

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МИХАЙЛОВ АНАТОЛІЙ ОЛЕГОВИЧ

УДК 664: 621.81; 621.762.4.043; 66.067.124; 001.891.572

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОЕКТУВАННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ
ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ
ВИРОБНИЦТВ**

Спеціальність 133 - Галузеве машинобудування
Галузь знань 13 - Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ А. О. Михайлов

Науковий керівник

Штефан Євгеній Васильович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Михайлов А.О. "Розроблення методів проектування ресурсозберігаючих технологій виготовлення деталей обладнання харчових виробництв" - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 "Галузеве машинобудування" - Національний університет харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена розробленню методів дослідження закономірностей процесів формоутворення деталей обладнання харчових виробництв з порошкових та пористих матеріалів. Метою роботи є наукове обґрунтування ресурсозберігаючих технологій виготовлення конструктивних елементів обладнання харчових виробництв з використанням методів математичного моделювання процесів деформування дисперсних матеріалів.

У першому розділі роботи була проведена класифікація деталей машин і апаратів харчових виробництв, встановлені умови та особливості їх експлуатації. На основі проведеної класифікації з врахуванням критеріїв обмеженості ресурсу елементів обладнання запропоновано ряд типових деталей машин і апаратів харчової промисловості, що доцільно отримувати методами порошкової металургії.

Встановлено, що:

- при моделюванні процесів деформування порошкових і пористих середовищ існує два підходи - дискретний і континуальний;
- основним підходом є континуальний підхід;
- моделі пластичної течії порошкових і пористих матеріалів відрізняються і відображають той факт, що пористі матеріали чинять опір навантаженням розтягування, а порошки - ні;
- найбільш поширеним методом моделювання при вирішенні задач деформування порошкових і пористих матеріалів є метод скінчених елементів, який реалізований у багатьох універсальних програмних системах;

- в сучасні програми імплементовані різні моделі пластичної течії окремо для порошкових і пористих матеріалів;

- практичне застосування існуючих програмних систем обмежується тим, що ці моделі реалізовані не разом.

В результаті був зроблений висновок, що задача проведення наукового обґрунтування методів проектування ресурсозберігаючих технологій виготовлення деталей обладнання харчових виробництв є актуальною.

У другому розділі розроблена математична модель процесів формоутворення структурно-неоднорідних пористих матеріалів. Проведено наукове обґрунтування вибору моделі пластичного деформування порошкових матеріалів. На основі узагальненої моделі пластичного деформування порошкових і пористих матеріалів та методу скінчених елементів розроблено методику визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів ресурсозберігаючих технологій виготовлення деталей обладнання харчових виробництв. Порівняння результатів обчислень з результатами, отриманими іншими авторами, підтвердило адекватність розробленої методики моделювання.

У третьому розділі проведені дослідження процесів одержання деталей конструкційного призначення машин і апаратів харчових виробництв з пористих спечених заготовок. Розглянуті процеси отримання втулок циліндричної форми методом штампування, штампування деталей, що мають внутрішню конусоподібну поверхню та процеси отримання втулок із внутрішнім фланцем методом радіального видавлювання.

Встановлено, що:

- наявність радіальної течії при штампуванні виробів типу "втулка" призводить до підвищення рівня накопичених пластичних деформацій матеріалу;

- при штампуванні біметалевих заготовок, що мають внутрішню конусоподібну поверхню, уникнути явища видавлювання менш міцного шару з під більш міцного можна за рахунок відмінності початкових пористостей шарів;

- на заключному етапі радіального видавлювання втулки із внутрішнім фланцем розподіл щільності за об'ємом виробу вирівнюється, при цьому розподіл величини накопиченої пластичної деформації істотно нерівномірний;

- при зворотному видавлюванні наявність недосконалих контактів у матеріалі пористих заготовок призводить до появи зон розуцільнення порошкового матеріалу та зменшення величини накопиченої пластичної деформації в цих зонах.

Моделювання процесів одержання фільтруючих елементів для технологічного обладнання спиртового виробництва проведено в четвертому розділі. Розглянуті процеси пресування фільтруючих елементів циліндричної форми та фільтруючих елементів складної форми у вигляді колби. Встановлено, що:

- розподіл величини пористості при радіально-ізостатичному пресуванні порошкового фільтруючого елемента циліндричної форми нерівномірний, зі збільшенням радіуса величина пористості зростає;

- при виготовленні багат шарових фільтруючих елементів доцільно застосовувати схему ущільнення на оправку, а не на матрицю;

- величина пористості при пресуванні порошкових фільтрів у вигляді колби розподілена за об'ємом виробу нерівномірно, її розподіл залежить від схеми ущільнення - застосування комбінованої схеми дозволяє отримати більш рівномірний розподіл пористості.

П'ятий розділ присвячений результатам практичного застосування дисертаційної роботи. Результати комп'ютерного моделювання і встановлені закономірності пресування пористих заготовок були використані при одержанні багат шарових фільтрів, виготовлених методом радіально-ізостатичного пресування.

Основні результати роботи впроваджено у виробництво на Луцькому МПД ДП «Укрспирт» (м. Луцьк) для очищення технічних рідин від механічних забруднень. Використання розроблених одно шарових фільтруючих елементів із порошку сталі ШХ15 підвищує рівномірність поророзподілу фільтруючих

матеріалів на 20-30% і збільшує проникливість на 15-20% у порівнянні з аналогічними традиційними фільтруючими матеріалами.

Результати роботи впроваджено також на підприємстві ТОВ “ГРАНТЕХ ІНЖИНІРИНГ”. Отримані результати дозволять розробити високопродуктивні технології виготовлення з порошкових матеріалів запасних частин для окремих вузлів прес-гранулятора.

Ключові слова: деталі машин і апаратів, ресурсозберігаючі технології, порошкова металургія, дисперсні системи, порошкові матеріали, пористі заготовки, пластичність, метод скінчених елементів, пресування, штампування, видавлювання, фільтруючі елементи

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті

1. Михайлов А. О., Штефан Е. В., Михайлов О. В. Применение компьютерного моделирования при разработке технологических процессов получения деталей машин и аппаратов пищевой промышленности. *Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении: Труды Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, серия "Моделирование в материаловедении"*. Киев, 2017. Выпуск 19. С. 105 - 110.
2. Shtefan E., Mikhailov A., Mikhailov O., Pashchenko B. Numerical Modeling of Powdered Machine Parts Manufacturing for Food Industry Equipment. *Наукові нотатки*. Луцьк, 2018. Вип. 61. С. 238 - 242 (*Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук*).
3. Михайлов О. В., Михайлов А. О., Баглюк Г. А., Штефан Е. В. Моделирование штамповки пористых заготовок для получения поковок с внутренней конусообразной поверхностью. *Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении: Труды Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, серия «Моделирование в материаловедении»*. Киев, 2018. Вип. 20. С. 104 - 109.

4. Михайлов О. В., Михайлов А. О., Баглюк Г. А., Штефан Е. В. Исследование уплотнения и формоизменения пористых заготовок при получении изделий с внутренней конусообразной поверхностью. *Обработка материалов давлением*: сб. науч. трудов. Краматорск: ДГМА, 2019. № 1 (48). С. 146 - 152.
5. Михайлов А. О., Михайлов О. В., Штефан Е. В. Моделювання процесу отримання втулок з внутрішнім фланцем методом радіального видавлювання пористих заготовок. *Наукові нотатки*. Луцьк, 2019. Вип. 66. С. 245 - 250 (*Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук*).
6. 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*. Луцьк, 2019. № 36. С. 58 - 62 (*Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук*).
7. Михайлов А. О., Михайлов О. В., Штерн М. Б. Моделирование процесса обратного выдавливания пористых заготовок. *Наукові нотатки*. Луцьк, 2019. Вип. 68. С. 74 - 78 (*Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук*).
8. Повстяной О. Ю., Михайлов А. О., Рудь В. Д., Михайлов О. В. Моделювання ущільнення порошкових фільтруючих елементів під час радіально-ізостатичного пресування. *Успіхи матеріалознавства*. Київ: ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2020. № 1. С.33 - 39.
9. Povstyanou O., Mikhailov A., Imbirovich N., Dziubynska O., Herasymchuk H. (2021) Simulation Permeable Porous Materials of the Complex Shape During Radial-Isostatic Compression. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes II*. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2021. P. 339 - 348 (*Збірник наукових статей включений до міжнародних баз даних Scopus та Web of science*)

10. Штерн М. Б., Михайлов О. В., Михайлов А. О. Узагальнена континуальна модель пластичності порошкових та пористих матеріалів. *Порошкова металургія*. Київ, 2021. № 1/2. С. 27 - 44 (*Науковий журнал, входить до категорії "А" Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого МОН, перекладається і публікується за кордоном, включений до міжнародних баз даних Scopus та Web of science*).

