ППМ (розмір частинок вихідного порошку – 0,063 мм)



Рисунок 5.11 – Розподіл зміни пористості по січенню ППМ (розмір частинок вихідного порошку – 0,1 мм)



Лінійна гістограма пористості по січенню ППМ представлена на рис.5.12.

Рисунок 5.12 – Побудова та відображення лінійної гістограми пористості по січенню ППМ: а) ППП з розміром частинок вихідного порошку – 0,1 мм б) ППП з розміром частинок вихідного порошку – 0,063 мм

Завдяки запропонованому методу можна сегментувати зображення без вибору порога. При цьому формується база сегментів, що дозволяє зберігати їх атрибути для подальшого аналізу (рис.5.13).



Рисунок 5.13 – Сегментація металографічного зображення зрізу ППМ

5.1.2. ЗД-реконструкція та морфологічний у аналіз ППМ. Морфологія ППМ визначає їх фільтрувальні характеристики і, отже, їх ефективність у багатьох сферах застосування. Пристосування властивостей структури ППМ до передбачуваного застосування є серйозною проблемою для вченихматеріалознавців, доки відсутні методи точної морфологічної обробки [249].

Кількісні та якісні зв'язки між морфологією пористого матеріалу, його локальними та глобальними фільтрувальними властивостями є важливими в багатьох галузях застосування [163, 211, 254].

Застосування властивостей стаціонарних ППМ до їх потрібного використання є серйозною проблемою для вчених-матеріалознавців, доки відсутні методи їх точних та кількісних морфологічних характеристик. Встановлення кількісних морфологічно-фільтрувальних властивостей може спиратися на безпосереднє моделювання пористої структури перенесенням потоку речовини в 3D-реконструкції матеріалу [4, 6]. Тим не менш, моделювання може бути настільки точним, як це може дозволити модель. 3D-реконструкція для ППМ з макро- та мікроскопічними морфологічними ознаками зазвичай включає електронну мікроскопію [192]. У той час як сканувальна електронна мікроскопія (СЕМ) і просвічувальна електронна мікроскопія (ПЕМ) є надійним і точним а, отже, і добре підходять для зручної обробки 2D-зображень. Оскільки 2D-зображення можуть бути недостатніми для захоплення морфологічних особливостей матеріалу [185], а також через фундаментальні відмінності в фільтрувальних властивостях 2D і 3D моделей, методи 3D-візуалізації необхідні для забезпечення, відтворення та визначення морфологічних даних повної 3D моделі для реалістичного моделювання структурних характеристик ППМ.

З відомих сучасних методів [4-8, 11, 15], фокусний іонний пучок СЕМ став домінуючим методом для визначення структурних властивостей ППМ протягом останніх років, оскільки він значно доступний, надійний і універсальний до будьякого досліджуваного матеріалу [16, 20].

Налаштування і принцип роботи СЕМ представлено на рис.5.1.14 та 5.1.15 відповідно. Потужна, але проста робота SEM надає можливість обробляти великі обсяги матеріалу відносно швидко, з незначним обмеженням [2, 3].



Рисунок 5.14 – Налаштування сканувального електронного мікроскопа (схема)



Рисунок 5.15 – Принцип роботи СЕМ

Принцип роботи в СЕМ такий: зріз вирізають зі зразка ППМ, генеруючи чисту і гладку поверхню на блоці, який потім відображають на моніторі. Після візуалізації новий зріз видаляється з блоку зразків, даючи нову поверхню для зображення. Цей цикл повторюється до отримання потрібної кількості зображень. Типова товщина зрізу знаходиться в діапазоні 30-100 нм. Всього було отримано 1300 зрізів, кожний з яких представляв собою товщину 100 нм і складався 4000 × 4000 пікселів. Зображення спочатку були бінаризовані за допомогою автоматизованої послідовності, що складається з шумопоглинання зображення, фільтрації та порогування [212, 214]. Зображення потім складали разом, щоб дати представлення структури 3D моноліту ППП (рис.5.16).

Досліджуваний зразок ППМ складається з суцільної металічної структури (монолітний скелет; непрозорий) з пористістю ~69% (проміжний пустот, заштрихований).



Рисунок 5.16 – 3D-зображення реконструйованого об'єму циліндричного зразка ППМ

Пористість та її розподіл по всьому зразку є особливістю з певним впливом на фільтрувальні властивості потоку і маси ППМ [315, 316]. Пористість може бути визначена з числа чорних пікселів, які позначають порожнистий простір, розділений на загальну кількість пікселів у структурі ППМ. Перевага підходу реконструкції зображення полягає в його здатності виробляти просторову звивисту пористість. Це дозволяє досліджувати розподіли радіальної і осьової пористості, тобто перпендикулярні та паралельні осі циліндрично-обмеженого моноліту ППМ.

Важливо розрізняти глобальну середню пористість (0,687), що належить до всієї синтезованої структури ППМ, і доступний порожній (пустотний) простір, розрахований як пористість центральної монолітної області без непроникного шару стінки, яка вище (0,716). На відміну від систематичної зміни пористості за поперечним перерізом циліндра ППМ (розподіл пористості), його зміна по осі циліндра (розподіл осьової пористості) є випадковою і незначною, рідко перевищуючи 1%.

У карті 2D кольору для пористості (рис.5.17) відображено плавні переходи між більш щільними і більш пухкими областями в моноліті ППМ. Однак це не є реальною структурною особливістю і обумовлено тим, що обсяг, відповідний

радіальному положенню, за яким усереднюється пористість, швидко зменшується до центру ППМ.



Рисунок 5.17 – Визначення локальної пористості ППМ (проміжна частка між порожнистими порожнинами) у відтвореному сегменті циліндричного ППМ

Карта кольорів – усереднена пористість для кожної радіальної позиції для кожного з 1282 зображень, що відображаються. Профіль радіально усередненої осьової пористості, показаний у нижній частині, яка по суті плоска і відображає лише незначні випадкові зміни (~ 1%).

Для отримання точного значення загальної пористості використаємо простий підхід – витягували кубічні блоки різної довжини краю (від 300 нм до 57 мм) для розрахунку їх пористості. Для кожної довжини краю цю процедуру повторювали з 10 разів, які вибиралися випадково зі всього зразка ППМ (рис.5.18).





В той час як середні пористості всі схожі, їх стандартні відхилення дуже відрізняються; при малих обсягах реконструкції довжиною лише кількох мікрометрів (об'єм, типово вибірковий у FIB-SEM) можна легко спотворювати пористість проб за допомогою ефектів кінцевого розміру. Проста процедура, яку ми застосовували для перевірки, якщо значення пористості асимптотичне (i, отже, точне чи ні), підкреслює важливість ретельно підібраного обсягу вибірки.

Підхід, що відповідає цим критеріям (рис.5.17), використовує розподіл довжини хордів (РДХ) [73] і застосовується до будь-якого пористого матеріалу, що дозволяє однозначно розрізняти суцільний і пустотний простір.

РДХ-підхід забезпечує точні результати, оскільки він не вимагає припущень про геометрію порового простору, які притаманні об'ємним методам, таким як метод ртутної порометрії. РХД отримується шляхом сканування твердотільної внутрішньої межі ППМ хордами та збору отриманих прямих до скелету (основи) відстаней (довжини хордів) на гістограмі (рис.5.19).



Рисунок 5.19 – Аналіз розподілу довжини хорди РХД для дослідження розмірів характеристичних пустот та основи, а також їх неоднорідностей в ППМ

Хорди генеруються випадковим вибором точок у порожньому просторі і проекціюванням пар протилежних векторів з цієї точки в декількох напрямках, поки вони не потраплять в тверду основу моноліту (вектори, що виходять зі зображення). Відстань, натягнута на векторну пару, є довжиною хорди. Оскільки точки можуть генеруватися або в порах, або в основі моноліту, РХД-аналіз є потужним статистичним методом для опису порожнистого простору, а також твердої фази пористих матеріалів.

Отримані гістограми (рис.5.19) можуть бути оцінені за допомогою простої описової статистики, повертаючи середню характерну довжину і (нормалізовану) дисперсію, або, підібравши відповідну функцію. Наприклад, це функція експоненціального розпаду для матеріалів з випадковістю Дебая [5]. Для матеріалів з корельованим розподілом, як у даному випадку, до РХД можуть бути встановлені двопараметричні *k*, *r*-функції, які засновані на підході

статистичної механіки до коливань об'ємних об'ємів у випадкових пористих середовищах [172, 59]:

$$f(l_c) = \frac{k^k}{G(k)} \frac{l_c^{k-1}}{\mu^k} \exp(-k \frac{l_c}{\mu}),$$
(5.1)

де *lc* – довжина хорди;

µ - перший статистичний момент розподілу;

 $k = \frac{\mu^2}{\sigma^2}$ – перший і другий статистичні моменти розподілу;

G - гамма-функція;

k – міра для мікроструктурної неоднорідності на відстані декількох пор [6], що відрізняє випадкові від впорядкованих величин. Менші *k*-значення – більш широкий розподіл щодо μ, таким чином, більшу неоднорідність в загальному об'ємі ППМ.

Аналіз глобальної (узагальненої) пористості є відносно простим завданням, і 3D-реконструкція тільки необхідна для визначення цього параметра. Локально розв'язаний аналіз пористості дає можливість більше зрозуміти систематичні або стохастичні зміни пористості порівняно з оцінкою глобальної пористості, яка може бути пов'язана з умовами, що використовуються для синтезу матеріалу ППМ.

5.2. Передумови та фізичні основи проходження рідини через пористий матеріал

Для отримання кількісного представлення про режим роботи рідин, що рухається в пористому середовищі, необхідно спочатку встановити фізичні основи, що визначають цей режим. Ці основи є принципово тими ж, що і керують рухом в'язких рідин в звичайних вільних судинах, і виражаються рівнянням класичної гідродинаміки Стокс-Нав'є [55, 56, -108].

Це рівняння накладає вимогу динамічної рівноваги при розподілі швидкості в кожній системі потоку меншими силами інерції і силами внутрішнього тертя, а

також зовнішніми *зусиллями* і розподілом тисків всередині рідини. Внаслідок низьких швидкостей, які зазвичай характеризують проходження у пористому середовищі, математичні труднощі застосування цих рівнянь для пористого середовища можливо застосувати для практичних цілей [81, 4, 79].

Щоб зрозуміти загальну природу "закону течії", на підставі якого представлені дані експериментів по руху рідин [38], необхідно спочатку рохглянути ті вимоги, які накладаються при цьому теорією розмірностей [66].

Відомо, що падіння тиску ΔP через колону піску довжиною ΔS , що обумовлює рух рідини з густиною γ , в'язкістю μ і середньою швидкістю v, повинно бути зв'язано з цими змінними рівняння типу:

$$\Delta p = const \frac{\mu^2}{yd^2} F\left(\frac{dv\gamma}{\mu}\right) \varphi\left(\frac{\Delta s}{d}\right), \qquad (5.2)$$

де невідомі функції F і φ визначаються з експериментів [52], а $d \in$ мірою довжини, яка характеризує розмір відкритих пор.

Зрозуміло, що функція φ повинна знаходитися в лінійній залежності від свого коефіцієнта. Це спостереження приводить рівняння (5.2) до вигляду:

$$\frac{\Delta p}{\Delta s} = const \frac{\mu^3}{\gamma d^3} F\left(\frac{dv\gamma}{\mu}\right)$$
(5.3)

де ліва частина рівності – градієнт тиску в лінійній системі. Коефіцієнт $\frac{dv\gamma}{\mu} = R$ функції *F* є добре відомим числом при звичайних гідродинамічних розрахунок в прикладній гідравліці, а саме при розгляді рухів рідин через вільні від піску труби.

З рівняння (5.3) зрозуміло, що його можна застосувати також до потоку через ППМ, адже воно не є чимось іншим, ніж просторове рівняння, яке вирішує характер потоку. В окремому випадку при малих швидкостях і густині рідини або діаметрі ППМ введемо, що функція *F* рівна своєму коефіцієнту так, що:

$$\frac{\Delta p}{\Delta s} = const \frac{\mu v}{d^2} \tag{5.4}$$

216

Цей висновок є аналогічним до того, що приводиться в класичній гідродинаміці для в'язких рідин [321-324], де він відомий під назвою закона Пуазейля і де постійний коефіцієнт має величину 32, а v означає середню швидкість по перерізу труби. Рівняння (5.4) зазвичай показує наявність градієнтів тиску в лінійному «ламінарному потоці».

Для більш високих значень $d.v.\mu$ або $1/\mu$, особливо коли число Рейнольдса зростає так, що воно перевищує свою критичну величину порядку 2000, характер потоку в ППМ раптово змінюється від плавного струменевого руху до неправильного і нестійкого розподілу, що утворюють вихри. Тоді рух набуває турбулентного характеру, де перехід в напрямку збільшення або зменшення швидкості (найбільш зручний параметр при неперервних змінах процесу) досить різкий, хоча цикл збільшення і зменшення швидкостей в перехідній області зазвичай показує деякий гістерезис [234]. Градієнт тиску тут незалежний від в'язкості рідин, в той час як час в ламінарному русі він прямо пропорційний в'язкості.

Ця обставина приводить до уявлення про градієнт $\frac{\Delta p}{\Delta s}$ як про деяку суму величин швидкості з різними показниками степеня (макроскопічна швидкість вимірюється витратою на одиницю площі середовища). Справді, спроби в цьому напрямі привели вчених до вираження закону потоку таким рівнянням:

$$\frac{\Delta p}{\Delta s} = a\nu + b\nu^n \tag{5.5}$$

Було запропоновано ввести в це вираження швидкість в третій степені [39]. Останні дослідження [324, 107, 135] призводять рівняння (5.5) до наступного вигляду:

$$\frac{\Delta p}{\Delta s} = a v^n \tag{5.6}$$
де *п* лежить в межах 1-2.

Саме тому при низьких швидкостях і малих числах Рейнольдса градієнт тиску зміниться грубо лінійно із зміною швидкості *v* або «ламінарна течія»:

$$\frac{\Delta p}{\Delta s} = const \ v, \tag{5.7}$$

Закон Дарсі поступово втрачає актуальність, якщо течія стає частково або повністю турбулентною із зростанням числа Рейнольдса або швидкості, не існує характерної зміни виду течії, яке дозволяло б залежність виду $\frac{\Delta p}{\Delta s}$ і *v* при високих значеннях останньої, зі збільшенням числа Рейнольдса або швидкості.

Зробивши ряд припущень, можна дійти висновку, що за законом Дарсі, показує наявність пропорційності між макроскопічною швидкістю і градієнтом тиску дає повне уявлення про «закон течії» для малих швидкостей. Але досить складно дати точні границі його використання. Найскладніше, що визначення величини *d*, яке входить в число Рейнольдса, зв'язане з властивою їй двоїстістю, тоді як число Рейнольдса є незалежною змінною, яка визначає особливість течії [54, 85].

Обгрунтування реалізації закону Дарсі (5.1) при певній потрібній кількості проведених експериментів [36], буде застосований для проведення моделювання проходження рідини через ППМ.

5.2.1. Рівняння нерозривності при русі рідини в недеформованому пористому середовищі. Спроектуємо рух рідини через прямокутні осі координат Oxyz. Проекції швидкості фільтрації ППМ для цієї осі позначимо через u, v, ω ; вони будуть функціями від координат x, y, z i часу t. Візьмемо елементарний паралелепіпед *abcda'b'c'd'* (рис.5.20) ребра якого дорівнюють dx, dy, dz. Розглянемо рух рідини через цей паралелепіпед в напрямку осі Ox за елемент часу dt. Очевидно, за цей час через грань cdd'c' протікає деяка маса рідини $\rho udydzdt$ (ρ -густина рідини), а через грань *baa'b'* витікає маса:

$$\rho u dy dz dt + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u dy dz dt) dx$$
(5.8)

так що маса, накопичена в паралелепіпеді за час *dt* від руху в напрямку осі Ох, буде дорівнювати:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho u dy dz dt)dx = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)dx dy dz dt$$
(5.9)



Рисунок 5.20 – Проектування руху рідини через ППМ (паралелепіпед)

Аналогічно шляхом знайдемо, що маси, накопичені всередині паралелепіпеда від руху в напрямку осей *Оу і Оz* за час *dt* будуть дорівнювати відповідно:

$$-\frac{\partial}{\partial y}(\rho v)dxdydzdt$$

$$-\frac{\partial}{\partial z}(\rho \omega)dxdydzdt$$
(5.10)

Отже, повне накопичення маси рідини у паралелепіпеді за час *dt* дорівнюватиме:

$$-\left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \omega)\right] dx dy dz dt$$
(5.11)

З іншого боку, це накопичення викликає за час *dt* зміну маси в паралелепіпеді, яке дорівнює:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m dx dy dz) dt = \frac{\partial}{\partial t}(m\rho) dx dy dz dt$$
(5.12)

Насправді, якщо *m* це пористість ППМ, то об'єм пор паралелепіпеда, зайнятий рідиною, має величину рівну:

$$mdxdydz$$
 (5.13)

Порівнюючи (5.10) і (5.11), ми отримуємо рівняння нерозривності для руху в ППМ:

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(u\rho) + \frac{\partial}{\partial y}(v\rho) + \frac{\partial}{\partial t}(m\rho)dxdydzdt$$
(5.14)

Якщо ППМ, в якому рухається рідина, ми приймемо за недеформувальну, то її пористість *m* буде постійною величиною. У цьому випадку рівняння (5.14) буде:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(v\omega) + m\frac{\partial}{\partial t} = 0$$
(5.15)

5.2.2. Визначення залежності проникності від структурних особливостей ППМ. Безпосередня залежність проникності від структурних особливостей ППМ (пористості, розподілу розмірів пор, форми пор і коефіцієнт звивитості) буде справедлива тільки для певного роду матеріалів фільтрів [27, 178].

У ряді робіт [76-335] пропонуються співвідношення для оцінки проникності ППМ залежно від розміру частинок порошку, які визначають зменшення

коефіцієнта проникливості зі збільшенням поверхні частинок (зменшення фактору форми).

Коефіцієнт проникності [27, 88]:

$$k = \frac{Q \cdot m \cdot h}{S \cdot P}, \qquad (5.16)$$

де Q – розхід повітря через зразок, м³/с;

m – динамічна в'язкість повітря при експлуатаційних умовах, Па×с;

h – товщина зразка, м;

S – площа фільтрації дослідного зразка, м²;

Р – перепад тиску на зразку, Па

Так, наприклад, заздалегідь стає зрозуміло, що пористість не буде вирішальним фактором при встановленні величини *k*.

Для забезпечення мінімальних втрат перепаду тисків у фільтрованому середовищі проникливість ППМ повинна бути максимально можливою за заданої тонкості фільтрування. Проникливість збільшується зі збільшенням пористості, розмірів пор, перепаду тисків і зменшується зі збільшенням товщини фільтрувального елементу та в'язкості фільтрату. Це досить добре видно з таблиці 5.1.

Коефіцієнт звивитості, %	Пористість, %	Проникність, Дарсі
5,6	46,2	375
10,5	40,8	317
15,0	35,2	243
19,0	32,7	200
22,7	27,4	134

Таблиця 5.1 – Відповідність проникності пористості

5.3. Комплексне дослідження проникності ППМ

5.3.1. Дослідження проникності ППМ експериментальним шляхом. Визначення проникності через коефіцієнт проникності було зроблено за [88].

На основі проведених раніше досліджень був обраний розмір частинок порошку сталі ШХ15 становив 0,1-0,16 мм, оскільки ця фракція дає можливість виготовляти ППМ з середньою пори розміром 20 мкм [88].

Вплив кількості пороутворювача на розмір пор і пористість показано на рис.5.21 та 5.22 Як показано на графіках експериментальних досліджень, додавання пороутворювача CO(NH₂)₂ призводить до збільшення розмірів пор і пористості, ці характеристики можуть бути збільшенні в декілька разів.



Рисунок 5.21 – Вплив тиску пресування і концентрації пороутворювача на пористість ППМ порошку сталі ШХ15 з розміром вихідних частинок 0,1-0,16 мм



Рисунок 5.22 – Вплив тиску ущільнення та концентрації пороутворювача на розміри пор ППМ порошку сталі ШХ15 з розміром частинок 0,1-0,16 мм

З точки зору оптимальних характеристик фільтрації ППМ з асиметричною пористою структурою, що використовується для очищення рідин або газів, які характеризуються наявністю полідисперсних твердих забруднювачів низької концентрації, повинні мати меншу пористість і менші розміри пор у напрямку потоку. В той же час фільтрування ефективно відбувається тоді, коли перший шар, розміщений на вихідній поверхні ППМ, з нульовою концентрацією пороутворювача (з мінімальною пористістю і розмірами пор) забезпечує необхідну фільтраційну тонкість; другий шар, розміщений на вхідній поверхні ППМ, з максимальною концентрацією порою (з максимальною пористістю і розмірами пор) вловлює найбільші частини забруднювача.

Дані результати експериментальних досліджень дозволили розробити технологію виробництва ППМ методом пошарового формування [88] та стали передумовою для подальших фільтрувальних досліджень. Результати експериментальних досліджень розподілу по січенню в момент забивання забруднювачем основних параметрів багатошарових фільтрів: розміру пор, коефіцієнту проникливості та пористості. Дослідження проводились для суспензії з розподілом частинок за розмірами, які наведені на рис.5.23 [88].



Рисунок 5.23 – Диференціальна функція розподілу частинок забруднювача за розмірами



Рисунок 5.24 – Експериментальні залежності розподілу за січенням фільтру розмірів пор



Рисунок 5.25 – Експериментальні залежності розподілу за січенням фільтру коефіцієнта проникливості



Рисунок 5.26 – Експериментальні залежності розподілу за січенням фільтру пористості

З аналізу отриманих результатів видно, що розподіл частинок забруднювача за розмірами не значно впливає на такі характеристики, як розмір пор, коефіцієнт проникливості та пористість. Це дає змогу говорити про ефективне використання фільтрувальних матеріалів з відходів промислового виробництва, особливо багатошарових градієнтних фільтрів.

На рис.5.27 наведені експериментальні дослідження розподілу пористості по січенню тришарового ППМ (крива, яка відповідає часу фільтрації 0 год).



Рисунок 5.27 – Зміна у процесі фільтрації розподілу пористості за січенням тришарового фільтру

Для зразків із різною пористістю була визначена повнота і тонкість фільтрування. Результати даного дослідження представлені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Залежність повноти і тонкості фільтрування рідини від властивостей вихідних порошків

Середній	Пористість	Діаметр	Тонкість
розмір	матеріалу,	пор, мкм	фільтрації, мкм
частинок, мкм	%		
0,050-0,100	28	25	7-9
0,100-0,150	30	30	15-18
0,150-0,200	35,5	55	20-25
0,200-0,250	36,5	75	35-45
0,250-0,300	38,5	130	50-65
0,300-0,500	40	160	75-85

На підставі даних таблиці 5.2 можна зробити такі висновки:

1. Пористі проникні матеріали мають високий ступінь відчистки рідкого середовища від твердих мікрочастинок і дрібнодисперсних домішок;

2. ППМ можуть бути використані як фільтри для фільтрування різноманітних технічних засобів;

3. Пористі проникні матеріали можуть бути використані так само для очистки води як питної.

Крім того, отримані результати дозволяють робити висновки про ефективність очистки рідин:

1. Опір пористого фільтрувального елемента залежить від розміру пор та спільного об'єму пор, швидкості фільтрування, товщини стінок та зернистості вихідного порошку;

2. Тонкість фільтрації і опір мають пряму залежність від розміру пористості фільтрувального елемента. Чим вища пористість - тим вища тонкість фільтрації і опір;

3. Зі збільшенням розміру часток порошку знижується опір фільтрувального матеріалу, але зменшуються фільтрувальні властивості.

4. Діаметр пор має пряму залежність від розміру частинок вихідних реагентів.

Для забезпечення працездатності ППМ на термін більше 5 років було прийнято рішення забезпечити можливість регенерації фільтра для продовження його терміну експлуатації.

Регенерація зазвичай проводиться на основі спеціально підготовленої експериментальної рідини. Була обрана мастильно-охолоджувальна рідина.

Суть цього дослідження полягає в проведенні зворотнього промивання чистої змащувально-охолоджувальної водяної рідини саме до постійного значення перепаду тиску. Після цього процес фільтрації повторювався приблизно десять разів.

Результати даного дослідження представлені у графіку на рис.5.28.



Рисунок 5.28 – Графік залежності коефіцієнту відновлення від числа циклів регенерації

Після отримання зразків з порошків сталі ШХ15, які мають різний діаметр частинок, були проведені дослідження з виявлення впливу розміру пор на коефіцієнт відновлення фільтрувальних властивостей. Крім цього, якщо зразки були отримані з порошків з різним діаметром частинок, то і пори у цих зразків будуть мати різний діаметр. Цього разу в ЗОР були додані частинки металів. Діаметр мікрочастинок металів варіювався від 10 до 30 мкм.

Результати даного експерименту були відображені у графіку на рис.5.29.



Рисунок 5.29 – Графік залежності коефіцієнту відновлення фільтрувальних властивостей від числа циклів регенерації при добавлянні в ЗОР мікрочастинок, які мають розмір від 10 до 30 мкм

Показники	Значення показників
Пористість, %	25-55
Температура експлуатації	До 100
Ефективність фільтрації дисперсних	
мікропримісей з розміром частинок	До 99,99
більше 0,01 мкм, %	
Продуктивність ультрафільтрації	
води при перепаді тиску у фільтрі 0,1	До 10
МПа, л/см2*ч	
Продуктивність ультрафільтрації	
газів при перепаді тиску на фільтрі 2	До 40
кПа, л/см2*ч	
Міцність на згин, МПа	\geq 0,5
Геометричні розміри зразків, мм:	
циліндри, труби, стакани, діаметр;	До 40
Довжина	До 100

Таблиця 5.3 – Характеристики ППМ виготовлених за технологією [88]

Отже, завдяки наявності змінної пористості по січенню ППМ, наявний рівномірний розподіл забруднювача по об'єму порівняно з одношаровим фільтрувальним ППМ.

5.3.2. Дослідження проникності ППМ методами моделювання. Для моделювання проникності ППМ використаємо такі реалістичні дані (таблиці 5.4 – 5.6):

Таблиця 5.4 – Хімічний склад порошку сталі ШХ15

Хімічний елемент	Відсотковий склад, %
Кремній (Si)	0,17-0,37
Мідь (Cu), (не більше)	0,25
Марганець (Mn)	0,20-0,40
Нікель (Ni), (не більше)	0,30
Фосфор (Р), (не більше)	0,027
Хром (Cr)	1,30-1,65
Сірка (S), (не більше)	0,020

Межа	Morro Minucori	Відносне	Ударна	Твердість за
текучості	межа міцності σ_{-} МПо	звуження	в'язкість	Брінелем
σ _{0,2} , ΜΠa	$O_{\rm B}$, WII Ia	ψ, %	KCU, Дж/м ²	HB
710	1670	35-55	44	179-207

Таблиця 5.5 – Механічні властивості порошку сталі ШХ15

Таблиця 5.6 – Фізичні властивості порошку сталі ШХ15

Модуль пружності	Густина	Коефіцієнт теплового
Е, Гпа	р, кг/см ³	розширення, a, °С
211	7812	11,9

Основні властивості сталі ШХ15 з наведених вище таблиць (рис.5.30).

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.11e+011	Н/м^2
Коэффициент Пуассона	0.29	Не применимо
Предел прочности при растяжении	585000002.9	Н/м^2
Предел текучести	282685049	Н/м^2
Начальный модуль		Н/м^2
Коэффициент теплового расширения	1.1e-005	/K
Массовая плотность	7812	кг/м^З
Коэффициент отверждения	0.85	Не применимо

Рисунок 5.30 – Вікно властивостей матеріалу в Solidworks

На рис.5.31показано 3D модель ППМ з порошку сталі ШХ15 зі заданим реальними даними.



Рисунок 5.31 – 3D модель ППМ з порошку сталі ШХ15 спроектованого в *Solidworks*

5.3.2.1. Моделювання проходження рідини через ППМ різної пористості. Для проведення розрахунків було здійснено внутрішнє та зовнішнє фільтрування.



Рисунок 5.32 – Графічне відображення траєкторії руху потоку води по ППМ (внутрішнє фільтування)

На рис. 5.33 показано січення колби, в якій закріплено ППМ. Всередині колби рухається рідина зсередини фільтра у колбу. Визначається швидкість, з якою рідина діє на ППМ. Синім кольором позначено ділянки потоку, в яких швидкість мінімальна, а червоним максимальна.



Рисунок 5.33 – Відображення січення ППМ за параметром швидкості внутрішнього фільтрування

Отримані модельні дані наведено у таблицях 5.3.6-5.11.

Таблиця 5.7 - тримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості води через ППМ з порошку сталі ШХ15 пористістю 10%

Назва цілі	Оди- ниці вимір У	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е значення
Повний тиск	[Pa]	184516,11 8	184499,66 3	182733,595	185410,091
Температур а (текучого середовища)	[C]	23,204	23,205	23,203	293,206
Швидкість	[m/s]	7,413	7,436	6,763	8,131

Таблиця 5.8 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості води через ППМ з порошку сталі ШХ15 пористістю 20%

Назва цілі	Оди- ниці вимір У	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е значення
Повний тиск	[Pa]	166123,31 5	166255,17 8	165852,168	166736,119
Температур а (текучого середовища)	[C]	23,204	23,205	23,203	293,206
Швидкість	[m/s]	7,077	7,097	6,456	7,763

Таблиця 5.9 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості води через ППМ з порошку сталі ШХ15 пористістю 30%

Назва цілі	Оди- ниці вимір У	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е значення
Повний тиск	[Pa]	144198,72 1	144358,05 2	143984,339	144766,809
Температур а (текучого середовища)	[C]	23,204	23,205	23,203	293,206
Швидкість	[m/s]	6,965	6,984	6,354	7,641

Таблиця 5.10 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості води через ППМ з порошку сталі ШХ15 пористістю 40%

Назва цілі	Оди- ниці вимір У	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е значення
Повний тиск	[Pa]	136525,11 4	136694,05 7	136316,773	137077,551
Температур а (текучого середовища)	[C]	23,204	23,205	23,203	293,206
Швидкість	[m/s]	6,909	6,928	6,303	7,589
					Т

Таблиця 5.11 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості води через ППМ з порошку сталі ШХ15 пористістю 50%

Назва цілі	Оди- ниці вимір У	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е значення
Повний тиск	[Pa]	132973,33 2	133146,72 0	132767,406	133518,515
Температур а (текучого середовища)	[C]	23,204	23,205	23,203	293,206
Швидкість	[m/s]	6,876	6,894	6,273	7,543

З даних, які наведені у таблицях 5.7-5.11 бачимо, що при зростанні пористості ППМ значення тиску і швидкості рідини зменшується, а значення температури текучого середовища залишається незмінним.

На рис. 5.34 зображено швидкість руху потоку рідини у середині ППМ по довжині перерізу колби.



Рисунок 5.34 – Графік залежності швидкості руху води у ППМ відносно довжини перерізу ППМ

З даних графіка чітко видно, що швидкість руху рідини збільшується ближче до краю ППМ. Швидкість змінюється на проміжку від 4 до 7 м/с.

На рис.5.35 представлено графік залежності тиску води на ППМ з середини відносно довжини його перерізу.



Рисунок 5.35 Графік залежності тиску води на ППМ з середини відносно довжини його перерізу

Залежність на рис. 5.35 показує тиск потоку рідини по довжині перерізу колби, в якій знаходиться ППМ. Дані графіка вказують, що тиск рідини збільшується ближче до краю ППМ. Тиск змінюється на проміжку від 104,2кПа до 105,270кПа.

Ті ж дії проводимо для зовнішнього фільтрування води ППМ (ззовні у середину ППМ).



Рисунокт 5.36 – Графічне відображення траєкторії руху потоку води по ППМ (зовнішнє фільтрування)



Рисунок 5.37 – Відображення січення ППМ за параметром швидкості зовнішнього фільтрування

Таблиця 5.12 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості води через колбу у середину ППМ з порошку сталі ШХ15 пористістю 10%

Назва цілі	Оди- ниці вимір У	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е Значення
Повний тиск	[Pa]	1909368,2 1	1818273,2 6	1794089,69	1919368,23
Температур а (текучого середовища)	[C]	22,949	22,935	22,874	22,951
Швидкість	[m/s]	109,861	109,584	108,849	109,861

Таблиця 5.13 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості води через колбу у середину ППМ з порошку сталі ШХ15 пористістю 20%

Назва цілі	Оди- ниці вимір у	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е Значення
Повний тиск	[Pa]	1719353,9 3	1882074,7 1	1692617,77	1919353,931
Температур а (текучого середовища)	[C]	22,949	22,935	22,874	22,951
Швидкість	[m/s]	105,186	104,921	104,214	105,187

Таблиця 5.14 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості води через колбу у середину ППМ з порошку сталі ШХ15 пористістю 30%

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	1669351,9	1642037,896	1577530,382	1669351,09
Температура (текучого середовища)	[C]	22,949	22,935	22,874	22,951
Швидкість	[m/s]	103,629	103,367	102,67	103,629

Таблиця 5.15 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості води через колбу у середину ППМ з порошку сталі ШХ15 пористістю 40%

Назва цілі	Од. виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	1546850,36	1523025,63	1467249,795	1646850,356
Температура (текучого середовища)	[C]	22,949	22,935	22,874	22,951
Швидкість	[m/s]	102,85	102,590	101,899	102,851

Таблиця 5.16 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості води через колбу в середину ППМ з порошку сталі ШХ15 пористістю 50%

Назва цілі	Од. виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	1256619,93	1253939,06	1250205,638	1258149,927
Температура (текучого середовища)	[C]	22,949	22,935	22,874	22,951
Швидкість	[m/s]	102,383	102,125	101,435	102,383

Проаналізувавши дані з таблиць 5.12-5.16, можемо зробити висновок, що при зростанні пористості ППМ значення параметрів тиску і швидкості рідини зменшується, а значення температури текучого середовища залишається незмінним.



Рисунок 5.38 – Графік залежності швидкості руху води у ППМ відносно довжини перерізу ППМ (зовнішнє фільтрування)

З рис.5.38 видно, що швидкість руху рідини збільшується ближче до краю ППМ. Швидкість змінюється на проміжку від 166 до 178 м/с.



Рисунок 5.39 – Графік залежності тиску води на ППМ зсередини відносно довжини його перерізу (зовнішнє фільтрування)

5.3.2.2. Моделювання проходження повітря через ППМ різної пористості. Аналогічні розрахунки для повітря (внутрішнє та зовнішнє фільтрування) наведені нижче.



Рисунок 5.40 – Графічне відображення траєкторії руху швидкості потоку повітря з середини ППМ у колбу (внутрішнє фільтрування)

На рис.5.40 зображено колбу, всередині якої закріплено ППМ. Визначається траєкторія руху потоку повітря через ППМ поза швидкістю. Синім кольором позначено ділянки потоку, в яких швидкість мінімальна, а червоним максимальна.