Тези доповідей та матеріали конференцій

1. Михайлов А. О. Чисельне моделювання виробництва порошкових деталей машин для обладнання харчової промисловості. *Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у XXI*: матеріали 84 міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 23 - 24 квітня 2018 р. Київ: НУХТ, 2018. Ч.2. С. 145.
2. Shtefan E., Mihaylov A. CAE - technologies of machine parts resource - saving manufacturing. *Сучасні технології промислового комплексу – 2020*: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, 8 - 12 вересня, 2020 р. Херсон: ХНТУ, 2020. С.419-423.
3. Povstyanou O., Mikhailov A., Imbirovich N., Dziubynska O., Herasymchuk H. Simulation of compaction of porous permeable materials of complex shape during radial-isostatic compression. *Book of Abstracts: 2nd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes, September 8-11, 2020*. Odessa, Ukraine. Symy, 2020. P. 79.

Особистий внесок здобувача: розробка методики обчислень, участь в написанні комп'ютерних програм, моделювання процесів деформування порошкових і пористих матеріалів, участь в обговоренні, опрацюванні та узагальненні результатів, підготовка матеріалів до публікації [1 - 13].

ABSTRACT

Mikhailov A.O. "The resource-saving technologies designing methods development for manufacturing parts of food production equipment"- Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation of the doctor of philosophy scientific degree competition on a 133 "Branch mechanical engineering" specialty - National university of food technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kiev, 2021.

The dissertation is devoted to the resource - saving technologies designing methods development of manufacturing parts of food production equipment. The aim of the work is scientific substantiation of manufacturing technologies for food productions equipment structural elements by the mathematical modeling methods for dispersed materials deformation processes using.

In the work first section the classification of machines parts and devices of food production was carried out, the conditions and features of their exploitation were established. On the basis of the classification carried out, taking into account the criteria of the equipment elements limited resource, a number of typical parts of machines and apparatus of the food industry have been proposed; it is advisable to obtain them by methods of powder metallurgy.

It is established that:

- there are two approaches - discrete and continuous for modelling of powder and porous media deformation processes;
- the main approach is a continuous approach;
- the powder and porous materials plastic flow models are differ from each other and reflect the fact that porous materials resist tensile load, while powders - no;
- the most common method of modelling in solving problems of powder and porous materials deformation is the finite element method, which is implemented in many universal software systems;
- various plastic flow models are implemented in modern programs for powder and porous materials separately;
- practical application of existing software systems is limited by the fact that these models are not implemented together.

As a result, it was concluded that the task of scientific substantiation of methods for designing resource-saving technologies for the manufacture of food production equipment parts is relevant.

In the second section the formation processes mathematical model of structurally inhomogeneous porous materials is developed. The scientific substantiation of the powder materials plastic deformation model selection is carried out. On the basis of the powder and porous materials plastic deformation generalized model and the finite elements method, the definition of technique for rational constructive-technological parameters resource-saving manufacturing technologies of food production equipment parts is developed. Comparison of the calculation results with the results obtained by other authors confirmed the adequacy of the developed modeling methodology.

In the third section researches of processes of reception of details of a design purpose of machines and apparatus of food manufactures from porous sintered preparations are carried out. The processes of obtaining cylindrical bushings by the method of stamping, stamping of parts having an inner conical surface and the processes of obtaining bushings with an inner flange by the method of radial extrusion are considered.

It is established that:

- the presence of radial material flow during stamping of products “bushing” type leads to the increasing of the level of accumulated material plastic deformations;
- when stamping bimetallic blanks having an inner conical surface, the phenomenon of extrusion of a less strong layer from under a stronger layer can be avoided due to the difference in the initial porosity of the layers;
- at the final stage of radial extrusion of the bushing with an internal flange distribution of density on volume of a product is equalized, thus distribution of value of the saved plastic deformation is essentially uneven;
- during back-extrusion, the presence of imperfect contacts in the material of porous blanks leads to the appearance of loosening zones of the powder material and a decrease in the value of accumulated plastic deformation in these zones.

The modeling of processes of obtaining filter elements for technological equipment of alcohol production is carried out in the fourth section. The pressing processes of filter elements of cylindrical shape and filter elements of complex shape in the form of a flask are considered. It is established that:

- the distribution of the porosity value during radial-isostatic pressing of the powder filter element of cylindrical shape is uneven, with increasing radius the porosity value increases;

- in the manufacture of multilayer filter elements, it is advisable to apply the consolidation scheme on the mandrel, and not on the matrix;

- the value of porosity at pressing of powder filters in the form of a flask is distributed on volume of a product unevenly, its distribution depends on the consolidation scheme, application of the combined scheme allows to receive more uniform distribution of porosity.

The fifth section is devoted to the results of practical application of the work. The results of computer simulation were used to obtain multilayer filters made by the method of radial-isostatic pressing.

The main results of the work were implemented in the production at the Lutsk MPD of SE "Ukrspirt" (Lutsk) for cleaning technical fluids from mechanical contamination. The use of the developed single-layer filter elements from BBS15 steel powder increases the uniformity of pore distribution of filter materials by 20 -30 % and increases permeability by 15 - 20 % in comparison with similar traditional filter materials.

The results of the work were also implemented at the enterprise "GRANTECH ENGINEERING". The obtained results will allow to develop effective technologies for the production of spare parts from powder materials for individual units of the press granulator.

Keywords: parts of machines and apparatus, resource-saving technologies, powder metallurgy, dispersed systems, powder materials, porous blanks, plasticity, finite element method, pressing, stamping, extrusion, filter elements

LIST OF PAPERS PUBLISHED ON THE TOPIC OF THE THESIS

Articles

1. Mikhailov A. O., Shtefan E. V., Mikhailov O. V. Application of computer modeling in development of technological processes of obtaining details of food

- industry machines and apparatus. *Mathematical Models and Computing Experiment in Material Science*: Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NASU. Kiev, 2017. V. 19. P. 105 - 110.
2. Shtefan E., Mikhailov A., Mikhailov O., Pashchenko B. Numerical Modeling of Powdered Machine Parts Manufacturing for Food Industry Equipment. *Scientific a note: the interuniversity collection («Engineering mechanics»)*. Lutsk, 2018. V. 61. P. 238 - 242 (*Journal is included in the List of scientific professional publications of Ukraine in technical sciences, approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine*).
 3. Mikhailov O. V., Mikhailov A. O., Bagluk G. A., Shtefan E. V. Modelling of stamping of porous parts for obtaining forgings with the internal cone-shaped surface. *Mathematical Models and Computing Experiment in Material Science*: Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NASU. Kiev, 2018. V. 20. P.104 - 109.
 4. Mikhailov O. V., Mikhailov A. O., Bagluk G. A., Shtefan E. V. Researching of compaction and forming of porous parts for obtaining forgings with the internal cone-shaped surface. *Material working by pressure*. Kramatorsk, 2019. V. 1 (48). P. 146 - 152.
 5. Mikhailov A. O., Mikhailov O. V., Shtefan E.V. Modeling of the process of obtaining sleeves with internal flange by the method of radial extrusion of porous blanks. *Scientific a note: the interuniversity collection («Engineering mechanics»)*. Lutsk, 2019. V. 66. P. 245 - 250 (*Journal is included in the List of scientific professional publications of Ukraine in technical sciences, approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine*).
 6. Povstyanoy O., Mikhaylov A., Rud V., Mikhaylov O. Modeling of compacted powder filter element of complex shape with radial-isostatic pressing. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. Lutsk, 2019. V. 36. P. 58 - 62 (*Journal is included in the List of scientific professional publications of Ukraine in technical sciences, approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine*).

7. Mikhailov A. O., Mikhailov O. V., Shtern M. B. Modeling the process of back extrusion of porous blanks. *Scientific a note: the interuniversity collection («Engineering mechanics»)*. Lutsk, 2019. V. 68. P. 74 - 78 (*Journal is included in the List of scientific professional publications of Ukraine in technical sciences, approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine*).
8. Povstyanoy O. Y., Mikhailov A. O., Rud V. D., Mikhailov O. V. Modeling of the compaction of powder filter elements during radial isostatic pressing. *Uspih materialoznavstva*. Kiev: Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NASU, 2020. V. 1. P. 33 - 39.
9. Povstyanoy O., Mikhailov A., Imbirovich N., Dziubynska O., Herasymchuk H. (2021) Simulation Permeable Porous Materials of the Complex Shape During Radial-Isostatic Compression. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes II*. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2021. P. 339 - 348. (*Collection of scientific articles is included in the international databases Scopus and Web of science*).
10. Shtern M. B., Mikhailov O. V., Mikhailov A. O. Extended continual model for powders and porous materials. *Powder Metallurgy*. Kiev, 2021. V. 1/2. P. 27 – 44 (*Journal is included to category "A" in the List of scientific professional publications of Ukraine in technical sciences, approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine, is being translated and published abroad, is included in the international databases Scopus and Web of science*).