Таблиця 5.17 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15 з пористістю 10% у колбу

Назва цілі	Оди- ниці вимір У	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е Значення
Повний тиск	[Pa]	101548,11 1	101548,15 3	101546,386	101549,701
Температур а (текучого середовища)	[C]	23,221	23,219	23,213	23,225
Швидкість	[m/s]	7,458	7,607	6,969	8,475

Таблиця 5.18 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15 з пористістю 20% у колбу

Назва цілі	Оди- ниці вимір У	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е Значення
Повний тиск	[Pa]	101403,39 7	101403,33 5	101402,506	101404,147
Температур а (текучого середовища)	[C]	23,221	23,219	23,213	23,225
Швидкість	[m/s]	7,122	7,265	6,658	8,095

Таблиця 5.19 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15 з пористістю 30% у колбу

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	101376,898	101376,816	101376,086	101377,502
Температура (текучого середовища)	[C]	23,221	23,219	23,213	23,225
Швидкість	[m/s]	7,011	7,151	6,554	7,969

Таблиця 5.20 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15 з пористістю 40% у колбу

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	101367,646	101367,557	101366,861	101368,201
Температура (текучого середовища)	[C]	23,221	23,219	23,213	23,225
Швидкість	[m/s]	6,954	7,094	6,502	7,906

Назва цілі	Оди- ниці вимір у	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е Значення
Повний тиск	[Pa]	101363,36 7	101363,27 5	101362,595	101363,901
Температур а (текучого середовища)	[C]	23,221	23,219	23,213	23,225
Швидкість	[m/s]	6,921	7,059	6,471	7,868

Таблиця 5.21 – Отримані модельні дані тиску проходження, температури та швидкості повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15 з пористістю 50% у колбу

Проаналізувавши дані з таблиць, можна зробити висновок, що при зростанні параметру пористості ППМ значення параметрів тиску і швидкості рідини зменшується.



Рисунок 5.41 – Графік залежності швидкості руху повітря зсередини ППМ відносно довжини перерізу у колбу

З графіка на рис.5.41 видно, що швидкість руху повітря збільшується ближче до середини ППМ, а далі зменшується. Швидкість змінюється на проміжку від 3,5 до 8 м/с.



Рисунок 5.42 – Графік залежності тиску руху повітря зсередини ППМ відносно довжини перерізу у колбу

Дані графіка рис.5.42 переконливо доводять, що тиск повітря збільшується ближче до краю ППМ. Тиск змінюється на проміжку від 101,329 кПа до 101,331 кПа.



Рисунок 5.43 – Напрямки потоку повітря, що проходить через ППМ (зовнішнє фільтрування)



Рисунок 5.44 – Визначення тиску потоку повітря, що проходить через ППМ (зовнішнє фільтрування)

Синім кольором позначено ділянки потоку повітря, в яких тиск мінімальний, а червоним - максимальний.

Таблиця 5.22 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15 з пористістю 10% з колби

Назва цілі	Оди- ниці вимір у	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е Значення
Повний тиск	[Pa]	160306,92 3	158701,27 2	156614,492	160306,923
Температур а (текучого середовища)	[C]	15,106	15,176	15,106	15,269
Швидкість	[m/s]	109,867	109,116	108,104	109,868

Таблиця 5.23 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15 з пористістю 20% з колби

Назва цілі	Од. виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	114103,45	113934,946	113722,057	114103,45
Температура (текучого середовища)	[C]	15,078	15,133	15,078	15,202
Швидкість	[m/s]	105,486	104,921	104,207	105,486

Таблиця 5.24 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості

проходження повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15

з пористістю 30% з колби

Назва цілі	Од. виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	109978,383	109894,918	109789,154	109978,384
Температура (текучого середовища)	[C]	15,063	15,11	15,063	15,169
Швидкість	[m/s]	104,077	103,602	103,004	104,077

Таблиця 5.25 – О тримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15

з пористістю 40% з колби

Назва цілі	Од. виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	108765,316	108705,916	108627,313	108765,316
Температура (текучого середовища)	[C]	15,053	15,095	15,053	15,148
Швидкість	[m/s]	103,391	102,974	102,436	103,391

Таблиця 5.26 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження повітря через ППМ з порошку сталі ШХ15 з пористістю 50% з колби

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	108240,824	108191,829	108126,121	108240,824
Температура (текучого середовища)	[C]	15,047	15,085	15,047	15,135
Швидкість	[m/s]	102,978	102,598	102,099	102,978

Проаналізувавши дані з таблиць 5.22-5.26, робимо висновок, що при зростанні параметру пористості ППМ значення параметрів тиску, швидкості і температури текучого середовища зменшується.



Рисунок 5.45 – Залежністі швидкості руху повітря з колби у ППМ відносно довжини перерізу

Швидкість змінюється у проміжку від 168...180 м/с.



Рисунок 5.46 – Залежність тиску повітря, що рухається з колби у ППМ відносно довжини перерізу

Тиск змінюється на проміжку від 102,769 кПа до 102,744 кПа.

5.3.3.3. Моделювання проходження газу через ППМ різної пористості. На рис.5.47 зображено колбу, всередині якої закріплено ППМ. У колбі рухається газ (неон) зсередини ППМ назовні колби. Синім коліром позначено ділянки потоку, в яких швидкість мінімальна, а червоним - максимальна.



Рисунок 5.47 – Графічне зображення траєкторії руху газу з ППМ у колбу (внутрішнє фільтрування)



Рисунок 5.48 – Визначення тиску повітря, що проходить з ППМ у колбу (внутрішнє фільтрування)

Таблиця 5.27 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	101479,791	101480,071	101479,041	101481,044
Температура (текучого середовища)	[C]	23,219	23,218	23,214	23,224
Швидкість	[m/s]	7,571	7,629	7,152	8,493

проходження газу з ППМ у колбу (пористість 10%)

Таблиця 5.28 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження газу з ППМ у колбу (пористість 20%)

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	101379,551	101379,597	101379,104	101380,039
Температура (текучого середовища)	[C]	23,219	23,218	23,214	23,224
Швидкість	[m/s]	7,229	7,285	6,834	8,111

Таблиця 5.29 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження газу з ППМ у колбу (пористість 30%)

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	101361,112	101361,113	101360,625	101361,495
Температура (текучого середовища)	[C]	23,219	23,218	23,214	23,224
Швидкість	[m/s]	7,115	7,171	6,728	7,982

Таблиця 5.30 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості

проходження	газу з ППМ	I у колбу	(пористість	. 40%)
-------------	------------	-----------	-------------	--------

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнс значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	101354,665	101354,651	101354,166	101355,023
Температура (текучого середовища)	[C]	23,219	23,218	23,214	23,224
Швидкість	[m/s]	7,058	7,112	6,675	7,918

Таблиця 5.31 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості

проходження газу з ППМ у колбу (пористість 50%)

Назва цілі	Оди- ниці вимір у	Значення	Середнє значення	Мінімальн е значення	Максимальн е Значення
Повний тиск	[Pa]	101351,68 4	101351,66 3	101351,178	101352,031
Температур а (текучого середовища)	[C]	23,219	23,218	23,214	23,224
Швидкість	[m/s]	7,024	7,078	6,643	7,881

Проаналізувавши дані з таблиць 5.27–5.31, можна зробити висновок, що при зростанні параметру пористості ППМ значення параметрів тиску і швидкості рідини зменшується, а значення температури не змінюється.



Рисунок 5.49 – Графік залежності швидкості руху газу з ППМ у колбу

Швидкість змінюється на проміжку від 4 до 8 м/с.



Рисунок 5.50 – Графік залежності тиску потоку газу, що проходить з ППМ у колбу

Тиск змінюється на проміжку від 101,327 кПа до 101,328 кПа.



Рисунок 5.51 – Графічне зображення траекторії руху газу з ППМ у колбу (зовнішнє фільтрування)



Рисунок 5.52 – Визначення тиску повітря, що проходить з ППМ у колбу (зовнішнє фільтрування)

Таблиця 5.32 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості

проходження газу з колби у ППМ (пористість 10%)

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	11709368,2	11618273,6	11394089,69	11709368,23
Температура (текучого середовища)	[C]	19,95	19,935	19,874	19,954
Швидкість	[m/s]	109,86	109,584	108,848	109,86

Таблиця 5.33 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження газу з колби у ППМ (пористість 20%)

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	9019353,93	8982074,72	8892617,774	9019353,931
Температура (текучого середовища)	[C]	19,95	19,935	19,874	19,954
Швидкість	[m/s]	105,186	104,928	104,215	105,187

Таблиця 5.34 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості

	проходже	ння газу з кол	іби у ППМ (г	юристість 30%)
ли-				

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	6669351,28	6642037,32	6577530,38	6669351,28
Температура (текучого середовища)	[C]	19,95	19,935	19,874	19,954
Швидкість	[m/s]	103,629	103,368	102,671	103,629

Таблиця 5.35 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження газу з колби у ППМ (пористість 40%)

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	5846850,36	5823025,06	5767249,795	5846850,356
Температура (текучого середовища)	[C]	19,95	19,935	19,874	19,954
Швидкість	[m/s]	102,85	102,591	101,899	102,85

Таблиця 5.36 – Отримані модельні дані тиску, температури та швидкості проходження газу з колби у ППМ (пористість 50%)

Назва цілі	Оди- ниці виміру	Значення	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне Значення
Повний тиск	[Pa]	5466149,93	5443939,11	5392205,638	5466149,927
Температура (текучого середовища)	[C]	19,95	19,935	19,874	19,954
Швидкість	[m/s]	102,383	102,125	101,435	102,383

Проаналізувавши дані з таблиць 5.32–5.36 можна зробити висновок, що при зростанні параметра пористості ППМ значення параметрів тиску і швидкості газу зменшується, а значення температури не змінюється.



Рисунок 5.53 – Графік залежності швидкості руху газу з колби у ППМ

Швидкість змінюється на проміжку від 166 до 178 м/с.



Рисунок 5.54 – Графік залежності тиску потоку газу, що проходить з колби у ППМ

Тиск змінюється на проміжку від 102310,5 Па до 102313 Па.

5.3.3.4. Системне визначення проникливості ППМ. Середовище води зображується рухомими стрілками, які в різних ділянках ППМ позначаються різними кольорами, відповідно до максимальних і мінімальних значень, які вони отримують у процесі руху.



Рисунок 5.55 – Напрямки руху потоку води в системі із чотирьох ППМ при визначенні швидкості


Рисунок 5.56 – Напрямки руху потоку води в системі із чотирьох ППМ при визначенні перепаду тисків

Графічні залежності швидкості руху потоку води та перепаду тисків представлено на рис.5.57.



Рисунок 5.57 – Графік залежності швидкості руху води в системі з чотирьох ППМ відносно перерізу ППМ

На графіку зображено швидкість руху потоку рідини по довжині перерізу системи фільтрів із ППМ. Із графіка видно, що швидкість руху рідини

збільшується ближче до краю ППМ. Швидкість змінюється на проміжку від 1 до10,2 м/с.



Рисунок 5.58 – Графік залежності перепаду тисків у системі із чотирьох ППМ відносно перерізу ППМ

На графіку 5.58 зображено перепад тисків потоку рідини по довжині перерізу системи фільтрів із ППМ. Можна зробити висновок, що тиск рідини збільшується ближче до краю ППМ.

5.4. Визначення границі міцності ППМ методами моделювання

Аналіз структури різноманітних матеріалів за допомогою комп'ютерних технологій проводили наукові колективи під керівництвом К.В. Гуляева, А.П. Карнаухова, А.А. Самарського та інших закордонних вчених [198, 317, 341]. Особливість цих робіт в тому, що за допомогою тих чи інших математичних моделей, програмних комплексів, а також розроблених алгоритмів розглядається структура уже сформованих матеріалів. Традиційні технологічні процеси порошкової металургії характеризуються регламентованою послідовністю операцій: отримання шихти, заповнення прес-форм, формування заготовки, спікання, фінішна механічна обробка тощо.

Кожний із цих етапів суттєво впливає на якість кінцевого продукту, і тому серед нових технологій важливим є використання комп'ютерного моделювання, яке базується на методі скінчених елементів, а також за допомогою якого можна прогнозувати якісні показники кінцевого продукту.

Моделювання проводили у програмному комплексі ABAQUS, який має такі модулі: **Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job, Visualization, Sketch**. Для імітації структурно неоднорідного середовища нами використано модуль **Visualization**. У якості зразка використовували круглу пластину, виготовлену з еластичного матеріалу (рис.5.59) в циліндричній системі координат товщиною h і радіусом R.



Рисунок 5.59 – Пластина циліндричної системи координат х, у, z, яку складено за даними [73]

Структурні елементи представлені у вигляді п'єзоелектричних накладок однакової товщини *δ* та радіусом ≤ *R*. Зовнішні та внутрішні поверхні межують із пасивним шаром, покритим із нескінченно тонкими суцільними електродами. На пластинку діє осесиметричний рівномірно розподілений уздовж радіуса

поверхневий тиск $P = cos(\omega t)$, який змінюється в часі t з коловою частотою ω , близькою до власної частоти. Окрім того, виконуються функції електричних потенціалів $\psi(\frac{h}{2} + \delta) - \psi(-\frac{h}{2} - \delta) = R_{\theta}(2V^{\tau\omega})$ із частотою механічного навантаження, де також відбувається процес збурення. Моделювання поведінки пластини ґрунтується на гіпотезах Кірхгофа–Лява і зводиться до розв'язування звичайних диференціальних рівнянь.

За допомогою модуля **Visualization** програмного комплексу ABAQUS та наведеного вище матеріалу, проаналізували коливання пластини, результати представлені на (рис.5.60-5.62).



Рисунок 5.60 – Коливання пластини у момент часу t= 2 ⁰C, яку складено за даними [11; 13]



Рисунок 5.61 – Коливання пластини у момент часу t= 5 ⁰C, яку складено за даними [73].



Рисунок 5.62 – Коливання пластини у момент часу t= 10 0 C, яку складено за даними [73]

Розглянемо пористий проникний матеріал зовнішнім діаметром 40 мм, внутрішнім діаметром 30 мм і довжиною 220 мм, виготовлений із матеріалу – порошок сталі ШХ15 (рис.5.63) і навантажену силою Р=10кПа, яка прикладена до тіла ззовні та зсередини.



Рисунок 5.63 – Загальний вигляд ППМ виготовленого з порошку ШХ15

Для початку роботи необхідно завантажити заздалегіть створену деталь із пористого проникного матеріалу. Дана деталь була накреслена з допомогою програмного комплексу Solidworks (рис.5.64).



Рисунок 5.64 – Тривимірна модель деталі ППМ, яка виготовлена з порошку сталі ШХ15

У модулі **Encatre** вводимо нульові лінійні і кутові переміщення в торці ППМ і виводимо візуальне відображення прикладання тиску ззовні (рис.5.65).



Рисунок 5.65 – Графічне відображення прикладених до тіла навантаження

Як критерій міцності у програмному комплексі ABAQUS цього разу вибираємо кількість питомої потенціальної енергії формозміни, накопиченої здеформованим об'єктом. Небезпечний стан (текучість) у загальному випадку напруженого стану виникає тоді, коли питома потенціальна енергія формозміни досягне свого критичного значення. Еквівалентне напруження за четвертою теорією Губера-Мізеса [82] буде рівним:

$$\sqrt{\frac{1}{2}}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right] \le [\sigma]$$
 5.17

За допомогою **Plot Contour** програмного комплексу ABAQUS та введених всіх необхідних даних, автоматично проводяться розрахунки та одержимо результати прикладання тиску ззовні (рис.5.66).



Рисунок 5.66 – Розподілення навантаження на ППМ за критерієм максимального напруження за Губером-Мізесом ззовні

У даному випадку ми отримуємо графічне відображення розподілення навантаження на ППМ за критерієм максимального напруження за Губером-Мізесом. Деталь відображається в деформованому вигляді. Зеленим кольором показано допустимі навантаження на ППМ за критерієм максимального напруження за Мізесом, а червоним відображено перевищення гранично допустимих навантажень.

Змінимо критерій на **Pressure** (критерій руйнування в ABAQUS) і відображуємо розподілення по тиску (рис.5.67).



Рисунок 5.67 – Розподілення деформацій по ППМ під дією заданого тиску

У даному випадку ми отримуємо графічне відображення розподілення навантаження на ППМ за критерієм **Pressure**. Деталь відображається в деформованому вигляді. Зеленим кольором показано допустимі навантаження на ППМ, а червоним відображено перевищення гранично допустимих навантажень.

Результати моделювання представлено у вигляді графічної залежності, яка представлена на рис.5.68.



Рисунок 5.68 – Графік залежності тиску, що діє на ППМ від довжини перерізу

Аналогічні розрахунки проведемо для ППМ, до якого навантаження прикладене зсередини. Результати моделювання у вигляді графічної залежності наведено на рис.5.69.



Рисунок 5.69 – Графік залежності тиску, що діє на ППМ зсередини

Як видно з рис. 5.68, 5.69 чим далі від зони закріплення ППМ діє навантажувальне середовище (вода, повітря, газ), тим більший тиск створюється у ППМ. У нашому випадку тиск зсередини при проходженні води менше діє на ППМ, ніж тиск, прикладений ззовні.

Організація програмного середовища моделювання ABAQUS надає можливість досліджувати та прогнозувати закономірності формування структури та властивості матеріалів з урахуванням розмірів структурних елементів, встановлення кореляційних зв'язків між складовими, будовою; а також використовується для аналізу напружено-деформованого стану під дією механічних та термічних навантажень, базою для яких слугує метод скінчених елементів [342a, 3426].

5.5. Дослідження корозійної тривкості ППМ зі захисними покриттями у різних агресивних середовищах

Під час експлуатації анодованих сплавів у корозійному середовищі на окремих ділянках покриву у ППМ формуються вузькі канали з підвищеною іонною провідністю [87]. Такі ділянки стають осередками локальних корозійних пошкоджень ППМ [202-346]. Активні аніони (наприклад, хлору і води) в цих місцях проникають через анодну плівку і взаємодіють із сплавом.

Плазмоелектролітичні покриви є інертні. Однак за наявності в них пор, що є каналами іскрових розрядів, також можливе корозійне руйнування металу чи сплаву. Все це знижує функціональні властивості покриву та скорочує термін експлуатації сплаву. У зв'язку з цим досліджено корозійну тривкість плазмовоелектрохімічних ОКП на цирконієвому та титанових сплавах у різних корозійноагресивних середовищах і визначено їх струми корозії, за якими судили про швидкість корозії у ППМ.