Abstracts and conference proceedings

1. Mikhailov A. O. Numerical Modeling Manufacturing of Powdered Machine Parts in Food Industry Equipment. *Youth scientific achievements to the 21st century nutrition problem solution: Proc. of the 84 International scientific conference of young scientist and students, 23 - 24 April, 2018*. Kyiv: NUFT, 2018. V. 2. P. 145.
2. Shtefan E., Mihaylov A. CAE - technologies of machine parts resource - saving manufacturing. *Modern technologies of the industrial complex - 2020: Proc. of the VI International scientific - practical conference, 8 - 12 September, 2020*. Kherson: KhNTU, 2020. P. 419 - 423.

3. Povstyanoy O., Mikhailov A., Imbirovich N., Dziubynska O., Herasymchuk H. Simulation of compaction of porous permeable materials of complex shape during radial-isostatic compression. *Book of Abstracts: 2nd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes*, September 8-11, 2020. Odessa, Ukraine. Symy, 2020. P. 79.

The personal contribution of the applicant is the development of calculation methods, participation in writing computer programs, modeling of processes of deformation of powder and porous materials, participation in discussion, processing and generalization of results, preparation of materials for publication [1 - 13].

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ВИРОБІВ	
ХАРЧОВОГО МАШИНОБУДУВАННЯ З ВРАХУВАННЯМ ТЕНДЕНЦІЙ	
РОЗВИТКУ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ	
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ МАШИН І АПАРАТІВ	
ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ.....	23
1.1. Класифікація та особливості експлуатації деталей машин і апаратів харчових виробництв.....	23
1.1.1. Класифікація.....	23
1.1.2. Технологічні особливості експлуатації.....	24
1.1.3. Особливості зношування.....	25
1.2. Застосування ресурсозберігаючих технологій при виготовленні деталей харчового машинобудування.....	28
1.2.1. Сучасні тенденції розвитку ресурсозберігаючих технологій.....	28
1.2.2. Переваги та недоліки порошкової металургії.....	29
1.2.3. Класифікація порошкових матеріалів.....	30
1.2.4. Основні технологічні операції формоутворення виробів.....	31
1.2.5. Аналіз досвіду застосування методів порошкової металургії у машинобудуванні.....	32
1.2.6. Перспективи використання методів порошкової металургії у харчовому машинобудуванні.....	35
1.3. Інформаційні технології проектування процесів формоутворення деталей харчового машинобудування з порошкових та пористих матеріалів.....	38
1.3.1. Специфіка порошкових і пористих матеріалів.....	38
1.3.2. Методи обчислювального моделювання процесів деформування дисперсних середовищ.....	39
1.3.2.1. Реологічні моделі процесів пластичного деформування порошкових та пористих матеріалів.....	40

1.3.2.2. Континуальні аспекти.....	48
1.3.3. Методи цифрового відображення закономірностей процесів формування при виготовленні деталей з порошкових та пористих матеріалів.....	50
Висновки і постановка завдань досліджень.....	52
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВИРОБІВ З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....	54
2.1. Наукове обґрунтування вибору моделі пластичного деформування порошкових матеріалів.....	54
2.2. Аналітична модель деформування дисперсних матеріалів.....	61
2.2.1. Пластичне деформування.....	61
2.2.2. Пружно-пластичне деформування.....	63
2.3. Алгоритмічна модель.....	64
2.3.1. Процес пластичного деформування.....	64
2.3.2. Процес пружно-пластичного деформування.....	66
2.4. Цифрова модель.....	68
2.5. Аналіз адекватності цифрової моделі.....	70
2.5.1. Пресування порошкових матеріалів.....	70
2.5.1.1. Одностороннє пресування.....	71
2.5.1.2. Двостороннє пресування.....	73
2.5.2. Вільна осадка пористої заготовки.....	75
Висновки до розділу 2.....	78
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ МАШИН І АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ З ПОРИСТИХ СПЕЧЕНИХ ЗАГОТОВОК	79
3.1. Штампування втулок циліндричної форми.....	79
3.2. Штампування деталей з внутрішньою конусоподібною поверхнею.....	82
3.3. Радіальне видавлювання втулок із внутрішнім фланцем.....	88
3.3.1. Аналіз еволюції полів показників якості виробів.....	90

3.3.2. Дослідження впливу початкової форми заготовки.....	91
3.3.3. Дослідження впливу висоти робочої порожнини.....	94
3.4. Зворотне видавлювання втулок із внутрішньою порожниною.....	95
3.4.1. Аналіз еволюції полів показників якості виробів.....	97
3.4.2. Вплив структурно - механічних параметрів матеріалу заготовки на показники якості готових виробів.....	98
Висновки до розділу 3.....	100
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЛЬТРУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ СПИРТОВОГО ВИРОБНИЦТВА.....	101
4.1. Технологічні особливості виготовлення фільтруючих елементів.....	101
4.2. Пресування фільтруючих елементів циліндричної форми.....	103
4.2.1. Схеми технологічного процесу формоутворення багат шарових градієнтних фільтруючих елементів.....	103
4.2.2. Пресування на оправку.....	104
4.2.3. Пресування на матрицю.....	107
4.3. Пресування фільтруючих елементів у формі колби.....	108
Висновки до розділу 4.....	112
РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ ПРАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	113
5.1. Фільтруючі елементи для розділення технологічних рідин на Луцькому МПД ДП «Укрспирт».....	113
5.2. Тонкостінні втулки для прес-гранулятора фірми ТОВ « ГРАНТЕХ ІНЖИНІРИНГ».....	115
5.2.1. Пряме видавлювання.....	116
5.2.2. Радіальне ущільнення.....	119
Висновки до розділу 5.....	122
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	125
ДОДАТКИ.....	136
ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів роботи у виробництво.....	136

ДОДАТОК Б. Сертифікат учасника міжнародної конференції.....	139
ДОДАТОК В. Реалізація реологічних моделей деформування порошкових і пористих матеріалів.....	140

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасна харчова промисловість характеризується великою кількістю виробництв, що відрізняються умовами протікання технологічних процесів, різноманітністю фізичних властивостей вихідної технологічної сировини та іншими [1]. Вона визначається насиченою різноманітністю складного у технічному відношенні технологічного обладнання, яке включає в себе різні групи технічних комплексів, виробничих ліній, конвеєрних установок, ділянок роздачі готової продукції та мийки тари, машин для герметичної упаковки, техніки для приготування їжі та зберігання продуктів.

Від технічного рівня, надійності і довговічності, як окремих деталей, так і складальних одиниць обладнання залежить ефективність роботи підприємств та якість готової продукції.

Забезпечення безперервного режиму роботи підприємств в значній мірі залежить від ритмічного постачання окремих запасних частин, що визначають показники працездатності відповідних вузлів технологічного обладнання.

Розвитку теоретичних основ та розробленню методів підвищення довговічності окремих деталей обладнання харчових виробництв присвячені роботи провідних науковців: Прейса Г.О., Сологуба М.А., Некоза О.І, Соколова А.Я, Селехова П.М, Сибирякова А.А., Трунова А.Ф., Кестельмана Н.Я., Котляра Л.И., Гернета М.М., Демидова А.Р., Хрущева М.М., Бабічева М.А., Хусида С.Д., Руссо А.М., Зайцева Н.В., Колпакова И.П., Измалкова Л.И., Москатова К.А., Андрианова И.О., Литвиненко О.А. та інших.

Враховуючи сучасний стан розвитку високопродуктивних технологій виготовлення різноманітних деталей (порошкова металургія, штампування, видавлювання, прокатка, 3D - принтинг та інші), залучення методів математичного та комп'ютерного моделювання процесів формоутворення виробів галузевого машинобудування дасть можливість провести проектувальні розрахунки при створенні енергоефективних способів виготовлення відповідних елементів обладнання.