Про швидкість електродних реакцій, що зумовлюють корозійний процес, можна судити з електрохімічних досліджень. У зв'язку з тим вивчали електрохімічну поведінку ППМ у вихідному стані та з оксидокерамічним покривом в кислих середовищах, які є корозійно-агресивними для ППМ.

З використаних у корозійних дослідженнях розчинів кухонної солі та соляної кислоти більш агресивним для ППМ є середовище, що містить іони натрію. Після формування ОКП корозійні процеси суттєво гальмуються. В середовищі соляної кислоти струм корозії покриву понижується порівняно з матрицею у на порядок. У більш агресивному середовищі кухонної солі струм корозії понижується на два порядки, а потенціал корозії покриву розчині солі посувається додатньо, що теж свідчить про зниження корозійної активності поверхні.

Відомо, що висока корозійна тривкість досягається утворенням тонкої захисної плівки оксидів. Однак, у тяжких умовах експлуатації та за наявності особливо агресивних середовищ (у їх числі і використані в роботі) ці плівки, внаслідок малої товщини та невисокої твердості, не забезпечують високих антикорозійних властивостей.

Струми корозії покривів *I_{cor}*, за якими судили про швидкість корозії матеріалу, понижуються для всіх досліджуваних систем, а вищий ефект від створення ОКП проявляється в більш агресивних середовищах.

Аналіз одержаних поляризаційних кривих показує, що формування ОКП відбивається на електрохімічних параметрах корозії ППМ, тобто значення струмів корозії зменшуються. Ця зміна пояснюється меншим розчиненням компонентів сплаву. Потенціал корозії корозійно нетривкого ППМ за дії розчину 10% HCl має від'ємне значення -370 mV (рис.5.70), а струм корозії – 80 mA/m².

Під час формування на ППМ ОКП струм корозії зменшується на 1...2 порядки залежно від складу електроліту, в якому синтезували покрив. Так покрив, синтезований мало концентрованому електроліті, який містить луг та рідке скло має найменшу корозійну тривкість з тих, які синтезували в більш концентрованих електролітах і має значення 1,2·10⁻³ A/м². З подальшим збільшенням концентрації електроліту струми корозії *і*_{cor}ОКП понижуються.



Рисунок 5.70 – Поляризаційні криві ППМ (1) та його ОКП (2, 3) в розчині 10%HCl (див. табл.5.37)

Таблиця 5.37 – Потенціал та струм корозії ППМ та покриву на ньому за різних режимів оксидування

No	Корозійне серело-	Склад електроліту, г/л				I _a /I _c	τ,	U _{cor} ,	i _{cor} ,
	вище	КОН	p.c.	CrO ₃	H_2O_2	А/дм²	XB	В	A/M^2
1	10%NaCl	_						0,48	0,82
2		10	15			20/20	20	0,41	9,09 [.] 10 ⁻⁴
3		10	15			20/30	40	0,24	1,63.10-4
4		10	15	0,1		20/30	40	0,26	6,20 [.] 10 ⁻⁴
1	10%HCl							0,37	8,07.10-2
2		10	15		10	20/20	30	0,41	0,21.10-4
3		10	15			20/20	30	0,50	1,39.10-4
4		3	2			20/20	20	0,45	12,07.10-4

Покрив, отриманий в електроліті складу 10 г/л КОН + 15 г/л р.с., має значення струму корозії 1,39·10⁻⁴ А/м², а при введенні в електроліт 10 г/л H₂O₂ понижує i_{cor} до значення 1,21·10⁻⁴ А/м².

Такий результат, очевидно, пов'язаний із поєднанням високої твердості та товщини покриву на ППМ.

У більш агресивному середовищі кухонної солі значення струму та потенціалу корозії незахищеного ППМ рівне відповідно 0,82 А/м² та -0,48 В. Так як покрив, отриманий в електроліті малої концентрації, у менш агресивному середовищі соляної кислоти погано себе проявив, то в подальших експериментах було недоцільно досліджувати такий покрив.

Отож, досліджували покриви, режими яких приведено в таблиці 5.37. За аналізом даних встановлено, що струми корозії ОКП для всіх досліджуваних систем понижуються на 3 порядки. Покрив, синтезований в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. має значення струму корозії 9,09·10⁻⁴ A/м². Однак підвищення співвідношення густини струмів катодного до анодного понизило швидкість корозії покриву ще в п'ять разів.

Додавання до такого електроліту 0,1 г/л CrO₃ значення струму корозії ненабагато підвищило (рис.5.71, крива 4).



Рисунок 5.71 – Поляризаційні криві ППМ (1) та його оксидокерамічного покриву (2, 3, 4) в розчині 10%NaCl (див табл.5.37)

Потенціали корозії в розчині кухонної солі посуваються в позитивну сторону за синтезу всіх ОКП, що теж свідчить про зниження корозійної активності поверхні.

На рис. 5.72 зображено покрив ППМ після корозії в агресивних середовищах за анодної поляризації. ППМ в агресивних середовищах зазнає корозію. Однак, покрив, навіть з оцінки зовнішнього вигляду, не кородує. На рисунку представлено фотографію ОКП після корозії в високо агресивному середовищі 10% NaCl. В розчині соляної кислоти загальний вигляд покриву не змінюється, а більш детально дослідити його властивості можна за допомогою поляризаційних кривих.



Рисунок 5.72 – Загальний вигляд оксидокерамічного покриву на ППМ після корозії в середовищах: а – 10%NaCl; б – 10%HCl.

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

1. Проведена обробка 3D зображень ППМ, а саме:

1.1. Показано утворення 3D зображення за допомогою програмного середовища Avizo[®] способом накладання плоских поперечних розрізів відповідного діапазону по висоті готового пористого порошкового матеріалу.

1.2. Визначено лінійні розміри та встановлено відповідні зв'язки між частинами зрізу шліфу ППМ за допомогою Avizo[®].

1.3. Визначено основні структурні характеристики пористого проникного матеріалу з відходів промислового виробництва.

1.4. Визначено розподіл зміни пористості по січенню ППМ та показано її нерівномірний характер.

2. Проведена 3D-реконструкція та морфологічний у аналіз ППМ з визначення середнього значення пористості в об'ємі та становить 0,687.

Встановлено фізичні основи проходження рідини через пористий матеріал. Доведено, що вони керують рухом в'язких рідин в звичайних вільних каналах, і виражаються рівнянням класичної гідродинаміки Стокс-Нав'є.

4. Показано, що для забезпечення мінімальних втрат перепаду тисків у фільтрованому середовищі проникливість ППМ повинна бути максимально можливою за заданої тонкості фільтрування.

5. Проведено дослідження проникності ППМ експериментальним шляхом та методами моделювання, зокрема:

- показано, що розподіл частинок забруднювача по розмірах не значно впливає на такі досліджувані характеристики, як розмір пор, коефіцієнт проникливості та пористість. Це дає змогу говорити про ефективне використання фільтрувальних матеріалів з відходів промислового виробництва, особливо багатошарових градієнтних фільтрів;
- показано, що при значеннях пористості ППМ значення параметрів тиску і швидкості газу зменшується, а значення температури не

змінюється.

6. Показана продуктивність фільтрації води та газу ППМ з пористістю 25-55% при різних перепадах тиску і складає до 10 та до 40 відповідно, при цьому міцність на згин буде більшою за 5 МПа.

7. При моделювання міцності ППМ показано, що чим далі від зони закріплення ППМ діє навантажувальне середовище (вода, повітря, газ), тим більший тиск створюється у ППМ. У нашому випадку тиск зсередини при проходженні води менше діє на ППМ, ніж тиск, прикладений ззовні.

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

ВИСНОВКИ

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 способом прогнозування складу, структури, властивостей за допомогою комп'ютерно-інформаційних технологій. Розроблено і виготовлено ППМ з відходів промислового виробництва, придатним для очищення технічних рідин та газів, що підвищило ефективність використання виробів у різних галузях машинобудування.

1. Проведені комплексні дослідження та аналіз закономірностей формування структури пористих проникних матеріалів. Встановлено та обґрунтовано механізми створення багатошарових ППМ з прогнозованою пористістю з керованими експлуатаційними властивостями за рахунок розробки та розв'язання задач засипки, формування порошкових матеріалів, а також пресування, спікання та нанесення корозійностійкого покриття.

2. Вперше була розроблена методологія розрахунку моделі випадкових пор у ППМ на етапі засипки 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 радіальноізостатичного 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 дозволив 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 нанесеня 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 фільтрі. 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. З порівняльних даних по корозійностікості видно, що застосування двошарових та тришарових фільтрувальних матеріалів на основі порошку ШХ15 для очищення малоагресивних середовищ дало змогу за рахунок їх покращених властивостей збільшити тривалость експлуатації фільтрувального 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 у порівнянні 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 брудоємкість в 1,5 рази вищу порівняно з відомими ППМ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. «Factors Affecting the Oxidation Behavior of Thin Fe-Cr-Al Foils: Effect of Foil Dimensions». *Klower Mater. Corr.* 1998. 49(10). P. 758–763.

 Abadeer N. S., and C.J. Murphy «Recent Progress in Cancer Thermal Therapy Using Gold Nanoparticles». *The Journal of Physical Chemistry*. 2016. №120 (9). P. 4691–4716.

3. Adler P., Malevich A.E., Mityushev V. «Nonlinear correction to Darcy's law». *Acta Mech.* 2013. №224. P. 1823–1848.

4. Ainsworth M., Oden J.T. «A posteriori error estimation in finite element analysis». New York. 2000. 249 p.

5. Allison John, Backman Dan, Christodoulou Leo «Integrated computational materials engineering: A new paradigm for the global materials profession». *JOM*. 2012. 58 (11). P.25–27. doi:10.1007/s11837-006-0223-5

6. Andersson M., Holmquist B., Lindquist J., Nilsson O. «Wahlund Analysis of film coating thickness and surface area of pharmaceutical pellets using fluorescence microscopy and image analysis». *J. Pharm. Biomed.* 2000. №22. P.325–339.

7. Aydin M., Balik G., Miguel A. ., Reis A.H. «Some features of flow and particle transport in porous structures». *J. Mechanical Engineering*. 2005. №51. P. 495–500.

8. Bagagiolo F., Visintin A.Z. «Hysteresis in filtration through porous media». Anal. Anwendungen. 2000. №19(4). P. 977–998.

9. Bağci O., Dukhan N., Ozdemir M. «Flow regimes in packed beds of spheres from Pre-Darcy to turbulent». *Transp. Porous Media*. 2014. №104(3). P. 501–520.

10. Barr D. W. «Turbulent flow through porous media». *Ground Water*. 2013. №9(5). P. 646–650.

11. Basso Andrea, Peter Graf Hans, Gibbon Dave, Cosatto Eric «Virtual Light: Digitally-Generated Lighting For Video Conferencing Applications». *Shan Liu ICIP 2001*. 2011. V.14. P.1085-1088.

Bear J. «Dynamics of Fluids in Porous Media». *Elsevier Science*. 1972.
 №12(13). P. 45-57.

13. Bear J., Braester C., Menier P. «Effective and relative permeabilities of anisotropic porous media». *Transp. Porous Media*. 1987. No. 3. P. 301–316.

14. Bejan A., Dincer I., Lorente S., Miguel A. F., Reis A. H. «Porous and Complex Flow Structures in Modern Technologies». *Springer-Verlag.* 2004. №1. P. 90-99.

15. Biot M. A. «Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media». J. Appl. Phys. 1962. №33(4). P. 1482–1498.

16. Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. J. «A continuum method for modeling surface tension». *Comput Phys.* 1992. T.100. P. 335–354.

17. Brooks, R.H., Corey, A.T. «Hydraulic properties of porous media». *Hydrology Papers*. 1964. Vol. 3. P. 276-280.

18. Brovko G. L. «Models and Problems for Saturated Porous Media». *Vestn. Mosk. Univ.* Ser. 1. 2010. No. 6, P. 33-43.

19. Bruno G., Efremov A. M., Levandovskyi A.N. «Connecting the macroand microstrain responses in technical porous ceramics: Modeling and experimental validations». *Journal of Materials Science*. 2010. №46(1). P. 161-173.

20. Chen J., Hopmans J. W., Grismer M.E. «Parameter estimation of twofluid capillary pressure–saturation and permeability functions». *Adv. Water Resour.* 1999. №22(5). P. 479–493.

21. Chen W., Baghdasaryan L., Buranathiti T., Cao J. «Model validation via uncertainty propagation and data transformations». *AIAA Journal*. 2004. V. 42. P. 1406-1415.

22. Cheng Y.P., Teo C.J., Khoo B.C. «Microchannel flows with superhydrophobic surfaces: Effects of Reynolds number and pattern width to channel height ratio». *Phys Fluids*. 2009. T.21. P. 122-1244.

23. Cheng Z.D., He Y.L., Cui F.Q. «A new modelling method and unified code with MCRT for concentrating solar collectors and its applications». *Appl Energy*.
2013. №101. P. 686-698.

24. Chern M., Vaziri N. «Effect of Porous Media on Hydraulic Jump Characteristics by Using Smooth Particle Hydrodynamics Method». *Int J Civ Eng.* 2020. №18. P. 367–379.

25. Choi H.J., McDowell D.L., Rosen D., Allen J.K., Mistree F. «An inductive design explorationmethod for robustmultiscalematerials design». *ASMEJournal of Mechanical Design.* 2008. V. 130. P. 1–13.

26. Close C.M., Frederick D.K. «Modelling and Analysis of Dynamic Systems». *Houghton Mifflin*. 2008. №12. P.235-254.

27. Collins R.E. «Fluid Flow through Porous Materials»: monograph. Moscow, 1964. 453 p.

28. Cottin-Bizonne C., Barentin C., Charlaix Bocquet L., Barrat J.L. «Dynamics of simple liquids at heterogeneous surfaces: Molecular-dynamics simulations and hydrodynamic description». *Eur Phys J.* 2004. №15. P. 427–438.

29. Cunningham J.C., Sinka I.C., Zavaliangos A.J. «Analysis of tablet compaction. I. Characterization of mechanical behavior of powder and powder/tooling friction». *Pharm Sci.* 2004. №93. P. 2022–2039.

30. Curtarolo Stefano; Hart Gus L.W., Nardelli Marco Buongiorno, Mingo Natalio, Sanvito Stefano Levy «The high-throughput highway to computational materials design». *Nature Materials*. 12 (3). P.191–201. <u>doi:10.1038/nmat3568</u>.

31. Danielsson P.-E., Lin Q. and Ye Q.-Z. «Efficient detection of second degree variations in 2D and 3D images». *Technical Report LiTH-ISYR-2155*, Sweden, 2009. 412 p.

32. Department of Materials Science and Engineering [Электронный pecypc] / Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. 1997-2013. Режим доступа: <u>http://dmse.mit.edu/</u> вільний.

33. Di Carlo D.A., Juanes R., LaForce T., Witelski T.P. «Nonmonotonic traveling wave solutions of infiltration into porous media». *Water Resour.* 2008. Res. 44(2). P.34-40.

34. Dilip D., Bobji M.S., Govardhan R.O. «Effect of absolute pressure on flow through a textured hydrophobic microchanne». *Microfluid Nanofluid*. 2015. T.19.P. 1409–1427.

35. Dodig Crnkovic G. Information and Computation Nets. Investigations into Info-computational World. In: Information and Computation, 2009, Verlag, Saarbrucken. P.1–96.

36. Epelfeld A.V., Lyudin V.B., Dun'kin O.N. and Nevskaya O.S. «Discharge in the metal–oxide–electrolyte system during ac microarc oxidation». *Izv. Ross. Akad. Nauk.* 2000. №64 (4). P. 759–762.

37. Erhardt A., Zinser G., Komitowski D., Bille J. «Reconstructing 3D light microscopic images by digital image processing». *Applied Optics*. 2014. №24. P.194-200.

38. Floridi L. «A defense of informational structural realism». *Synthese*. 2008. I.161(2), P.219–253.

39. Flynn D. «Modelling the flow of water through multiphase porous media with the Preisach model». Ph.D. thesis. 2008. P. 21-30.

40. Fomenko E. V., Anshits N. N., Pankova M. V. «Influence of the composition and structure of the glass-crystalline shell of cenospheres on helium permeability». *Glass Phys Chem.* 2012. №38. P. 218–227.

41. Fullwood D.T., Niezgoda S.R., Adams B.L., Kalidindi S.R. «Microstructure sensitive design for performance optimization». *Progress in Materials Science*. 2010. V. 55. P. 477–562.

42. Fullwood D.T., Niezgoda S.R., Adams B.L., Kalidindi S.R. «Microstructure sensitive design for performance optimization». *Progress in Materials Science*. 2010. V. 55. P. 477–562.

43. Gaddam A., Garg M., Agrawal A., Joshi S. S. «Modeling of liquid-gas meniscus for textured surfaces: Effects of curvature and local slip length». J Micromech Microeng. 2015. №25. P. 125-130.

44. Geiger S. L., Durnford D.S. «Infiltration in homogeneous sands and a mechanistic model of unstable flow». *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000. №64. P. 460–469.

45. Ghane E., Fausey N. R., Brown L. C. «Non-Darcy flow of water through a woodchip media». *J. Hydrol.* 2014. №519. P. 3400–3409.

46. Glinchuk M. D., Gnesin G. G., Kurdyumov A. V. «The Scientific Paths Laid down by I. N. Frantsevich are Alive and Developing». *Powder Metall Met Ceram*. 2005. №44. P. 310–334.

47. Grim H.R., Kolb A.C., Shen K.Y. «Broadening of Hydrogen Lines of Plasma». *Phys. Rev.* 1959. T.116. № 4. P. 4 – 16.

48. Häffelin A., Niedrig C., Wagner S. F., Baumann S., Meulenber W. A., Ivers-Tiffée E. «Three-dimensional performance model for oxygen transport membranes». *Journal of the Electrochemical Society*. 2014. №161(14). P. 1409-1415.

49. Harley A., Gilkes R. «Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview». *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2000. № 56. P. 11–36.