Тому науково-прикладна проблема розроблення концепції для створення сучасних ресурсозберігаючих технологій виготовлення елементів обладнання харчових виробництв є **актуальною**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження проводилися відповідно до напрямку науково-дослідних робіт:

1. «Розроблення наукових основ технологічних процесів харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв із метою створення високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації та автоматизації», в межах кафедральних тем «Підвищення якості, надійності і довговічності обладнання для переробної і харчової промисловості» (№0112U006977) кафедри машинобудування, стандартизації та сертифікації обладнання;

2. «Розробка методів підвищення якості, надійності і довговічності обладнання для переробної і харчової промисловості» (№ 0119U102428) кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є наукове обґрунтування ресурсозберігаючих технологій виготовлення елементів обладнання харчових виробництв на основі використання методів математичного моделювання процесів деформування дисперсних матеріалів і встановлення закономірностей формоутворення та визначення режимів ущільнення виробів різного технічного призначення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. На основі теорії пластичності порошкових і пористих тіл та сучасних обчислювальних методів розробити методику математичного моделювання процесів формоутворення деталей.

2. Визначити еволюцію полів показників якості виробів, а саме щільності, накопиченої деформації твердої фази, а також перевірити адекватність запропонованих методологічних розробок.

3. Запропонувати раціональні схеми отримання деталей для обладнання харчових виробництв:

- штампування втулок;
- отримання деталей, що мають похилу поверхню, в тому числі - двошарових;
- радіальне видавлювання втулки із внутрішнім фланцем;
- зворотне видавлювання пористих заготовок.

4. Розглянути вплив наявності двовимірних дефектів в пористих заготовках на процес їх деформування, а також на кінцеві властивості одержуваних виробів.

5. Дослідити процес радіально - ізостатичного пресування фільтруючих елементів, що мають циліндричну форму, в тому числі - багат шарових.

6. Вивчити закономірності ущільнення фільтрів, що мають складну форму у вигляді колби.

Об'єкт досліджень - порошкові матеріали і пористі заготовки, процеси їх консолідації і деформування при виготовленні деталей обладнання харчових виробництв.

Предмет досліджень - закономірності впливу схеми формоутворення, структурно-механічних властивостей матеріалу заготовки на параметри процесу деформування і показники якості готових виробів.

Методи досліджень. Основним методом досліджень є математичне моделювання процесів формоутворення дисперсних матеріалів в режимі пластичного та пружно-пластичного деформування твердої фази з використанням проєкційно-сіткових методів та комп'ютерних технологій.

Достовірність результатів роботи забезпечена коректністю постановки задач і застосуванням сучасних методів комп'ютерного моделювання. Вона підтверджується адекватністю фізичної сутності процесів, що розглядаються, зіставленням отриманих результатів з відомими даними, а також відповідністю результатам впровадження розробок.

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблена математична модель процесів формоутворення структурно - неоднорідних пористих матеріалів. На основі узагальненої моделі пластичного деформування порошкових і пористих матеріалів та методу скінчених елементів розроблена методика визначення раціональних конструктивно - технологічних параметрів ресурсозберігаючих

технологій виготовлення деталей обладнання харчових виробництв. При цьому вперше:

- встановлено закономірності взаємодії різномодульних шарів матеріалу при штампуванні біметалевих заготовок, що мають внутрішню конусоподібну поверхню;

- визначено закономірності вирівнювання розподілення величин пористості по об'єму заготовки на заключному етапі радіального видавлювання втулки із внутрішнім фланцем при використанні схеми деформування з компенсатором. У той же час розподіл накопиченої пластичної деформації залишається нерівномірним;

- встановлено, що при зворотному видавлюванні наявність недосконалих контактів у матеріалі пористих заготовок призводить до появи зон розушільнення порошкового матеріалу та зменшення величини накопиченої пластичної деформації в цих зонах;

- визначено залежність параметрів розподілення пористості по перерізу заготовки від схеми пресування багатошарових фільтруючих елементів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Встановлено, що при виготовленні багатошарових фільтруючих елементів доцільно використовувати схему пресування на оправку, яка, на відміну від схеми пресування на матрицю, дозволяє отримати постійну зміну пористості по перерізу виробу .
2. Розроблені заходи для уникнення явища взаємопроникнення різномодульних шарів пористого матеріалу при штампуванні біметалевих заготовок.
3. Запропонована комбінована схема ущільнення фільтруючого елемента складної форми у вигляді колби, яка дозволяє отримати більш рівномірний розподіл пористості, яка безпосередньо впливає на величину проникності фільтруючих елементів.

Результати комп'ютерного моделювання і встановлені закономірності пресування пористих заготовок були використані при одержанні багат шарових фільтрів, виготовлених методом радіально-ізостатичного пресування.

Основні результати роботи впроваджено у виробництво на Луцькому МПД ДП «Укрспирт» (м. Луцьк) для очищення технічних рідин від механічних забруднень. Використання розроблених одношарових фільтруючих елементів із порошку сталі ШХ15 підвищує рівномірність поророзподілу фільтруючих матеріалів на 20-30% і збільшує проникливість на 15-20% у порівнянні з аналогічними традиційними фільтруючими матеріалами.

Результати роботи впроваджено також на підприємстві ТОВ «ГРАНТЕХ ІНЖИНІРИНГ». Отримані результати дозволять розробити високопродуктивні технології виготовлення з порошкових матеріалів запасних частин для окремих вузлів прес-гранулятора.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, викладені в роботі, отримані особисто автором або за його безпосередньої участі.

Постановка задач досліджень, планування обчислювальних експериментів, аналіз та обговорення отриманих результатів, формулювання висновків виконувалися автором за участю наукового керівника д.т.н., проф. Є.В. Штефана.

Наукове обґрунтування вибору моделі пластичного деформування порошкових матеріалів виконано спільно з член-кор. НАН України, д.т.н., М.Б. Штерном.

Автором розроблена методика обчислювального моделювання, він приймав участь в написанні комп'ютерних програм.

Моделювання процесів одержання виробів конструкційного призначення з пористих спечених заготовок виконано автором самостійно.

Моделювання процесу радіально - ізостатичного пресування фільтруючих елементів циліндричної форми на оправку та елементів складної форми проводилося спільно з доцентом Луцького національного технічного університету О.Ю. Повстяним. Пресування фільтруючих елементів циліндричної форми на матрицю досліджено автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 84-й Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у XXI ст.; VII-й Міжнародній науково – практичній конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування», 20 - 23 травня 2019 року, м. Луцьк – о. Світязь Україна; XXII-й Міжнародній науково - технічній конференції «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки давлением», 22 - 25 квітня 2019 року, Україна, Краматорск; VI-й Міжнародній науково - практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020», Херсон: ХНТУ, 2020; 2nd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes, September 8-11, 2020. Odessa, Ukraine.

Публікації. За результатами роботи опубліковано 13 наукових праць, у тому числі 10 статей, серед яких – 5 у наукових фахових виданнях України, 2 включені до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 3 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку літературних джерел з 114 найменувань, 3 додатків. Основні матеріали роботи викладено на 124 сторінках основного тексту, що містить 84 рисунка та 1 таблицю.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ВИРОБІВ ХАРЧОВОГО МАШИНОБУДУВАННЯ З ВРАХУВАННЯМ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ МАШИН І АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

1.1. Класифікація та особливості експлуатації деталей машин і апаратів харчових виробництв

1.1.1. Класифікація

Подальший розвиток харчової промисловості обумовлює необхідність створення ефективного технологічного обладнання, використання ресурсозберігаючих технологій виготовлення деталей машин і апаратів, застосування сучасних методів проектування. У зв'язку з цим виникає необхідність провести класифікацію деталей, що використовуються, а також розглянути особливості їх експлуатації.

У харчовій промисловості використовується велика різноманітність деталей машин і апаратів. Їх можна класифікувати по цілому ряду ознак:

1. Залежно від наявності контакту з сировиною або харчовим продуктом (*не мають контакту; мають контакт*).
2. Залежно від типу матеріалу (на основі: *чорних металів; кольорових металів; тугоплавких металів; твердих сплавів; кераміки*).
3. Залежно від величини силових навантажень (*не навантажені; мало навантажені; середньо навантажені; сильно навантажені: статичними або динамічними навантаженнями*).
4. Залежно від експлуатаційних властивостей (*зносоустійкі; стійкі до впливу корозії; стійкі до температурних факторів; стійкі до комбінованого впливу*).
5. Залежно від конструктивних елементів (*прості форми; складної форми*).
6. Залежно від щільності (*щільні; пористі*).

7. Залежно від технології отримання (отримані методами: *лиття; штампування; механічної обробки; порошкової металургії*).