50. Harting J., Kunert C., Hyväluoma J. «Lattice Boltzmann simulations in microfluidics: Probing the no-slip boundary condition in hydrophobic, rough, and surface nanobubble laden microchannels». *Microfluid Nanofluid*. 2010. T.8. P. 1–10.

51. Herminghaus S. «Dynamics of wet granular matter». Adv. Phys. 2005. №54. P. 221–261.

52. Hilfer R., Doster F., Zegeling P.A. «Nonmonotone saturation profiles for hydrostatic equilibrium in homogeneous porous media». *Vadose Zone Journal*. 2012. №11(3). P. 58-64.

53. Hosseini S. M., Joy D.M. «Development of an unsteady model for flow through coarse heterogeneous porous» *Int. J. River Basin Manae*. 2007. №5(4). P 253–265.

54. Hunyadi Murph S. E., Heroux K., Turick C. and Thomas D. «Metallic and Hybrid Nanostructures: Fundamentals and Applications». *In Applications of Nanomaterials*. 2012. Vol. 4. P. 123-129.

55. Hunyadi Murph S. E., Jacobs S., Siegfried M., Hu T., Serkiz S.and J. Hudson Manganese-Doped «Gold Nanoparticles as Positive Contrast Agents for Magnetic Resonance Imaging (MRI)». *Journal of Nanoparticle Research*. 2012. №14. P. 658–659.

56. Hydrol H. J. «Comments on Izbash's equation». Watanabe. 1982. №58.P. 389–397.

57. Inglis D. R., Teller E. «Properties of Syntesised». Astrophys J. 1939. №90. P. 439 – 446.

58. Izbash S. V. «O filtracii v kropnozernstom materiale : Groundwater flow in the material kropnozernstom». Leningrad, 1931. 320 c.

59. Jonsson P., Jonsen P., Andreasson P., Lundstrom T. S., Hellstrom J. G. «Smoothed particle hydrodynamic modelling of hydraulic jumps: bulk parameters and free surface fluctuations». *Engineering*. 2016. №8. P. 386–402.

60. Kastner J. Conference on Industrial Computed Tomography: Proceedings (Austria, 2012). 428 p.

61. Kim Y., Choi G., Park H., Byeon A. «Hydraulic jump and energy dissipation with sluice gate over a rough be». *Water*. 2015. №7. P. 5115–5130.

62. Klapkiv M. D., Posuvailo V. M. «Thermodynamic Analisis of Chemical Reaction During Synthesis of Oxide-Ceramics on Aluminium Alloys in Electrolyte Plasma» *International Conference and Exhibition Micro Mat* '97. (16-18 April, Berlin, 1997). Germany, 1997. P. 1207–1210.

63. Krivonosova Ye. A., Gorchakov A. I., Scherbakov Yu. V. «Structure and properties of coatings in microarc oxidation». *Weld*. 2014. Int. 28 (10). P. 816–819.

64. Krysmann W. «Keramisierte Metalloberflachen». *Ingeneur-Werkstoffe*. 1992. V.4. № 11. P. 61-62.

65. Kuts Yu., Povstyanoy O. «Computer-informative software for research of the new materials of constructional application». *Functional Material*. 2017. T.24. №1. P. 175-178.

66. Lagae A, Dutré P. «A Comparison of methods for generating Poisson disk distributions». *Computer Graphics*. 2008. 27(1). P. 114-129.

67. Lebesque H. «Conditions de régularité, conditions d' irrégularité, conditions de impossibilité dans le problème de Dirichlet». *Comp. Rendu Acad. Sci.* 1984. № 178, P. 349–354.

68. Lee Y. «An Eulerian finite element model for the steady state forming of porous materials». *Met. Mater. Int.* 2006. №12. P. 161–166.

69. Lima R.S., Marple B. R. «Thermal Spray Coatings Engineered from Nanostructured Ceramic Agglomerated Powders for Structural, Thermal Barrier and

Biomedical Applications: A Review». *J. Thermal Spray Technol.* 2007. 16(1). P.40–63.

70. Liu G. B., Xie K. H., Zheng R. Y. «Model of nonlinear coupled thermohydro-elastodynamics response for a saturated poroelastic medium». *Sci. China (Ser E)*. 2009. N $ext{252}(8)$. P. 2373–2383.

71. Luding S. «Anisotropy in cohesive, frictional granular media». *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2005. №17(24). P. 2623–2640.

72. Ludwig W., King A., Reischig P. et al. «New Opportunities for 3D Materials Science of Polycrystalline Materials at the Micrometre Lengthscale by Combined Use of X-ray Diffraction and X-ray Imaging». *Materials Science and Engineering*. 2009. A. 524. P. 69–76.

73. Lungarella M., Pegors T., Bulwinkle D., Sporns O. «Methods for Quantifying the Informational Structure of Sensory and Motor Data». *Neuroinformatics*. 2005. I.3. P.243–262.

74. M de Berg, M van Krefeld, M. Overmars, O. Schwarzkopf «Computational geometry: algorithms and applications». Berlin, 2000. 230 p.

75. Majmudar T., Sperl M., Luding S., Behringer R. «Jamming Transition in Granular Systems». *Physical Review Letters*. 2007. №98(5). P. 1–4.

76. Makse H., Johnson D., Schwartz L. «Packing of Compressible Granular Materials». *Physical Review Letters*. 2000. №84(18). P. 4160–4163.

77. Mathias, S., Butler, A., Zhan, H. J. Hydraul «Approximate solutions for Forchheimer flow to a well». *Eng.* 2008. №134(9). P. 1318–1325.

78. Matsushita K., Lungarella M., Paul C., Yokoi H. «Locomoting with Less Computation but More Morphology». *Proc. 2005 IEEE: Int. Conf. on Robotics and Automation*. 2005. P. 2008–2013.

79. Matthies H. G. «Stochastic finite elements: Computational approaches to stochastic partical differential equations». *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2008. Nº88(11). P. 849-873.

80. McDowell D. L. «Simulation-assisted materials design for the concurrent design of materials and products». *Journal of the Minerals,Metals and Materials Society*. 2007. V. 59. P. 21–25.

81. McMillan A. J, Archer E, McIlhagger A, Lelong G. «Strength knockdown assessment of porosity in composites: modelling, characterising and specimen manufacture». *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. №3. P.20-27.

82. McMillan A. J. «Computational modeling of ultrasound propagation using Abaqus explicit». SIMULIA UK RUM. UK. 2013. №12. P.210-219.

83. McMillan A. J. «Material strength knock-down resulting from multiple randomly positioned voids». *Journal Reinforced Plastics and Composites*. 2012. 31(1). P. 13-28.

84. McMillan A. J., Watson G. «The use of wavelets to facilitate finite element post-processing». *Materials Science Forum*. Gemany, 2003. №440. P. 429-38.

85. McMillan A. J. «Defect identification and characterisation algorithms for assessing effect on component strength». *15th ECCM*. Italy, 2012. 230 p.

86. Michailidis N., Stergioudi F., Omar H., Papadopoulos D., Tsipas, D. N. «Colloids and Surfaces A Experimental and FEM analysis of the material response of porous metals imposed to mechanical loading». *Physicochemical and Engineering Aspects*. 2011. №382(1–3). P. 124–131.

87. Midgley P. A., Dunin-Borkowski R. E. «Electron Tomography and Holography in Materials Science». *Nature Materials*. 2009.Vol. 8. P. 271–280.

88. Miguel F. 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures: Book of Abstracts. (Belgium, 2013). 374 p.

89. Min-Chul Jin. «Analysis of Mechanical Properties of Composite Materials» : monograph. USA, 2002. 944 p.

90. Mitarai N., Nori F. «Wet granular materials». Adv. Phys. 2006. №55. P. 1–45.

91. Moens D., Vandepitte D. «A survey of non-probabilistic uncertainty treatment in finite element analysis». *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2005. №194(12-16). P. 1527-1566.

92. Moutsopoulos K. N. «Exact and approximate analytical solutions for unsteady fully developed turbulent flow in porous media and fractures for time dependent boundary conditions». *J. Hydrol.* 2009. №369(1–2). P. 78–89.

93. Murphy C. J., Gole S. E., Hunyadi J. W., Stone P. N., Sisco A., Alkilany
B. E. «Chemical Sensing and Imaging with Metallic Nanorods». *Chemical Communications*. 2008. V. 4. P. 554–557.

94. Myshkin N. K., Kong H., Gngoriev A.Ya., Yoon E. «The use of color in wear debris analysis». *Elsevior Wear*. 2001. v.251. P.1218-1226.

95. Nigmatulin R. I. «Fundamentals of the Mechanics of Heterogeneous Media» : monograph. Moscow, 1978. 532 p.

96. Nykyforchyn H. M., Dietzel W., Klapkiv M. D. «Synthesis of oxideceramic coating on magnesium alloys and their corrosion properties». *Hight Temp. Material Prosess.* 2003. №7. P. 214 – 246.

97. Nykyforchyn H.M., Klapkiv M.D., Posuvailo V.M. «Properties of Syntesised in Electrolyte Plasma Oxide-Ceramic Coutings on Alluminium Alloys». *Surface and Coatings Technology*. 1998. V. 100-101. P. 219 – 221.

98. Ogorodnikova O. M. «Possibilities of Siemens PLM software for robotics research and production management». *Advanced computer and information technologies: Proceedings of Russian-Korea scientific workshop* (Ekaterinburg, 16-18 May 2012). Ekaterinburg, 2012. P. 122-128.

99. Ohser J., Schladitz K. «3D Images of Materials Structures: Processing and Analysis». *Wiley-VCH Verlag GmbH*. 2009. P. 341-350.

100. Ohser J., Schladitz K. «3D Images of Materials Structures: Processing and Analysis». Berlin, 2009. 341 p.

101. Panchal J.H., Kalidindi S.R., McDowell D.L. «Key computational modeling issues in Integrated Computationa lMaterials Engineering». *Computer-Aided Design*. 2013. V. 45. P. 4–25.

102. Panizzo A. «Physical and numerical modelling of sub-aerial landslide generated waves»: Ph.D. Dissertation. Italy, 2004, 231 p.

103. Paul C. «Morphology and Computation». *Proceedings of the International Conference on the Simulation of Adaptive Behaviour (Los Angeles, 2004)*. P. 33–38.

104. Peyrin F., Engelke K. «CT Imaging: Basics and New Trends. In: Handbook of Particle Detection and Imaging». *Springer-Verlag.* 2012. P. 883–915. 105. Philip J. R. «Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous materials». J. Geophys. Res. 1964. №69(8). P. 1553–1562.

106. Piazza D., Lorandi N.P., Pasqual C.I., et al. «Influence of a Microcomposite and a Nanocomposite on theProperties of an Epoxy-Based Powder Coating». *Materials Science and Engineering*. 2011. T. 528. P. 6769-6775.

107. Pilato L.A., Michno M.J. «Advanced Composite Materials» : monograph. German, 1994. 194 p.

108. Poli R. «An analysis of publications on particle swarm optimization applications». *Tech. Rep. CSM-469*. May–November 2007.

109. Pollock T.M., Allison J. E., Backman D.G., Boyce M.C., Gersh M., Holm E. A., et al. «Integrated computational materials engineering: A transformational discipline for improved competitiveness and national security». Washington, 2008. 152 p.

110. Potter E., Pinho S.T., Robinson P., Iannucci L, McMillan A. J. «Mesh generation and geometrical modeling of 3D woven composites with variable tow cross-sections». *Computational Materials Science*. 2012. №51. P. 103–111.

111. Povstyanoy O., Zabolotnyi O., Polinkevich R., Somov D., Redko O. «Modeling the Structural Characteristics of Porous Powder Materials with Application Models of Casual Two-Dimensional Packaging». *World Congress on Engineering and Technology; Innovation and its Sustainability 2018. WCETIS 2018. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer*, Cham (2019), doi.org/10.1007/978-3-030-20904-9_2.

112. Povstyanoy Oleksandr, Rud Viktor, Shiberko Viktoriya «Theoretical and practical background of implementing computer modelling for solving tasks on forming powder materials» [Електронний ресурс]: The 2015 E-MRS Fall Meeting and Exhibit (Poland, September 15 to 18, 2015). Режим доступу: <u>http://www.emrs-strasbourg.com/index.php?option=com_abstract&task=view&id=333&day=2015-</u>0918&year=2015&Itemid=&id_season=14

113. Povstyanoy Oleksandr, Andriy Kuz'mov «Theoretical and practical background of computer modelling implementation for solving of problems of powder materials forming» [Електронний ресурс] : (The 2018 E-MRS Fall Meeting). Режим

доступу: <u>https://www.european-mrs.com/multifunctional-advanced-composite-</u> materials-idea-market-emrs#collapse70

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

115. Povstyanoy Oleksandr, Rud Victor «Development of new porous permeable materials with predicted properties». *6th International conference: book of Abstracts* (Kyiv, October 28-30, 2019). Kyiv, 2019. P.20.

116. Povstyanoy Oleksandr, Zabolotnyi Oleg, Rud Victor, Kuzmov Andriy, Herasymchuk Halyna «Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties». *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Pp. 456-465. Springer, Cham (2019), doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_46.

117. Povstyanoy Oleksandr, Zabolotnyi Oleg, Slabkiy Andriy, Dzyubinskyi Andriy, Nikolyuk Tamara «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.

118. Povstyanoy O., Kuts Yu.«Review of the current software for computer based research in the processing of metallographic images». *Canadian scientific journal*. 2014. Issue 2. P. 54-63.

119. Prusov E.S. «Modern Methods of Metal Matrix Composit Alloys Production and New Approaches to Realization of Reinforcing Scheme». *Machines, Technologies, Materials.* 2014. Iss.1. P. 11–13.

120. Qian J., Zhan H., Zhao W., Sun F. «Experimental study of turbulent unconfined groundwater flow in a single fracture». *J Hydrol*. 2005. №31. P. 134–142.

121. Rak A.L., Ilyuschenko A.F., Maziuk V.V., Pilinevich L.P. «New Technology for Production of High-Effective Porous Materials with Adjusted Pore Structure., Designed for filtration of Gases and Liquid». *Proceeding of the 1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition*. (Granada, Spain, 18-22 October, 1998). Vol. 5. P. 225-231.

122. Rak A.L., Ilyuschenko A.F., Maziuk V.V., Pilinevich L.P. «New Technology for Production of High-Effective Porous Materials with Adjusted Pore Structure., Designed for filtration of Gases and Liquid». *Proceeding of the 1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition* (Granada, Spain, 18-22 October, 1998.). Granada, 1998. Vol. 5. P. 225-231.

123. Ranjith S. K. «Mesoscopic simulation of single DNA dynamics in rotational flows». *Eur Phys J.* 2015. №38. P. 89-96.

124. Rao J. S. «Theory of Machines through the 20th century». *Mechanismand Machine Theory*. 2015. V.89. P. 43–71.

125. Richefeu V., Youssoufi M., Radjai F. «Shear strength properties of wet granular materials». *Phys. Rev.* 2006. E 73. P. 56-64.

126. Roose T., Fowler A. C., Darrah P. R. «A mathematical model of plant nutrient uptake». *Math Bio.* 2001. №42. P. 347–360.

127. Rusark Z., Horvarth I., Mandorli F. «Towards multi-domain knowledge transfer in engineering analyses and simulations based on virtual prototypes». *Engineering with Computers*. 2013. V. 29. Issue 3. P. 247-250.

128. Rutel B. «Advanced membrane technologies: manufacturers, industrial applications, and environment». *Pishch. Prom-st.* 1997. No.12. P. 56–57.

129. Salahi M. B., Sedghi-Asl M., Parvizi M. J. «Nonlinear flow through a packed column experiment». *Hydrol. Eng.* 2015. №10(9). P. 236-239.

130. Sedghi-Asl M., Rahimi H., Saleh R. «Non-Darcy flow of water through a packed column test». *Transp. Porous Media*. 2014. №101(2). P. 215–227.

131. Shen H., Brinson L. «Finite element modeling of porous titanium» *International Journal of Solids and Structures*. 2007. №44(1). 3. 320–335.

132. Shintaro Watanabe, Koji Miyajima «Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions». *ICIP*. 2011.P.201-204.

133. Shyberko V., Rud V. «Modelling of structural and inhomogeneous materials based on the finite element method». *Actual problems of economics APE*. 2013–2014. P. 124 – 130.

134. Sidi «Practical Extrapolation Methods : Theory and Applications, Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics». Cambridge, 2002. 432 p.

135. Song C., J. Abbell, Y. He, S. E. Hunyadi Murph, Y. Cui, and Y. Zhao. «Gold-Modified Silver Nanorod Arrays: Growth Dynamics and Improved SERS Properties». *Journal of Materials Chemistry*. 2012. № 22. P. 1150–1159.

136. Surface Enhanced Raman Scattering Spectroscopic Waveguide: Patent 4/15/2015: 2015. U.S., serial № 501665408.

137. Szala J. «Zastosovwanie metod kompputerowe analizy obrazu do ilosciowej oceny stryktury materialow» : monografia. Warshawa, 2000. 167 p.

138. Szantoa M., Bierb W., Fragec N., Hartmannb S., Yosibash A. «Experimental based finite element simulation of cold isostatic pressing of metal powders». *Int J Mech Sci.* 2008. №50. P. 405–421.

139. Tolnai D., Townsend P., Requena G. et. «In situ synchrotron tomographic investigation of the solidifi cation of an AlMg4.7Si8 alloy». *Acta Materialia*. 2012.
V.6–7. P. 2568–2577.

140. Tubalov N. P., Lebedeva O. A., Vereshchagin V. I. «Porous composite ceramic materials obtained through self-propagating high-temperature synthesis in the Fe2O3—Al2O3—Al system». *Novye Ogneupory*. 2003. No.9, 40–42.

141. Venkataraman P., Rao P. «Validation of Forchheimer's law for flow through porous media with converging boundaries». *J Hydraul Eng-ASCE 2000*. $N_{2}126(1)$. P. 63–71.

142. Vereshchagin V. I., Evstigneev V. V., Kolesnikov D. V. «Selfpropagating high-temperature synthesis technology for preparation of porous permeable materials». *Refract Ind Ceram.* 2005. №46. P. 416–418.

143. Wang F, He X-S, Wang Y, Yang S. M. «Markov model and convergence analysis based on cuckoo search algorithm». *Comput Eng.* 2012. №38(11). P. 180–185.

144. Wang L. «Data representation of machine models». *Dynamic thermal analysis of machines in running state*. 2014. P. 11-29.

145. Wang M. Y., Williams J. J., Jiang L. et al. «Three Dimensional (3D) Microstructural Characterization and Quantitative Analysis of Solidifi ed Microstructures in Magnesium-Based Alloys». *Metallography, Microstructure and Analysis*. 2012. Vol.1. Issue. 1. P. 7–13.

146. Wang Q. J., Chung Y. W. (eds) «Plasma Electrolytic Oxidation (PEO)». *Encyclopedia of Tribology*. 2013. №1. P. 121-130.

147. Warren James A., Ward Charles H. "Evolution of a Materials Data Infrastructure". *JOM*. 70 (9). P.1652–1658. <u>doi:10.1007/s11837-018-2968-z</u>

148. Wen Z, Liu K, Zhan H. «Non-Darcian flow toward a larger-diameter partially penetrating well in a confined aquifer». *Environ Earth Science*. 2014. №72. P. 46-47.

149. Wen Z., Huang G.H., Zhan H.B. «A numerical solution for non-Darcian flow to a well in a confined aquifer using the power law function». *J Hydrol*. 2009. $N_{2364(1-2)}$. P. 99–106.

150. Wenbin Xue, Zhiwai Deng, Rugi Chen, Tonghe Zhang, Hui Ma «Microctructure and properties of ceramic coatings produced on 2024 aluminium alloy by microarc oxidation». *J. of Materials Science*. 2001. №36. P. 2615-2619.

151. Werner W. «Lectures on two-dimensional critical percolation». *Statistical mechanics. IAS/Park City Mathematics Series*. 2009. №16. P. 297–360.

152. Wismans J. G. F., Van Dommelen J.A. W. et al. «Computed Tomographybased Modeling of Structured Polymers». *Journal of Cellular Plastics*. 2009. Vol. 45. № 2. P. 157–179.

153. Władysław Osuch «3D Imaging of Strengthening Particles in Cr-V-Mo (13HMF) Steel Using FIB/SEM Tomography». *Solid State Phenomena*. 2012. P.186-200.

154. Xiao Y. «Random fractals and Markov processes». *Fractal Geometry and Applications*. 2004. №72. P. 261–338.

155. Young C., Mc Millan A.J., Ravey E., Verdicchio J. Quinn J., McIlhagger A., Buchanan S. «The hybrid approach of a 3D textile composite finite element modeling technique at meso-scale level». *18th ICCM*, South Korea, 2011. P.452-459.

156. Zeng, Z., Grigg, R. A. «Criterion for non-Darcy flow in porous media» *Transp. Porous Media*. 2006. №63. P. 57–69.

157. Zhang J., Qian X., Zhang H., Liu O. «Fluid-structure interaction simulation of aqueous outflow system in response to juxtacanalicular meshwork permeability changes with a two-way coupled method». *CMES: Comput Model Eng Sci.* 2018. N^o116(2). P. 301–314.

158. А. с. №1657230 Распылительная головка к электро-металлизатору /
В. И. Похмурский, М. М. Студент, В.С. Пих, М.А. Тыхан. (1991). МКИ В05
В7/22. Опубл. 23.06.91 Бюл. №23.

159. А.с. 1219251 Устройство для изостатического прессования длинномерных изделий из порошка / Степаненко А. В., Богинский Л. С., Реут О. П., Павловская Л.Ф. МКИ В22F 3/02. №3808438/22-02; (1986). Заявлено 30.10.84; Опубл. 23.03.86, Бюл. № 11.

160. А.с. 1219251. Устройство для изостатического прессования длинномерных изделий из порошка / Степаненко А.В., Богинский Л.С., Реут О.П., Павловская Л.Ф. МКИ В22F 3/02. (1986). №3808438/22-02; Заявлено 30.10.84; Опубл. 23.03.86, Бюл. № 11.

161. А.с. 1144272 СССР, МКИ В22F3/10 Способ изготовления спеченных пористых изделий / Витязь П.А. и др. // Открытия. Изобретения. – 1984. - №31. – с.31.

162. А.с. 1184607 СССР, МКИ В22F3/10 Способ изготовления спеченных пористых изделий / Витязь П.А. и др. // Открытия. Изобретения. – 1985. - №38. – с.35.

163. А.с. 1257933 СССР, МКИ В22F3/10. Способ изготовления пористых спеченных изделий / Витязь П.А. и др. // Открытия. Изобретения. – 1986. - №34. – с.275 (Не подлежит опубл. в открытой печати).

164. А.с. 1292263 СССР, МКИ В22F3/10. Способ изготовления пористых спеченных изделий / Капцевич В.М. и др. // Открытия. Изобретения. – 1987. -№7. – с.245 (Не подлежит опубл. в открытой печати). 165. А.с. 1347277 СССР, МКИ В22F3/10. Способ изготовления пористых спеченных изделий / Шелег В.К. и др. // Открытия. Изобретения. – 1987. - №39. – с.245 (Не подлежит опубл. в открытой печати).

166. Achenbach J.D. «Wave Propagation in Elastic Solids» : monograph Amsterdam, 1990. 239 p.

167. Абу-Дхаим Наель Мухаммед «Разработка процесса получения композиционных проницаемых материалов из металлических и полимерных порошков для эффективного влагомаслоотделения»: дисс. канд. техн.: 05.16.06. Минск, 1999. 95 с.

168. Андриевский Р. А. «Пористые материалы в машиностроении» : монография. Москва, 1976. 184 с.

169. Антонов В.Н., Львович Н.Я., Чопоров О.Н. и др. «Высокоэффективные технологии как неотъемлемая часть развития современного общества» : авт.кол.монография. Одеса, 2015. 220 с.

170. Аренсбургер Д.С., Пугин В С., Гатушкин А А. «Металлокерамические фильтры из титана». *Порошковая металлургия*. 1969. № 10. С. 93-99.

171. Аренсбургер Д. С., Пугин В. С., Гатушкин А. А. «Металлокерамические фильтры из титана». Порошковая металлургия. 1969. №10. С. 93-99.

172. Афанасьев Л.М. и др. «Прессование на гидродинамических установках с помощью метательных взрывчатых веществ». *Прогрессивные* способы изготовления металлокерамических изделий. Минск.1971. 96с.

173. Баковец В. В. «Оксидные покрытия, полученные микродуговой обработкой титанового сплава в кислых электролитах». *Неорг. Материалы*.
1987. №7. С. 1226 – 1228.

174. Бальшин М. Ю. «Теория и практика прессования металлических порошков». Порошковая металлургия. 1974. № 6. С. 37-39

175. Белов С. В. «Пористые металлы в машиностроении» : монография, 2-е изд., перераб. и доп. Москва, 1981. 247 с.

176. Белов С.В., Витязь П.А., Шелег В.К. и др. «Пористые проницаемые материалы» : справочник. Москва, 1987. 332 с.

177. Биндер К. «Методы Монте-Карло в статистической физике». Москва. 1982. 400 с.

178. Богинский Л.С. «Теоретическое обоснование, разработка и внедрение новой технологии радиального прессования длинномерных пористых изделий из металлических порошков» : дис.докт. техн. наук. 05.16.06. Минск, 1988. 504с.

179. Борок Б.А. «<u>Гидростатическое прессование</u> металлических порошков». *Порошковая металлургия*. 1956. С.187-203.

180. Борок Б. А., Ольхов И. И. «Порошковая металургия» : уч. для вузов. Москва, 1948. 144 с.

181. Борок Б.А. и др. «Технология оборудования для гидростатического прессования». Москва 1959. 25с.

182. Варенова М. Г., Кузнецова Л. К., Малыгин Н. Д., Перевезенцев В. Н., Щербань М. Ю. «Фазовые превращения в керамике спекаемой под воздействием микроволнового излучения». *Физика и химия обработки материалов*. 1992. Т.2., №10. С.131-135.

183. Васильев В. Н., Гуров И. П., Потапов А. С. «Математические методы и алгоритмическое обеспечение анализа и распознавания изображений в информационно-телекоммуникационных системах» : монография. 2008. 46 с.

184. Ващенко В.В., Голубев О.Н., Светухин С.П., Цидулко А.Г. «Плакирование порошков тугоплавких соединений методом химического осаждения». *Температуроустойчивые функциональные покрытия*. 1985. С.131-134.

185. Витязь П.А., Капцевич В.М., Кусин Р.А. «Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления» : монография. Минск, 1999. 304 с.

186. Витязь П.А., Капцевич В.М., Шелег В.К. «Пористые порошковые материалы и изделия из них» : монография. Минск, 1987. 161 с.

187. Витязь П.А. «Теоретические и практических основы создания эффективных спеченных проницаемых материалов и их внедрение в народное хозяйство»: дисс.докт. техн. наук. 05.16.06. Минск. 1983. 508с.

188. Витязь П.А., Капцевич В.М., Косторнов А.Г. и др. «Формование структуры и свойств пористых порошковых материалов». Москва. 1993. 240 с.

189. Витязь П.А., Шелег В.К. Капцевич В.М. «Прогнозирование свойств спеченных проницаемых материалов с переменной по сечению пористостью бидисперсной глобулярной модели». Минск. 1980. Вып.4. С. 68-72.

190. Вишенков С.А. «Химические и электрохимические способы осаждения металлопокрытий» : монография. Москва, 1975. 312 с.

191. Владимиров В.С. Жаринов В.В. «Уравнения математической физики» : учебник для вузов. Москва. 2004. 400 с.

192. Гальчук Т.Н., Рудь В.Д. «Використання відходів машинобудівного виробництва для виготовлення деталей триботехнічного призначення» : монографія. Луцьк, 2013. 214 с.

193. Гальчук Тетяна Никифорівна «Вдосконалення технології виготовлення матеріалів триботехнічного призначення із відходів машинобудівного виробництва». дис. канд. техн. наук : 05.02.01. Луц. нац. техн. ун-т. 2011. 156 с.

194. Голубев В.И. «Исследование телевизионных методов обработки изображений в растровой электронной микроскопии»: Автореф. дис. канд.техн.наук. Москва. 1980. 20 с.

195. Григорьев А.К., Грохопольский Б.П. «Порошковая металлургия композиционных материалов»: монография. Москва. 1982. 97 с.

196. Грим Г. «Спектроскопия плазмы»: монография. Москва. 1969. 452 с.

197. Грим. Г. «Уширение спектральных линий в плазме»: монография. Москва. 1978. 491 с.

198. Гуляев К.В., Павлыш В.Н., Зензеров В.И. «Математические модели и моделирование». *Моделювання*. 2004. Т.З. С. 140-145.
199. Денбновецкий С. В., Барченко В. Т., Шмырева Л. Н. «Физические основы генерации плазмы в ионно-плазменных устройствах технологического назначения»: учеб. пос. Киев, 1989. 152 с.

200. Евстигнеев В.В., Лебедева О.А., Тубалов Н.П., Яковлев В.И. «Получение пористых изделий методом термосинтеза из промышленных отходов для решения экологических проблем». *Проблемы и перспективы развития литейного производства*. 1999. Вып. 1. С. 190-191.

201. Ермаков С.С. и др. «Порошковые материалы». Алма-Ата. 1981. 344с.

202. Заболотний О.В., Повстяной О.Ю., Рудь В.Д. «Розвиток процесів ізостатичного пресування ущільнювальних порошкових середовищ». *Наукові нотатки*. 2001. Випуск 9. С. 152-156.

203. Заболотний О.В. «Підвищення ефективності процесів пресування і використання пористих порошкових матеріалів»: дис.канд.техн.наук. 05.16.06. Київ, 2003. 170с.

204. Зверева И.А., Вольцифер В.А. «Компьютерное моделирование структуры дисперсних систем методом частиц». *ИФЖ*. 2001. Том 75, №1. С.15-21.

205. Зенкевич О. «Метод конечных элементов в технике»: учебник. Москва, 1975. 541 с.

206. Иващенко В.В., Голубев Г.Н. «О возможности изготовления изделий сложной формы методом вибрационного уплотнения порошковых материалов». *Порошковая металлургия*. 1965. № 12. С.13-16.

207. Избаш С.В. «Основы гидравлики»: монография. Москва, 1952. 455 с.

208. Імбірович Н.Ю, Клапків М.Д., Посувайло В.М., Повстяной О.Ю. «Властивості оксидокерамічних покриттів на магнієвих та титанових сплавах, синтезованих в електролітній плазмі». *Порошкова металургія*. 2015. № 1/2. С. 54-60.

209. Імбірович Н.Ю., М.Д. Клапків, О.Ю. Повстяной «Конверсійна оксидокераміка як ефективний спосіб захисту імплантів». *Международный конгресс "Global scientific unity 2014"*, (Прага, Чехия, 26-27 сентября 2014 года). Чехия, 2014. С.36-37.

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

211. Імбірович Наталія Юріївна «Розроблення оксидокерамічних покривів на цирконієвих та титанових сплавах плазмоелектролітною обробкою»: дис. канд. техн. наук: 05.02.01. Луцький держ. технічний ун-т. Луцьк, 2006. 125 с.

212. Кадушников Р. «Геометрическое моделирование структуры материалов». Порошковая металлургия. 1989. С.140.

213. Кадушников Р. М., Бекетов А. Р. «Геометрическое моделирование структуры полидисперсных материалов». *Порошковая металлургия*. 1989. №10. С. 69-74.

214. Калініна Н. Ю. «Ідентифікація мікроструктури металів і сплавів за допомогою інваріантних ознак їх RGB-зображень». *Системні технології*. 2011. Випуск 2 (73). С. 78-85.

215. Каменин И. Г. «Имитационное моделирование случайной неоднородной структуры порошков». *Порошковая металлургия*. 1997. С.302.

216. Карнаухов А. П. «Модели пористых сред»: монография. Москва, 1976. 320с.

217. Кипарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П. «Карбид титана, получение, свойства, применение» : монография. Москва, 1987. 216с.

218. Клапків М.Д. «Визначення фізико–хімічних параметрів процесу синтезу в електролітній плазмі оксидокерамічних покривів на алюмінієвих сплавах» : авт. дис. кандидата тех. наук. 05.02.01. Львів, 1996. 19 с.

219. Ключников Н.И., Триггер С.А. «К термодинамике системы заряженных частиц с сильным взаимодействием». *ЖТЭФ*. 1967. Т.52. №1. С. 276-281.

220. Кондрачук А.В., Шаповалов Г.Г., Картузов В.В. «Імітаційне моделювання випадкової неоднорідної структури порошків. Двомірна постановка задачі». *Порошковая металлургия*. 1997. № 1/2. С. 23-40.

221. Корній В.В. «Модель і алгоритм обробки кольорових металографічних 3D зображень». *Комп'ютинг (International Journal of Computing)*. 2008. Том 7. Випуск 1. С.164-170.

222. Косторнов А.Г. «Пористые проницаемые материалы: научные основы формирования структуры и свойств, опыт изготовления и эффективного применения». Порошковая металлургия. 1995. №11/12. С.24-42.

223. Косторнов А.Г., Клименко В.М., Биков Р.П., Докторов В.В., Кузнєчик О.О., Мороз А.Л., Пілінєвич Л.П. «Модельне дослідження електропровідності і процесу контактоутворення в пористих порошкових і волокнових матеріалах в результаті електроімпульсного спікання». *Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві.* 2012. №14. С.3-9.

224. Красовицкая Н.Ю. «Фильтр из прокатного пористого металла». Порошковая металлургия. 1979. № 9. С. 59-60.

225. Крючков Ю.Н. «Оценка структурного совершенства пористих материалов». Порошковая металлургия. 1996. С. 220-230.

226. Кудрин Л. П. «Статическая физика плазмы»: монография. Москва, 1974. 496 с.

227. Кужидловський К.К., Лобур М.М. «Інформаційно-розрахунковий метод для визначення характеристик композитних матеріалів». *Порошковая металлургия*. 2010. № 6. С. 23–30.

228. Кузьмов А.В., Максименко А.Л., Штерн М.Б. «Мультимасштабне моделювання спікання закріплених пористих тіл». *Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві*. 2009. №11. С. 80-88.

229. Кузьмов А.В., Штерн М.Б. «Влияние третьего инварианта на свойства и структуру определяющих соотношений порошковых материалов». *Порошковая металлургия.* 2003. №7-8. С.1-10.

230. Кузьмов А.В., Штерн М.Б., Фролова (Кіркова) О.Г. «Вплив зовнішніх обмежень та зусиль на неоднорідність пористої структури при спіканні біопористих заготовок». *Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві*. 2005. №7. С. 25-30.

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

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

233. Куцер М.Я., Роман О.В., Беляев В.И. «Получение стального порошка из отходов шарикоподшипникового производства». *Порошковая металлургия*. 1963. № 6. С. 88-93.

234. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Юхвид В.И., Боровинская И.П. «Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза»: монография. Москва, 1999. 176 с.

235. Либенсон Г.А. «Оборудование цехов порошковой металлургии». Москва. 1983. 264 с.

236. Линдли Крейг «Практическая обработка изображений на языке Си» : монография. Москва, 1996. 416с.

237. Мазюк В.В., Пилиневич Л.П., Рак А.Л., Савич В.В., Тумилович М.В. «Пористые порошковые материалы с анизотропной поровой структурой для фильтрации жидкостей и газов». Минск, 2005. 251с.

238. Марков Г.А., Миронова М.К., Потапова О.Г., Татарчук В.В. «Структура анодных оксидных пленок при микродуговом оксидировании алюминия». *Неорганические матариалы*. 1983. т. 19, №7. С. 1110 - 1113.