Схематично класифікація деталей машин і апаратів наведена на рис.1.1.

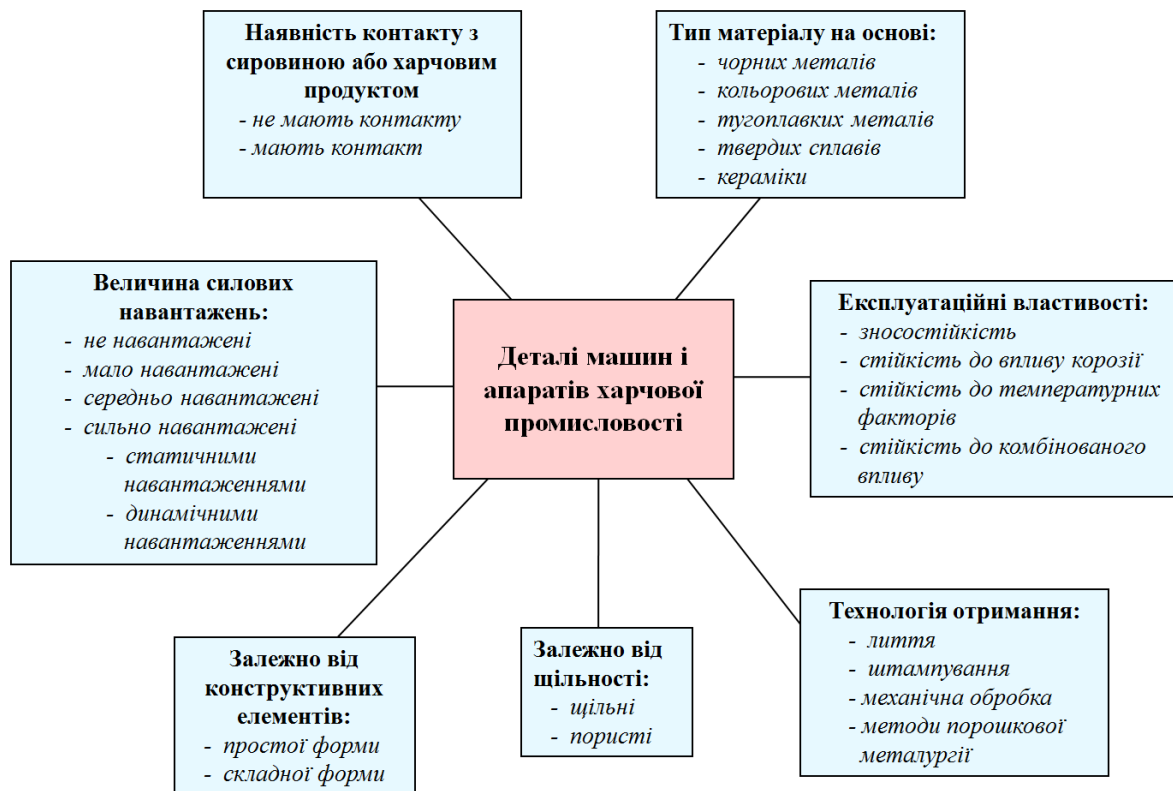


Рис. 1.1. Класифікація деталей машин і апаратів харчових виробництв

1.1.2. Технологічні особливості експлуатації

Характерною особливістю машин харчової промисловості є наявність робочих органів, що безпосередньо контактують з сировиною або харчовими продуктами [2]. Вплив на продукт з метою зміни його властивостей в апаратах проводиться в реакційному просторі (робочій камері).

Технологічні середовища харчових виробництв по складу і властивостям можна умовно поділити на *органічні* та *неорганічні*.

Середовища, в яких працюють деталі машин і апаратів, можуть бути різними. Часто вони є сильно корозійно-активними. Наявність сильно агресивних

середовищ характерна для хлібопекарського, виноробного, спиртового виробництва та інших.

Деякі види харчових середовищ мають *абразивні властивості* (кетчупи, томатні пасти, більшість сипучих середовищ та інші).

Робочим середовищем машин і апаратів може бути: рідина, емульсія, піна, суспензія, тверде тіло, сипучий матеріал.

Активну дію на обладнання здійснюють також миючі та дезінфікуючі розчини, підвищена температура, висока швидкість витікання робочих середовищ, значні перепади тиску.

Технологічні середовища можуть являти собою *електроліти*, тому корозія в них носить електрохімічний характер.

Специфічні умови харчових виробництв визначають особливі вимоги до деталей технологічного обладнання. Особливе значення для харчової промисловості має вибір матеріалів для виготовлення робочих органів обладнання.

Основні вимоги до матеріалу :

- повинен бути стійким при дії на нього оброблювальних середовищ.
- не повинен чинити негативний вплив на харчовий продукт, що отримується.

1.1.3. Особливості зношування

В процесі експлуатації відбувається зношування деталей машин і апаратів, тобто зміна розмірів, форми або стану і властивостей їх поверхонь. Втрати працездатності обладнання внаслідок відмов призводять до простоїв, значних витрат на ремонт та запасні частини [3]. Тому проблема підвищення зносостійкості деталей є актуальною [4].

Існують різні види зношування [3-6]:

1. Механічне - зношування внаслідок механічних впливів.

1.1. Зминання - макроскопічна об'ємна пластична деформація металу деталей машин.

1.2. Абразивне (гідроабразивне, газоабразивне) - зношування матеріалу в результаті переважно ріжучої дії на матеріал твердих часток, що знаходяться у вільному чи закріпленому стані. Найчастіше цей вид зношування характерний для обладнання цукрових і рибопереробних заводів, тютюнових та інших виробництв.

1.3. Ерозійне (гідроерозійне, газоерозійне) - зношування внаслідок дії потоку рідини або газу. В результаті ерозії зношуються деталі випарних і дифузійних апаратів, трубопроводи.

1.4. Кавітаційне - гідроерозійне зношування при переміщенні твердого тіла відносно рідини, при якому бульбашки газу, розчиненого в ній, захоплюються поблизу поверхні, внаслідок чого створюється місцеве підвищення тиску і температури. В результаті кавітаційного впливу зношуються деталі сепараторів, центрифуг, відцентрових та вихрових насосів, гомогенізаторів та інших.

1.5. Втомлювальне – механічне зношування в результаті втомлювального руйнування при циклічному деформуванні мікрооб'ємів матеріалу поверхневого шару, яке може відбуватись як при терті кочення, так і при терті ковзання. Втомлювальне зношування відбувається у багатьох видах обладнання при терті коченні, а також у молоткових подрібнювачах.

1.6. Зношування при заїданні - відбувається внаслідок схоплювання, глибинного виривання матеріалу, переносу його з однієї поверхні тертя на іншу і дії утворених нерівностей на сполучену поверхню. Зношуванню при заїданні підлягають деталі кулачкових механізмів, вали компресорів, елементи ланцюгових транспортерів.

1.7. Фретінгове - механічне зношування сполучених тіл при малих коливальних відносних переміщеннях. Фретінговому зношуванню підлягають різьбові і шліцьові з'єднання, шпонки і штифти.

2. Корозійно-механічне - зношування в результаті механічного впливу, що супроводжується хімічною або електричною взаємодією матеріалу з середовищем (найпоширеніший вид зношування). Деякі види зношування представлені на рис.1.2 - рис.1.4 [5].



Рис. 1.2. Зношування паза і повідкових пальців мальтійського хреста тістодільної машини

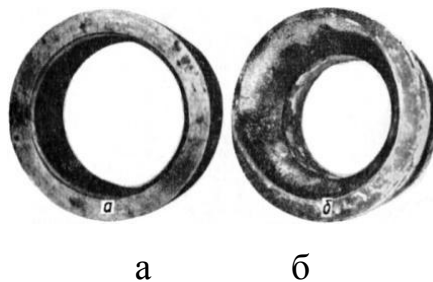


Рис. 1.3. Нове (а) і зношене (б) гнізда клапана насоса



Рис. 1.4. Корозійне зношування шестерні

Основними напрямками вирішення проблеми зношування обладнання харчових виробництв можуть бути: зменшення інтенсивності корозійної взаємодії

поверхонь деталей тертя з технологічними середовищами; зміна умов і параметрів динамічного навантаження зони контакту; підвищення опору зношуванню деталей обладнання [3]. Реалізація названих напрямків може бути забезпечена на основі застосування сучасних ресурсозберігаючих технологій.