239. Матвійкова О.М., Штерн М.Б, Михайлов О.В. «Численное моделирование процес сов прессования порошкових изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы прессования на распределение плотности». *Порошковая металлургия.* 2002. № 11. С. 29-36.

240. Михайлов О.В. «Моделювання ущільнення біпористих порошкових виробів, що мають похілі до напрямку пресування поверхні». *Математичні* моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві. 2011. №13. С. 90-95.

241. Михайлов О.В., Штерн М.Б. «Модифицированные модели деформирования порошковых материалов на основе пластичных И труднодеформируемых порошков». Вісник наиіонального технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування. 2011. № 62. С. 13–19.

242. Модернізований реактор для проведення самопоширюючого високотемпературного синтезу: патент на корисну модель №105203: 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.

243. Мороз А.Л. «О некоторых свойствах проницаемых материалов из металлического порошка». *Порошковая металлургия*. 1978. № 4. С. 25-29.

244. Мороз А.Л. «О некоторых свойствах проницаемых материалов из металлического порошка». *Порошковая металлургия*. 1978. № 4. С. 25-29.

245. Нарва В.К., Лошкорева Н.С., Павлов С.А., Баташев К.В. «Получение и свойства порошковой стали ШХ15 из стружковых отходов». Порошковая металлургия. 1988. № 8. С. 20-23.

246. Никифорчин Г.М., Повстяна Н.Ю., Клапків М.Д., Посувайло В.М. «Корозійна тривкість цирконієвих та титанових сплавів і їх конверсійних оксидокерамічних покривів». *Наукові нотатки*. 2004. Випуск 15. С.227-232.

247. Новиков Н.Н. «Особенности поведения дисперсных материалов при их металлизации в вакууме». Рук. деп. Укр. НИИНТП от 12.09.87. 20 с.

248. Нурканов Е.Ю., Кадушников Р.М., Каменин И.Г., Алиевский Д.М., Карташов В.В. «Исследование плотностных характеристик трехмерных стохастических упаковок сферических частиц с использованием компьютерной модели». Порошковая металлургия. 2001. № 5/6.

249. Патрашев А.Н., Бакалов С.А. «Разработка методов расчета механической и химической суффозии»: техн.отчет, рукопис. Ленинград, 1951. 45с.

250. Патрашев А.Н. и др. «Прикладная гидромеханика» : монография. Москва, 1970, 688 с.

251. Перфильев Д.А. «Описание структуры и алгоритм анализа микроструктурныхметаллографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов»: дис. канд. техн. наук: 05.13.17, Красноярск, 2007. 124 с.

252. Петрова А.М., Штерн М.Б. «Вплив структури на міцність залізохромистого матеріалу». *Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства*. 2007. №16. С.105-108.

253. Петросянц А.А., Малышев В.Н., Федоров В.А., Марков Г.А. «Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования». *Трение и износ*.1984. №2. С. 350 – 354.

254. Пилиневич Л.П. «Разработка процесса получения порошковых проницаемых материалов методом вибрационного формования»: Дисс. канд. техн. наук. 16.05.06. Минск. 1988. 111 с.

255. Пименов А.Ф., Карелин Ф.Р., Иванов В.С. «Технология получения заготовок и изделий из отходов металлообработки». *Порошковая металлургия*. 1987. № 10. С. 31-34.

256. Повстяна Н. Ю. «Визначення параметрів процесу синтезу, товщини та твердості оксидокерамічних покриттів на Zr-євих сплавах». XVII відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізикомеханічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАНУ (8 – 10 жовтня 2003р.) Львів, 2003. С. 168-170.

257. Повстяной А.Ю., Рудь В.Д. «Применения имитационного моделирования для решения задач формирования структуры порошковых изделий». Порошковая металлургия: современное состояния и будущее: тезисы конференции (22-25 апреля 2014г.). Киев, 2014. С. 87-88.

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

259. 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 (8-30 мая 2014г.). Минск, 2014. С. 136-137.

260. Повстяной О.Ю., Заболотний О.В., Сомов Д.О., Сичук В.А. «Удосконалення обладнання для отримання виробів методом сухого радіальноізостатичного пресування ущільнювальних матеріалів». Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2006. №2/1 (20). С. 74-78.

261. 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 ІІІ-ої Міжнародної науково-технічної конференції ТК-2014 (28-30 тіравня 2014 року). Луцьк-Світязь, 2014. С. 54-56.

262. Повстяной О.Ю, Рудь В.Д., Самчук Л.М., Зубовецька Н.Т. «Виготовлення поруватих проникливих матеріалів за рахунок енергозберігаючої технології». *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2016. Том 51. №6. С. 87-92.

263. Повстяной О.Ю. «Автоматизація проектування установок для сухого радіально-ізостатичного пресування на основі параметризації». *Наукові нотатки*. 2006. Випуск 18. С. 56-65.

264. Повстяной О.Ю. «Визначення економічності роботи пористих проникливих матеріалів». *Наукові нотатки*. 2002. Випуск 10. С. 167-170.

265. Повстяной О. Ю. «Застосування CALS-технології для комплексного виготовлення корпусів водолічильників з використанням програмного комплексу DELCAM». Прогресивні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць ІІ-Всеукраїнської науково-технічної конференції (10-15 лютого 2014р.). Львів, 2014. С.51-52.

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

267. Повстяной О.Ю. «Моделювання процесів створення пористих порошкових матеріалів на основі відходів промислового виробництва з використанням комп'ютерно-інформаційних технологій». *Технічні вісті*. *Науковий часопис*. 2018. 1(47), 2(48). С. 50-53. – ISNN1992-8149 (Print).

268. 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 (10-12 травня 2018 року). Чернігів, 2018. С. 18-20.

269. Повстяной О.Ю. «Ресурсозберігаючі технології в машинобудуванні». *Машинознавство*. 2008. Випуск 6. С.245-253.

270. Повстяной О.Ю. «Удосконалення технології виготовлення пористих проникливих матеріалів з використанням відходів промислового виробництва»: дис. канд. техн. наук: 05.02.01; Луцький держ. технічний ун-т. Луцьк, 2007. 156 с.

271. Повстяной О.Ю., Богінський Л.С. «Оптимізація форми для виготовлення пористих проникливих матеріалів». *Наукові нотатки*. 2011. Випуск 31. С. 258-264.

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

273. Повстяной О.Ю., Заболотний О.В., Чміль І.І. «Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі за допомогою прикладних програм». *Наукові нотатки*. 2004. Випуск 15. С. 244-251.

274. Повстяной О.Ю., Імбірович Н.Ю. «Дослідження процесу нанесення захисного покриття на деталях конструкційного призначення з відходів промислового виробництва». Вісник Українського матеріалознавчого товариства. 2015. №8. С. 9-18.

275. Повстяной О.Ю., Кузьмов А.В. «Моделювання пористої структури в багатошарових фільтруючих порошкових матеріалах». *Proceedings of the III*

International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions. 2016. №10 (14). Vol.1. P. 5-9.

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

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

278. Повстяной О. Ю., Полінкевич Р. М., Сомов Д. О. «Розрахунок статичного навантаження для пористих проникних матеріалів з використанням ABAQUS». Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції (24-27 квітня 2017р.). Чернігів, 2017. С. 137-138.

279. 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 IX Міжнародної науково-технічної конференції (3-7 лютого 2020 р.).* Львів-Карпати, 2020. С. 45-47.

280. Повстяной О.Ю., Рудь В.Д. «Визначення розподілу густини пористого проникного циліндра за радіусом при радіально-ізостатичному пресуванні». *Наукові нотатки*. 2016. Випуск 54. С. 246-252.

281. Повстяной О.Ю., Рудь В.Д. «Застосування комп'ютерноінформаційних технологій в сучасному матеріалознавстві». Матеріали для роботи в екстремальних умовах: матеріали V Міжнародної наукової конференції (3-5 грудня 2015 року). Київ, 2015. С. 273-277.

282. Повстяной О. Ю., Рудь В. Д. «Особливості розподілу густини за радіусом при радіально-ізостатичному пресуванні порошків». *Порошкова металургія.* 2017. № 7/8. С. 134-142.

283. Повстяной О.Ю., Рудь В.Д., Заболотний О.В. «Дослідження структури та визначення пористості фільтруючих матеріалів отриманих із порошку сталі ШХ15». *Наукові нотатки*. 2003. Випуск 13. С.249-254.

284. Повстяной О.Ю., Рудь В.Д., Імбірович Н.Ю. «Комп'ютерноінформаційні технології в сучасному матеріалознавстві»: монографія. Луцьк, 2019. 225 с.

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

286. Повстяной О.Ю., Сичук В.А., Макмиллан А., Рудь В.Д., Заболотний О. В. «Металографічний аналіз та обробка зображень мікроструктури сопел для піскоструменевої обробки, які виготовлені методами порошкової металургії». *Порошкова металургія.* 2015. № 3/4. С. 234-240.

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

288. 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 науковотехнічної конференції (13-15 травня 2019). Вінниця, 2019. С. 201-203.

289. Похмурський В.І., Студент М.М., Довгуник В.М., Клапків М.Д., Шмирко В. В., Киця А.Р., Базиляк Л. I. «Трибологічні властивості комбінованих метало- оксидокерамічних шарів на легких сплавах». *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2012. № 2. С. 55 – 64.

290. Похмурський В.І., Студент М.М., Довгуник В.М., Похмурська Г.В., Сидорак І.Й. «Електродугові відновні та захисні покриття»: препринт; Львів, 2005. 8 с. 291. Пристрій для сухого радіально-ізостатичного пресування порошкових матеріалів: патент України № 52227: заявник та правовласник Луцький НТУ; (2002). МПК 7 В22F3/04. Заявл. 20.03.2002; Опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12.

292. Пристрій для сухого радіально-ізостатичного пресування порошкових матеріалів на матрицю: патент України № 63675: заявник та правовласник Луцький НТУ; А МПК 7 В22F3/04. (2004). Заявл.28.05.03; опубл. 15.01.04. Бюл.№1.

293. Пристрій для сухого радіально-ізостатичного пресування порошкових матеріалів: патент України № 63676.: заявник та правовласник Луцький НТУ; А МПК 7 В22F3/04. (2004). Заявл.28.05.03; опубл. 15.01.04. Бюл.№1.

294. Путятин Е. П., Аверин С.И. «Обработка изображений в робототехнике»: монография. Москва, 1990. 320с.

295. Реактор для проведення самопоширюючого високотемпературного синтезу (СВС-процесу): патент на корисну модель №91287: заявник та правовласник Луцький НТУ; заявл. 11.02.2014; опубл. 25.06.14, Бюл. №12.

296. Ревенчук І.А. «Математичні моделі геометричних перетворювань при візуалізації 3D об'єктів». Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. 2013. № 11. С. 54-58.

297. Реут О.П., Богинский Л.С., Петюшик Е.Е. «Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов»: монография. Минск, 1998. 258с.

298. Реут О.П., Богинский Л.С., Саранцев В. В, Повстяной А. Ю. «Разработка новых энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования для получения керамических материалов и изделий на их основе». Огнеупоры и техническая керамика. 2006. № 4. С.26-34.

299. Роман О.В. «Импульсное прессование металлических порошков» : автореф. дисс.докт. техн. наук. Минск, 1971. 36 с.

300. Романюк О.Н. «Прискорене визначення дифузної складової кольору при зафарбовуванні тривимірних графічних фігур». Оптико- електронні інформаційно-енергетичні технології. 2006. № 2 (12). С. 71-76. 301. Руденская Н.А. «Новые плазменные покрытия многофункционального назначения и их самоорганизация». *Защита металлов*. 2004. т.40. № 2. С. 173–177.

302. Руднев В.С. Васильева М.С., Лукиянчук И.В., Кудрявый В.Г. «О строении поверхности покрытий, формируемых анодно-искровым методом». *Защ. металлов.* 2004. Т. 40. №4. С. 393- 399.

303. Руднев В.С., Лукиянчук И. В., Богута Д. Л., Коньшин В.В., Руднев А.С., Гордиенко П.С. «Анодно-искровые слои на сплавах Аl и Ti из фосфатнованадатного электролита, содержащего вольфрамат». *Защ. металлов.* 2002. Т. 38, №2. С. 220-223.

304. Рудь В.Д., Гальчук Т.Н., Повстяной А.Ю. «Использование отходов подшипникового производства в порошковой металлургии». Порошковая металлургия. 2005. № 1-2. С.106-112.

305. Рудь В.Д. «Имитационная модель засыпки частиц порошков и ее использование при разработке технологии приготовления шихты карбидосталей». *Моделирование в материаловедении*. 2006. №1/2. С.320-330.

306. Рудь В.Д. «К диаграмме деформирования пористых сред». Исследования по механике деформируемых сред. 1979. Вып. 2. С. 24-29.

307. Рудь В.Д., Баглюк Г.А., Гальчук Т.Н., Повстяной О.Ю. «Технологічні процеси утилізації відходів машинобудівного виробництва» : навчальний посібник. Луцьк, 2014. 300 с.

308. Рудь В.Д., Мартыненко М. Г. «Напряженно-деформированое состояние толстостенной трубы из пористого металла». Исследования по механике деформируемых сред. 1987. Вып. 7. С. 13-19.

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

310. Рудь В.Д., Повстяной О.Ю., Клепач Л.М. «Використання методу самопоширюваного високотемпературного синтезу для отримання фільтрувальних матеріалів». *Збірник наукових праць*. 2006. Випуск 18. С. 202-206.

311. 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 (29-30 октября 2014 года).* Брест, 2014. С. 97-99.

312. 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. Київ, 2014. С.77-81.

313. Русин Б.П., Іванюк В.Г., Лау Г., Довгуник В.М., Корній В.В. «Комп'ютерна кількісна оцінка фазового складу матеріалу за кольоровим металографічним зображенням». *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2004. №5. С.77-80.

314. Русин Б.П., Іванюк В.Г., Іванюк Д.В. «Завадостійкий алгоритм з сферично-орієнтованою селекцією компонентів кольорового зображення». *Радіоелектроніка і інформатика*. 2005. № 2. С.101-106.

315. Русин Б. П., Іванюк В. Г., Корній В. В. «Частотно-кольорова селекція тріщин металографічного зображення». *Радіоелектроніка і інформатика*. 2006. № 1. С. 96-101.

316. Савуляк В.І., Березюк О.В. «Технічне забезпечення збирання перевезення та підготовки твердих побутових відходів»: монографія Вінниця, 2006. 468 с.

317. Самарский А.А. «Математическое моделирование. Методы. Примеры»: монография, 2005. 320 с.

318. Самчук Л.М. Технологія самопоширюваного високотемпературного синтезу системи Ті-С-ШХ15 з використанням відходів металообробки»: дис. канд. техн. наук: 05.02.01.; Луцький нац. техн. ун-т. Луцьк, 2012. 150 с.

319. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №57034. Комп'ютерна програма «Статистичний метод дослідження точності обробки з побудовою кривих розподілу» / Рудь В.Д., Повстяной О.Ю, Редько Р.Г., Кукицяк О.І. Дата реєстрації 17.10.2014 р. 320. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №64608. Комп'ютерна програма «Перетворення растрових зображень у векторний формат» / Редько Р.Г., Повстяной О.Ю., Редько О.І, Полінкевич Р.М. Дата реєстрації 23.03.2016 р.

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

322. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №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.

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

324. Семенова Т.В., Шилько С.В., Ковтун В.А. «Мезомеханический анализ гранулированных материалов при контактном нагружении». *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2001. № 2. С. 189 – 205.

325. Силаев А.Ф., Данилова О.П., Громова О.П. «Материалы с капиллярными структурами для фильтрации жидкостей и газов». *Порошковая металлургия*. 1978. № 9. С. 45-49.

326. Система інваріантних ознак просторових форм кольорових зображень / Н.Ю. Калініна. Праці Таврійського держ. агротехнологічного університету. 2011. Вип. 4, т. 50. С.199-204.

327. Скороход, В.В., Солонин С. М. «Физико-металлургические основы спекания порошков». Москва, 1984. 154 с.

328. Смирнов Б.М. «Введение в физику плазмы»: монография. Москва, 1975. 220с.

329. Сомов Дмитро Олександрович «Вібраційний модуль на оболонках високого тиску для пресування порошкових матеріалів»: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.05. Вінниця. 2004. 18 с.

330. Спосіб отримання металевого порошку з шламових відходів підшипникового виробництва: патент України № 63558 А.: заявник та правовласник Луцький НТУ; (2004). МПК 7 В22F9/04. Заявл.06.05.03; опубл. 15.01.04. Бюл.№1.

331. Спосіб отримання фільтрів: патент України на винахід № 76002 С2: заявник та правовласник Луцький НТУ; МПК (2006) В01D 39/00. Заявл.16.06.04; опубл. 15.06.06. Бюл.№6, 2006 р.

332. Спосіб отримання фільтруючого матеріалу: патент на корисну модель 100743: заявник та правовласник Луцький НТУ; МПК (2015.01) В22F 9/00, В01D 39/00, заявл. 16.02.2015; опубл. 10.08.15, Бюл. №15.

333. Способ прессования порошков с регулируемой степенью уплотнения: пат. 5429284 Япония: МКИ B22F3/12. Опубл.1979.

334. Способ уплотнения анодных покрытий на алюмии и его сплавах: патент RU № 2073752, Зарег. 20.02.97 (6 С 25 D 11/18).

335. Стась О.М., Гаврилюк В.П. «Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі». *Методи дослідження та контролю якості металів*. 2000. №1-2. С.48-52.

336. Студент М. М., Гвоздецький В. М., Калахан О. С., Посувайло В. М., Шмирко В. В., Сірак Я. Я. «Порівняльні характеристики зносостійкості оксидних та нітридних покриттів». *Проблеми трибології*. 2015. №3. С. 54 – 59.

337. Студент М.М., Клапків М.Д., Шмирко В.В., Головчук М.Я., Остап'юк С.А., Посувайло В.М., Ступницький Т.Р. «Корозійна тривкість і зносостійкість комбінованих метало-оксидних електродугових покриттів». *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2010. Спецвип. №8. Т.1. С. 232 – 237.