1.2. Застосування ресурсозберігаючих технологій при виготовленні деталей харчового машинобудування

1.2.1. Сучасні тенденції розвитку ресурсозберігаючих технологій

Успішний розвиток машинобудування України можливий тільки на основі зменшення витрат ресурсів і енергії, застосування нових матеріалів, конструктивних рішень, ефективних технологічних процесів на етапах виготовлення та експлуатації машин і апаратів, відповідного рівня технічного обслуговування і ремонту [7, 8].

До найважливіших напрямків економії матеріальних ресурсів можна віднести:

- зниження матеріаломісткості виробів на етапі проектування;
- використання спеціальних матеріалів або надання звичайним матеріалам спеціальних властивостей;
- забезпечення технологічності конструкції деталей;
- застосування ресурсозберігаючих технологій, зниження матеріаломісткості на етапі виготовлення;
- використання вторинних ресурсів і відходів;
- збільшення виходу готової продукції, скорочення і ліквідація втрат;
- підвищення надійності і довговічності деталей машин і апаратів.

Ресурсозберігаючі технології - технології, що дозволяють виробляти продукцію з мінімальними витратами енергії, сировини, матеріалів та інших ресурсів. Вони характеризуються комплексною переробкою і використанням вторинних ресурсів (металобрухту, склобою, макулатури та ін.), а також

повторним використанням енергії, води та інших ресурсів. Ресурсозберігаючі технології дозволяють економити природні ресурси та уникати забруднення навколишнього середовища.

До числа ресурсозберігаючих технологій відносяться методи порошкової металургії.

1.2.2. Переваги та недоліки порошкової металургії

Методи порошкової металургії мають ряд переваг, які дозволяють їм витіснити більш дорогі способи обробки металів: лиття, ковку та штампування, а також механічну обробку. Наприклад, при гарячому штампуванні литих металів і сплавів кінцева форма виробу досягається, як правило, за кілька переходів. Застосування пористої заготовки дозволяє за один перехід ущільнити її і надати виробу задану форму. В результаті, застосування пористих заготовок, замість литих, дозволяє забезпечити ту ж форму і властивості кінцевого виробу, але з меншими зусиллями і при скороченні числа переходів і потрібного штампового інструменту [9].

Основними перевагами методів порошкової металургії є:

1. Мінімальні відходи, зведення до мінімуму або взагалі відсутність подальшої механічної обробки.
2. Економія за рахунок використання відходів (окалина, стружка) для отримання порошків.
3. Виготовлення деталей, які іншими способами не можна отримати.
4. Точність хімічного складу порошків.
5. Можливість отримання композицій з металевих і неметалевих матеріалів.
6. Висока чистота поверхні, точність і стабільність розмірів і форми виробів.
7. Висока зносостійкість виробів.
8. Отримання виробів з регульованою пористістю
9. Простота технологічного процесу, високий рівень автоматизації.

10. Зниження енерговитрат.

11. Екологічність виробництва.

У той же час методи порошкової металургії мають і недоліки:

1. Наявність залишкової пористості, якщо тільки це не потрібно спеціально (наприклад, фільтруючі елементи).
2. Недостатня міцність виробів.
3. Обмеженість розмірів і простота форми одержуваних деталей.
4. Висока вартість порошків і прес-форм.
5. Метод доцільно застосовувати в масовому і серійному виробництві.

1.2.3. Класифікація порошкових матеріалів

Порошкові матеріали можна класифікувати по цілому ряду ознак [10-12]:

1. За функціональним призначенням:
 - 1.1. Конструкційні - для несучих деталей машин, приладів і механізмів.
 - 1.2. Фрикційні - для роботи в гальмівних і передавальних вузлах машин і приладів.
 - 1.3. Антифрикційні - для виробництва виробів, від яких потрібні низькі втрати на тертя.
 - 1.4. Композиційні - механічна суміш металів або металів і неметалів.
 - 1.5. Пористі - мають пористість, що забезпечує їх проникність при експлуатації.
 - 1.6. Електротехнічні - контакти та магніти.
 - 1.7. Зносостійкі.
2. За наявністю пористості:
 - 2.1. Щільні – ця група матеріалів знайшла широке застосування в машино- і приладобудуванні, автомобільній та авіаційній техніці та інших галузях оборонного і загальногромадянського виробництва.

2.2. Пористі - висока пористість цих матеріалів дозволяє застосовувати їх для виготовлення спеціальних виробів (виробів антифрикційного призначення, фільтрів, деталей охолодження і т. п.).

1.2.4. Основні технологічні операції формоутворення виробів

Методи порошкової металургії являють собою ряд послідовних технологічних операцій, що включають отримання порошків металів або неметалів і подальше виготовлення з них різних за призначенням і властивостями виробів.

Послідовність технологічних процесів отримання виробів є [11]:

1. Отримання порошків. Це найбільш складний, витратний і трудомісткий етап.

2. Підготовка порошкової суміші (шихти), ущільнення і формовка заготовки. Існують різні методи формовки, які можуть здійснюватися під дією статичних або динамічних навантажень, в холодному або гарячому стані порошку. Найбільшого поширення набули методи пресування в прес-формах і прокатування, ізостатичного і мундштучного формування, а також динамічного пресування і шлікерного лиття.

3. Спінання. На цьому етапі утворюються зв'язки між частинками порошку і заготовка перетворюється в міцне тіло, властивості якого наближаються до властивостей виробів, що виготовляються традиційними методами. Спінання відбувається при нагріванні заготовки нижче температури плавлення основного компонента.

4. Додаткова обробка. В залежності від вимог може проводитися додаткова обробка спечених пористих виробів: обробка тиском, механічна обробка, термообробка, нанесення покриттів. Методи обробки тиском можуть бути різними: калібрування, холодна і гаряча штамповка, екструзія, прокатка, волочіння, протягування та інші.

1.2.5. Аналіз досвіду застосування методів порошкової металургії у машинобудуванні

На рис.1.5 - рис.1.8 наведені приклади машинобудівних деталей, отриманих методами порошкової металургії.

Конструкційні деталі (рис.1.5) зазвичай виготовляють на заміну більш дорогих деталей, що отримані традиційними методами. Залежно від умов експлуатації і величин прикладених навантажень методи їх отримання можуть відрізнятися. Якщо навантаження не великі, застосовують метод пресування порошків і спікання. Важко навантажені деталі отримують методом гарячого штампування пористих заготовок.

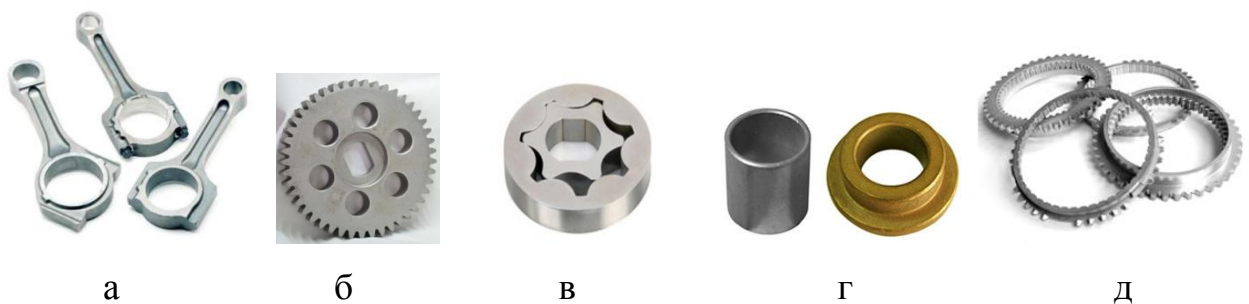


Рис. 1.5. Конструкційні деталі: а - шатуни; б - шестерні; в - деталі масляного насоса; г - втулки; д - кільця блокувальні синхронізатора трактора

В залежності від ступеня навантаженості порошкові конструкційні деталі діляться на чотири групи (таблиця 1.1) [13].

Зносостійкі деталі (рис.1.6) отримують методом гарячого штампування пористих заготовок. Як правило, при їх виготовленні використовують композиційні матеріали, наприклад карбідосталі [14, 15]. Матеріал містить до 50% карбіду (зазвичай карбіду титану), розташованого в матриці з легованої сталі.

Наявність карбіду титану забезпечує високу зносостійкість, а легована сталь надає матеріалу додатково в'язкі властивості. Карбідосталі добре обробляються механічною обробкою. Вироби з карбідосталей можна з'єднувати (методами

спільного формування і спікання, а також пайки) з виробами зі звичайних, більш дешевих сталей і отримувати, таким чином, біметалеві деталі.

Таблиця 1.1 - Характеристика деталей різної навантаженості

Деталі за ступенем навантаженості	Група щільності матеріалу	Пористість матеріалу, %	Границя міцності, % від властивості безпористого матеріалу	Пластичність і ударна в'язкість, % від властивостей безпористого матеріалу	Щільність порошкових сталей, кг/м ³
Мало навантажені	1	25...16	30...45	25...35	6000...6600
Помірно навантажені	2	15...10	45...65	35...60	6700...7100
Середньо навантажені	3	9...2	65...95	60...90	7200...7700
Важко навантажені	4	Менш 2	95...100	90...100	Більш 7700



а



б



в



г

Рис. 1.6. Зносостійкі деталі: а - сідло гідравлічного клапана; б - шарнір в вузлах гідронавіски трактора; в - ролик дротового стану; г - біметалічні різці

Пористі деталі з антифрикційними властивостями (рис.1.7) мають ряд переваг в порівнянні з аналогічними виробами, які отримані методом лиття [11]. Вони можуть містити в порах змазку (рідку чи тверду), тому у процесі експлуатації виникає їх самозмазування.

Методи порошкової металургії дозволяють відразу отримувати вироби необхідних форми і розмірів, що також є перевагою пористих антифрикційних матеріалів. У промисловості виготовляють різні деталі з антифрикційними

властивостями: підшипники, втулки, направляючі планки, шестерні та інші. Ці вироби характеризуються простотою установки і експлуатації, безшумністю роботи.

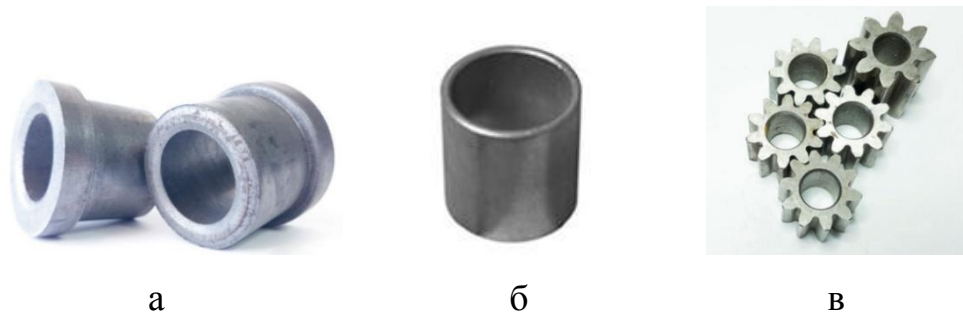


Рис. 1.7. Деталі з антифрикційними властивостями: а - самозмазуючі підшипники; б - втулка; в - шестерні

Деталі з пористих матеріалів найбільш широко представлені фільтрами (рис.1.8). Порошкові фільтри характеризують велика продуктивність, висока тонкість очищення, малий гідравлічний опір, здатність до багаторазової регенерації, нескладне виготовлення, підвищена міцність, висока корозійна стійкість, високі значення опору абразивного зносу. Вони не засмічують фільтровані рідини або гази матеріалами фільтра, витримують різкі коливання температур, легко обробляються, зварюються і паяються. Фільтруючі елементи виготовляють методами пресування в матрицях, ізостатичного пресування, прокатки та наступного спікання.



Рис. 1.8. Порошковий фільтр (а) і фільтруючі елементи (б)

Виготовляють фільтруючі елементи різної форми: диски, пластини, циліндри, втулки, конуси, елементи складної форми.

1.2.6. Перспективи використання методів порошкової металургії у харчовому машинобудуванні

На основі проведеного вище аналізу можна запропонувати ряд деталей машин і апаратів харчової промисловості, що доцільно отримувати методами порошкової металургії:

1. Деталі конструкційного призначення (рис.1.9), що замінюють вироби, одержані традиційними методами. До цих деталей можна віднести втулки, фланці, кільця, кришки, шатуни, шестерні, храповики, кулачки, накидні і спеціальні гайки, важелі, зірочки, накладки, шайби, ковпачки, заглушки, сідла і корпуса клапанів, статори, диски і ротори насосів, муфти, обмежувачі та інші.



Рис. 1.9. Деталі конструкційного призначення: а - кришка; б - втулки; в - гайка накидна; г - шатун; д - шестерні

Доцільно виготовляти деталі, які мають складну форму і отвори в площині, розташовані перпендикулярно напрямку пресування, деталі кільцеподібної форми.

2. Зносостійкі деталі (рис.1.10). Методами порошкової металургії доцільно виготовляти деталі машин і апаратів, які в процесі експлуатації піддаються значним навантаженням і зносу, наприклад ролики, кулачки, храповики, зірочки, жорна, сідла клапанів, опори, робочі елементи молоткових дробарок, ножі

різальних машин, м'ясорубок, волчков, кутерів, деталі мальтійських механізмів, прес-форми та інші.

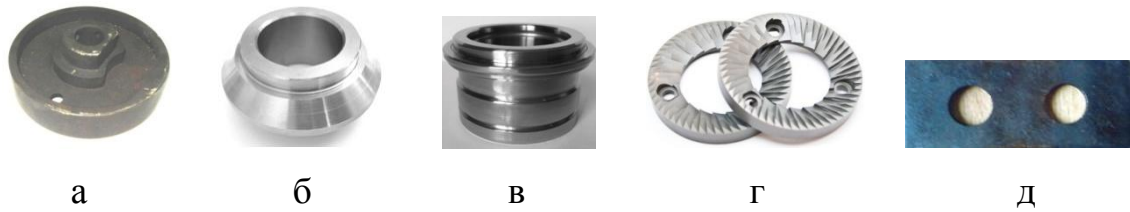


Рис. 1.10. Зносостійкі деталі: а - кулачок; б - сідло клапана;
в - закаточний ролик; г - жорна; д - молоток дробарки

3. Деталі з пористих матеріалів

3.1. Деталі з антифрикційними властивостями (рис.1.11). До цих деталей можна віднести самозмазуючі підшипники і втулки, направляючі планки, ролики та шестерні.



Рис. 1.11. Деталі з антифрикційними властивостями: а - самозмазуючі підшипники і втулки; б - ролики; в - шестерні

Застосування таких деталей доцільно для важкодоступних вузлів машин і апаратів, а також, якщо потрапляння змазки може призвести до псування продукції. Наявність змазки в порах роликів і шестерень призводить до більш плавної і безшумної роботи обладнання.

3.2. Фільтри (рис.1.12). Фільтрування - один із найпоширеніших процесів харчових виробництв [16]. Він забезпечує майже повне звільнення рідин та газів від завислих частинок. Процес фільтрування в харчовій промисловості застосовується для ефективного очищення від механічних домішок продукції, що випускається, для поліпшення її якості. Також порошкові фільтри можуть застосовуватися для очищення найрізноманітніших технологічних середовищ і стерилізації паром повітря в технологічних лініях.

Враховуючи переваги порошкових фільтрів, їх застосування на підприємствах харчових виробництв є перспективним.

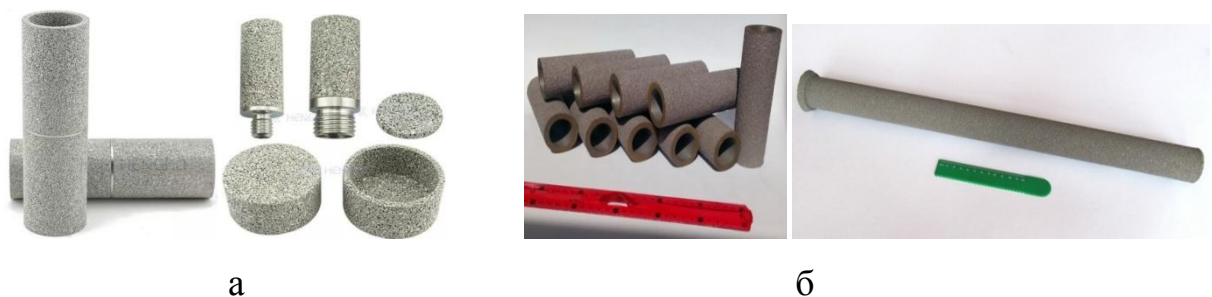


Рис. 1.12. Порошкові фільтри (а) і фільтри для стерилізації паром (б)

3.3. Пористі пластини (рис.1.13).