338. Тырина Л.М., Руднев В.С., Абозина Е.А., Яровая Т.П., Богута Д.Л., Панин Е.С., Гордиенко П.С. «Формирование на титане и алюминии анодных слоев с марганцем, манием и фосфором». *Защ. металлов.* 2001. т. 37. №4. С. 366 – 369.

339. Устинов В.С., Олесов О.Г. «Порошковая металлургия титана». Москва. 1973. – 167с. 340. Устройство для прессования изделий из порошков: патент Республики Беларусь № 1122U, МПК В 22F 3/00. 2003.

341. Устройство для прессования изделий из порошков: патент Республики Беларусь № 2252 U., МПК В22F3/00. (2006). Заявл.26.10.2005; опубл. 30.04.2006.

342. Устройство для прессования изделий из порошков: патент Республики Беларусь № 2252U., МПК В 22F 3/00. 2005.

343. Федоров В. А., Белозеров В. В., Великосельская Н. Д., Булычев С. И. «Состав и структура упрочненного поверхностного слоя на сплавах алюминия, получаэмого при микродуговом оксидировании». *Физика и химия обработки материалов*. 1988. №88. С. 92-97.

344. Федорченко И.М., Францевич И.Н., Радомысельский И.Д. и др. «Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения»: справочник. Киев, 1985. 624 с.

345. Федорченко И.М., Филатова Н.А. «Фильтрующие свойства высокопористых материалов, изготовленных из железного порошка с несферической формой частиц». *Порошковая металлургия*. 1962. № 3. С. 49-54.

346. Филоненко Б.А. «Комплексные диффузионные покрытия»: монография. Москва, 1981. 137с.

347. Филькенбург В. «Электрические дуги и термическая» : монография. Москва, 1961. 370 с.

348. Фільтр: патент України № 4623 U: заявник та правовласник Луцький НТУ; (2005). МПК 7 В01D35/02. Заявл.01.07.04; опубл. 17.01.05. Бюл.№1.

349. Хороших В. М. «Стационарная вакуумная дуга в технологических системах для обработки поверхностей». *Физическая инженерия поверхностии*. 2003. № 1. С. 19-26.

350. Чубов А.А. «Автоматизация металлографического анализа и контроля сплавов с использованием методов цифровой обработки оптических изображений микроструктур»: дис. канд. техн. наук: 05.13.06, Москва, 2007. 359 с.

351. Шаронов Е.А., Ванновский В. В., Алексеев С.В. «Вакуумно-дуговое напыление меди на порошок керамики SiO2-FeOn». *Тр. 6-й Междунар. конф.* "Пленки и покрытия — 2001". Санкт-Петербург. 2001. С. 146-149.

352. Шелег В.К., Рак А.Л., Пилиневич Л.П., Тумилович М.В. «Получение пористых порошковых материалов методом поэтапного прессования». *Порошковая металлургия*. Гомель.1996. Вып. 19. С.51-53.

353. Шибряев Б.Ф. «Пористые проницаемые порошковые материалы» : монография. Москва, 1982. 168 с.

354. Штерн М.Б. «К теории пластичности пористых тел и уплотняемых порошков». *Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов*. 1986. С. 12-23.

355. Штерн М.Б. «Модель процессов деформирования сжимаемых материалов с учетом порообразования. І. Определяющие уравнения и поверхность нагружения». *Порошковая металлургия*. 1989. № 5. С. 28-34.

356. Штерн М.Б. «Модель процессов деформирования сжимаемых материалов с учетом порообразования. II. Одноосное растяжение и сжатие». *Порошковая металлургия.* 1989. № 6. С. 34-39.

357. Штерн М.Б. «Определяющие уравнения для уплотнения пластических пористых тел». Порошковая металлургия. 1981. № 4. С. 17-23.

358. Штерн М.Б. «Про залежність густина–тиск та розподілі густини при пресуванні порошків». *Порошкова металургія*. 2014. №03/04. С.19-29.

359. Штерн М.Б. «Развитие теории пластичности пористых тел». Порошковая металлургия. № 9. 1992. С. 19-29.

360. Штерн М.Б., Дудунов В.Д. «Определение ресурса пластичности порошковых материалов на основе модели пластического течения пористых тел. І. Критерий исчерпания ресурса пластичности». *Порошковая металлургия*. 1999. №11/12. С. 31-40.

361. Штерн М.Б., Михайлов О.В. «Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы прессования на распределение плотности». *Порошковая металлургия*. 2002. № 11/12. С. 29-36.

ДОДАТКИ

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ОСНОВНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

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

4. *Povstyanoi O.*, Sychuk V., McMillan A., Rud V., Zabolotnyi O. «Metallografic Analysis and Microstructural Image Processing of Nozzles for Sandblasting Produced by Powder Metallurgy Methods». *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 приграм. 5. *O. Yu. Povstyanoi*, V. D. Rud, L. M. Samchuk, N. T. Zubovets'ka «Production of Porous Materials with the Use of Energy-Saving Technologies». *Materials Science* (Сполучені Штати Америки, режим доступу: <u>https://doi.org/10.1007/s11003-016-9912-6</u>). 2016. V.51. P.847-853.

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

t

h

е Здобувачем запропоновано новий підхід комп'ютерно-інформаційного забезепечення для дослідження властивостей деталей контрукційного **п**ризначення.

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

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

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

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

9. *Повстяной А. Ю.*, Рудь В. Д. «Эколого-экономическая эффективность использования отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения» «Устойчивое развитие». (Болгарія). й014. №19. С. 89-94.

S

t

308

Особистий внесок дисертанта – розрахунок економічної ефективності викоритсання відходів промисловог овиробництва (порошку сталі ШХ15) для виготовлення фільтрів.

10. *Povstyanoy O.*, Kuts Yu. «Review of the current software for computer based r

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

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

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

12. Повстяной О. Ю. «Застосування CALS-технології для комплексного i виготовлення корпусів водолічильників 3 використанням програмного Вісник DELCAM». національного університету «Львівська комплексу політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у иашинобудуванні та приладобудуванні», 2013. №772. С. 148-153.

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

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

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

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

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

0

f

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

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

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

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

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

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

18. *Oleksandr Povstyanoy*, Nataliia Imbirovuch, Yuliia Kuts «Peculiarities of protective coating of constructional details with powder obtained from industrial wastes». *Metallurgical and mining industry*. 2016. Nº4. P. 88-96.

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

19. **Повстяной О.Ю.** «Комп'ютерно-інформаційні технології прогнозування та моделювання властивостей матеріалів конструкційного призначення». 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. *Повстяной О.Ю.*, Дороговцев А.А. «Модельні дослідження формування засипки порошків з урахуванням властивості матеріалу на базі моделей випадкової упаковки (двомірний випадок)». *Наукові нотатки*. 2018. Випуск 63. С. 183-188.

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

21. **Повстяной О.Ю.**, Михайлов А.О., Рудь В.Д., Михайлов О.В. «Моделювання ущільнення порошкового фільтруючого елемента складної форми при радіальноізостатичному пресуванні». *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. Імбірович Н.Ю., Посувайло В.М., Шимчук С.П., *Повстяной О.Ю.*, Остап'юк С.І. «Трибологічна характеристика плазмоелектролітно-оксидованих покриттів на сплавах ASTM B265 та 2024». *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 состояния 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 методику 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.* Плазмоэлектролитное 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.

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. Імбірович Н.Ю., Клапків М.Д., *Повстяной О.Ю.* Конверсійна оксидокераміка як ефективний спосіб захисту імплантів. *Global scientific unity* 2014: материаллы Международного конгресса (Прага, 26-27 сентября 2014 года). Прага, 2014. С. 36-37 (заочна участь).

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

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: <u>http://www.emrs-</u>

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 подрібненян порошків сталі ШХ15.

31. В.В. Шыберко, В.Д. Рудь, *А.Ю. Повстяной* Прогнозирование структурных характеристик порошковых материалов с помощью 3D моделирования. Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные матерыиалы, 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'ютерноінформаційних технологій при вивчені 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: <u>http://www.european-mrs.com/advanced-composite-materials-production-testing-applications-emrs</u> (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. Р. 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 f

0

г Здобувачем було проведено комп'ютерне моделювання формування структури ППМ.

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

n Автором розроблені теоретичні аспекти прогнозування формування дтруктури 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

f

використанням програмного забезпечення САЕ. *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 Povstyanoy*, 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 Povstyanoy*, 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 Povstyanoy*, 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 IX 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 Povstyanoy*, 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. Реактор для проведення самопоширюючого високотемпературного синтезу (СВС-процесу): пат. на корисну модель №91287: заявник та правовласник Луцький НТУ; заявл. 11.02.2014; опубл. 25.06.14, Бюл. №12.

45. Спосіб отримання фільтруючого матеріалу : пат. на корисну модель 100743 : заявник та правовласник Луцький НТУ; МПК (2015.01) В22F 9/00, В01D 39/00, заявл. 16.02.2015; опубл. 10.08.15, Бюл. №15.

46. Модернізований реактор для проведення самопоширюючого високотемпературного синтезу: пат. на корисну модель №105203: 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 напилення захисних середовищ на деталь / Куц Ю.В., *Повстяной О.Ю.* Дата реєстрації 29.03.2017 р.

Соглашение о сотрудиичестве по созданию совместного центра для инновании и индустриализации между Национальной академией наук Украины и Институтом новых материалов Цзу Хан провнации Гуандун

Guangdong Juhang Institute For Advanced Materials Co., LTD (далее Сторона А) является общественной плитформой технологической инновании и обслуживания для промышиенных предприятий в области конструкционных материалов с повышенными свойствами и новой исследовятельской организацией, включам в себя исследование, производство, обслуживание, капитал и рынок.

RESTORATION OF DETAILS OF CONSTRUCTION PURPOSE POWDERS RECEIVED FROM INDUSTRIAL WASTE MANUFACTURING

Special attention is paid to the construction of new parts of structural design for composite ceramic, metalloceramic, biometallic and other synthetic compositions. Methods and technological processes of powder metallurgy allow us to widely use waste products: shavings, scrap metal, pruning, which after the melt are sprayed into a powder with given physico-chemical and technological properties.

Recovery of products of mechanical engineering and instrumentation: knots, machine parts, mechanisms, namely:

- Improvement of physical-mechanical and technological properties of steel powders BBS15 due to introduction of new technology.
- Increased wear resistance of parts for design purposes.
- Protection against corrosion in aggressive environments.
- Application of rational technology of applying protective coatings.

In order to solve the problem of deterioration of parts, it is important to apply a combined protective coating, which will significantly increase the wear and corrosion resistance of the parts under reverse friction.

Analogues on the global recovery market are expensive and ineffective - 50-70%. The efficiency of using our technology is 120%.

The state of readiness of development - 100% - there is a recovery technology and a batch of prototypes manufactured.

Groungdong Juhang Institute For Advanced Materials Co., LTD

Луцкий национальный технический университет, Украина

Прецеталитель: Дзу Хі Йонг

Honne 24 pm to

Представитель Повстяной А.

Подпись

Anna: 19.08.2019

Дата: 02.09.2019

宁波岛中远景新材料科技有限公司 NINGBO FUTECCOLUTE.

and the 2 Dargeon North Read Terran Street Months Norther 1999 (1994) (1994) Terran 1992 - Karl Street Angel Storage and Hilly reveals false content

> Национальной Академии Наук Украины (НАН Украины)

Данным письмом подтверждается, что на производственной базе компании Ningbo FUTEC Co., Ltd (г.Нинбо, КНР) была изготовлена опытная партия многослойных пористых проницаемых материалов из порошка стали ШХ15, которые разработанные в Луцком национальном техническом университете доц. Александром Повстяной и проф. Виктор Рудь.

Пористые проницаемые материалы, полученные по технологии радиально-изостатического пресования, включает в себя поэтапное напрессование каждого следующего слоя.

Испытания были получены на испытательном стенде School of Materials Science and Engineering Университета г. Нанчань.

Как показали результаты исследований, данные материалы имеют коэффициент проницаемости в 3, а ресурс и грязеемкость в 1,5 раза выше по сравнению с существующими однослойными фильтрующими материалами, при этом масса фильтра на 20% меньше.

Эффективность нового фильтрующего ППМ по сравнению с аналогичными традиционными ППМ составила 82%.

На основании результатов испытаний предложенная технология принята для использования в производственном процессе компании Ningbo FUTEC Co., Ltd. для очистки технической воды от механических загрязнителей.

Генеральный Директор

ЗАТВЕРДЖУЮ Керівник Луцького МПД ДП«Укренирт» Д.М. Шмаров 2019 p.

АКТ

впроваджения результатів науково-технічних розробок Луцького НТУ та Національного університету харчових технологій

Ми, які нижче підписалися, заступник керівника з технічних питань Луцького МПД ДП «Укрспирт» П.С. Денисевич, старший механік Луцького МПД ДП «Укрспирт» В.А Горпинюк, д.т.н., професор Луцького НТУ В.Д. Рудь, завідувач кафедри прикладної механіки Луцького НТУ доцент Д.О. Сомов, доцент кафедри прикладної механіки Луцького НТУ О.Ю. Повстяной, аспірант кафедри машинобудування, стандартизації та сертифікації обладнання Національного університету харчових технологій (НУХТ, м.Київ) А.О. Михайлов склали акт про впровадження результатів науково-технічних розробок на Луцькому МПД ДП «Укрспирт».

Предметом впровадження с:

- одношарові фільтруючі матеріали на основі порошку сталі ШХ15 (-0,315+0,200 мм);
- двошарові фільтруючі матеріали на основі порошку сталі ШХ15 перший шар (-0,315+0,0200 мм), другий шар (-0,160+0,100 мм);
- тришарові фільтруючі матеріали на основі порошку сталі ШХ15 перший шар (-0,315+0,0200 мм), другий шар (-0,160+0,100 мм); третій шар (-0,100+0,050 мм).

Фільтруючі матеріали використовувалися для очищення технічної води від механічних забруднень у апаратах для очищення технічної води (відходів спиртогорілчаного виробництва) від різноманітних можливих механічних включень.

Встановлено, що використания одношарових фільтруючих матеріалів із порошку сталі ШХ15, які отримані методом радіально-ізостатичного пресувания, підвищує рівномірність поророзподілу фільтруючих матеріалів на 20-30% і збільшує проникливість на 15-20% у порівнянні з апалогічними традиційними фільтруючими матеріалами. Використання двошарових та тришарових фільтруючих матеріалів із порошку сталі ШХ15 показало ефективність порівняно з одношаровими фільтруючими матеріалами, яка складає 52%. Економічний ефект від впровадження одношарових, дво- та тришарових фільтруючих матеріалів на основі порошку ШХ15 для очищення технічної води (відходів спиртогорілчаного виробництва) від різноманітних можливих механічних включень склав 34800 грн.

Заступник керівника з технічних питань Луцького МПД ДП «Укрепирт»

Старший механік Луцького МПД ДП «Укрепирт»

Науковий консультант, д.т.н., професор

Завідувач кафедри прикладної механіки Луцького НТУ к.т.н., доцент

Доцент кафедри прикладної механіки Луцького НТУ к.т.н.

Аспірант кафедри машинобудування, стандартизації та сертифікації обладнання НУХТ

О.Ю. Повстяной

А.О. Михайлов

П.С. Денисевич

В.А. Горпинюк

В.Д. Рудь

Д.О. Сомов



"Комп'ютерно-інформаційні технології прогнозування властивостей матеріалів конструкційного призначення" в умовах ТОВ "ВОГ ТРЕЙД"

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ "ВОГ ТРЕЙД" у складі: начальник технологічного управління Лук'янюк О.Д., начальник центральної заводської лабораторії Максимов С.В., і представники Луцького НТУ: д.т.н., професор кафедри прикладної механіки Рудь В.Д., к.т.н., доцент, декан технологічного факультету Заболотний О.В., к.т.н., доцент кафедри прикладної механіки Повстяной О.Ю. склали акт про результати виробничих випробувань.

Предметом випробувань були фільтруючі пористі проникливі матеріали (ППМ) з порошку сталі ШХ15 та пороутовювача у вигляді труб О40? 220 мм. Фільтруючі тришарові ППМ виготовлені методом пошарового сухого радіально-ізостатичного пресування на оправку з наступним спіканням у режимі СВС та піддавалися хромоалітуванню. Перший шар (груба очистка) – суміш порошку сталі ШХ15 та пороутворювача порошку карбаміду CO(NH₂)₂ (-0,315+0,200 мм), другий шар (нормальна очистка) – суміш порошку сталі ШХ15 та пороутворювача порошку карбаміду CO(NH₂)₂ (-0,200+0,160 мм), третій шар (тонка очистка) – суміш порошку сталі ШХ15 та пороутворювача порошку карбаміду CO(NH₂)₂ (-0,160+0,100 мм). Фільтруючі елементи використовувалися для очищення змащувально-охолоджувальних рідин (ЗОР) типу "Унізор" та NiNaO₃, а також масла, керосину.

Випробування показали, що запропоновані тришарові фільтруючі ППМ володіють високою хімічною стійкістю та необхідною механічною міцністю, забезпечують можливість регенерації, мають рівномірний розподіл пор по всій поверхні фільтрації, підвищують брудоємність та проникливість матеріалу, в результаті чого 1,5-2,0 рази тривалість експлуатації фільтрів. Використання тришарових фільтруючих ППМ дозволило зменшити річний об'єм утилізуємої ЗОР на 1750 кг, а масла в 3 рази. Це підтверджує доцільність використання даної технології при виробництві фільтруючих ППМ. Річний економічний ефект склав 56500 грн.

Від ТОВ "ВОГ ТРЕЙД"

Лук'янюк О.Д. С. Л

Максимов С.В.

Від Луцького НТУ

л.т.н., професор Рудь В.Д. к.т.н., доцент Заболотний О.В. к.т.н., доцент Повстяной О.Ю.