Рис. 1.13. Пористі пластини

Ці вироби можуть використовуватися для транспортування і сушки дисперсних матеріалів в псевдозрідженому шарі, що породжується потоками стиснутого повітря при подачі його через пластини, а також для аерації рідких

середовищ, що забезпечує їх перемішування і насичення газами. Область застосування - хлібозаводи, спиртові заводи та інші підприємства,

1.3. Інформаційні технології проектування процесів формоутворення деталей харчового машинобудування з порошкових та пористих матеріалів

Сучасний розвиток комп'ютерної техніки, чисельних методів та відповідного програмного забезпечення призвело до того, що всі етапи проектування складних технологічних процесів проводяться з використанням методів інформаційних технологій. Застосування комп'ютерного моделювання дозволяє вибрати оптимальні режими і схеми отримання виробів, знизити витрати і уникнути проведення дорогих натурних експериментів. Метою моделювання процесів деформування порошків і пористих тіл є визначення оптимальних технологічних параметрів, які дозволять отримувати вироби з високими експлуатаційними властивостями.

1.3.1. Специфіка порошкових і пористих матеріалів

Характерною особливістю порошкових і пористих матеріалів є можливість незворотно деформуватися під дією гідростатичного тиску в умовах відсутності поверхонь, вільних від нормальних навантажень. До таких схем деформування відносяться ущільнення в прес-формах з жорсткими стінками, пресування в закритому штампі, гідростатичне стиснення та інші. Чисельні експерименти показують, що при помірних швидкостях навантаження і температурах процеси деформування дисперсних середовищ можна розглядати як пластичні. В результаті пластичної деформації відбувається одночасне зміцнення матеріалу твердої фази тіла, що ущільнюється. У той же час, між порошками і пористими тілами існує низка відмінностей.

Ущільнення порошків відбувається в кілька етапів. Спочатку переважає зміна об'єму за рахунок взаємного переміщення частинок порошку, а потім - за

рахунок їх пластичної деформації. При ущільненні спечених пористих матеріалів перших етап відсутній.

Порошкові матеріали, на відміну від пористих тіл, не чинять опір розтягуючим навантаженням.

1.3.2. Методи обчислювального моделювання процесів деформування дисперсних середовищ

При моделюванні процесів деформування порошкових і пористих середовищ існує два підходи: дискретний і континуальний.

Дискретний підхід розглядає взаємодію між окремими елементами (частинками) дисперсного середовища. Він реалізований в методі дискретних елементів (Discrete Element Method, DEM) і застосовується при дослідженнях ущільнення порошків [17 - 24].

Моделювання методом дискретних елементів дозволяє отримати інформацію про траєкторії окремих частинок, силах, які на них діють, що, в свою чергу, дозволяє краще розуміти процеси деформування. Модель взаємодії між частинками може бути різною і залежить від особливостей процесу і властивостей дисперсного середовища.

Метод дискретних елементів не має недоліків континуального підходу, пов'язаних з порушенням суцільності тіла, що деформується, він дозволяє моделювати поведінку багатокomпонентних середовищ.

Застосовуються також комбіновані методи моделювання, що поєднують дискретний і континуальний підходи [25 - 31]. Ці методи розглядають дисперсне середовище як сукупність частинок. У той же час деформування самих частинок моделюється на основі континуального підходу (методом скінчених елементів).

До недоліків розглянутих методів можна віднести великі обчислювальні витрати, складність визначення необхідних для проектування технологічних процесів характеристик, обмеженість застосування (використовується для

порошків). Тому основним підходом при моделюванні процесів деформаційної обробки порошкових матеріалів є континуальний підхід, який розглядається далі.

1.3.2.1. Реологічні моделі процесів пластичного деформування порошкових та пористих матеріалів

Вводячи континуальні уявлення, виходять з того факту, що механічна поведінка порошків є масштабно чутливою - поведінка окремої частинки порошку не представляє поведінку усієї порошкової маси [32]. На відміну від окремих частинок порошку, пластична деформація яких відбувається без зміни об'єму, зовнішнє навантаження усієї сукупності частинок супроводжується значними незворотними об'ємними змінами, тобто порошкове та пористе тіла можна розглядати як середовище, що пластично стискається. Найменший об'єм ансамблю, в якому контактують між собою частинки порошку і який відтворює поведінку усієї порошкової маси, називають репрезентативним елементом. Його об'єм, як правило, на декілька порядків менший за об'єм усієї порошкової маси. Передбачається, що увесь об'єм порошку може бути складений з репрезентативних елементів. Локальні характеристики порошкового середовища, такі як густина, температура, тензори напружень, швидкості переміщень та інші вводяться відповідно до канонів суцільного середовища з обмовкою, що під точкою порошкового середовища мається на увазі не окрема частинка порошку, а репрезентативний елемент.

Формулювання співвідношень теорії пластичності порошкових і пористих тіл ґрунтується на двох підходах. Перший базується на використанні міркувань про монотонні процеси навантаження, другий - пов'язаний із уявленням про швидкість дисипації та дисипативний потенціал. У першому підході для опису процесів навантаження в механіці деформацій використовують абстрактний простір, що дістав назву простору Хея – Вестергаарда (рис.1.14). Він породжується прямокутною системою декартових координат, осі якої мають той же напрям, що і головні осі тензору напружень.

Основними елементами простору Хей–Вестергаарда є:

- гідростатична вісь, яка є одночасно трисектрисой тригранного кута, утвореного головними напрямками тензора напружень;
- октаедрична або девіаторна площина, перпендикулярна гідростатичній осі і така, що проходить через початок координат;
- меридіональний переріз, який містить гідростатичну вісь і початок координат, що співпадає з точкою, в якій відсутні напруження.

Усі точки гідростатичної осі відповідають стану всебічного стиснення або всебічного розтягування. Важливу роль для інтерпретування уявлення про траєкторію навантаження грає і меридіональна площина, де процеси навантаження для ізотропних матеріалів зручно інтерпретувати за допомогою перших двох інваріантів напруженого стану.



Рис. 1.14. Основні елементи простору Хей–Вестергаарда

На рис.1.14 використані головні значення тензору напружень: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, перший інваріант цього тензору $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$, який називають середнім, гідростатичним або кульовою складовою напруженого стану, а також другий інваріант девіатору напружень $\tau = \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$.

Кожній реальній траєкторії навантаження твердого тіла, що деформується, в просторі Хейя–Вестергаарда відповідає деяка монотонна крива, що виходить із початку координат (рис.1.15).

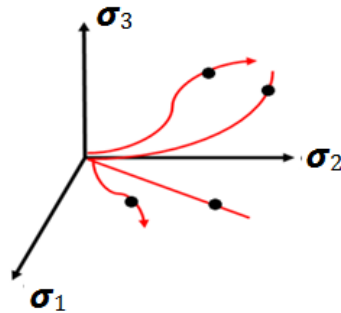


Рис. 1.15. Траєкторії навантаження та точки переходу матеріалу з пружного стану до пластичного

Перехід від пружного стану до пластичного ілюструється в просторі Хейя–Вестергаарда деякою точкою на кривій навантаження. Продовження процесу навантаження матеріалів після досягнення даної точки супроводжується незворотними внутрішніми змінами, пов'язаними з еволюцією їх структури та властивостей. Для їх відображення у континуальних моделях вводяться внутрішні змінні або внутрішні параметри. Для порошоків і пористих матеріалів однією з таких змінних є пористість. Інші внутрішні змінні можуть бути пов'язані з фізичним зміцненням матеріалу частинок, характером зв'язку між ними, присутністю частинок з різними властивостями та міжфазними межами. Якщо йдеться про матеріали, об'єм яких може змінюватися незворотно, така точка існує для будь-якої монотонної кривої навантаження. Фіксуючи ці точки у просторі Хейя–Вестергарда, можна отримати сукупність точок, що визначають деформаційний фазовий перехід від пружного стану до пластичного. Якщо усі такі точки поєднати в просторі Хейя–Вестергарда, заповнивши його траєкторіями навантаження за усіма напрямками, можна отримати геометричне місце точок, яке називається поверхнею текучості. Іншими словами, поверхня текучості - це безліч

усіх меж текучості, що досягаються за монотонних навантажень, що виходять з точки $(0, \dots, 0)$ у просторі напружень, при збереженні внутрішніми параметрами одних і тих же значень. За умови, що границя текучості здолана, а матеріал продовжує знаходитися під дією напруження, що змінюється, у ньому відбудуватиметься зміна внутрішніх змінних, які, у свою чергу, можуть призводити до зміни границі текучості. У таких умовах поверхня текучості не є фіксованою. У цьому випадку для означення поверхні текучості, що переміщується, використовують термін поверхня навантаження. Сам процес переміщення точок або усієї поверхні називають у механіці процесом деформаційного зміцнення.

Для ізотропних матеріалів, що незворотно стискаються, властивості яких не чутливі до впливу третього інваріанту, поверхня навантаження є опуклою, замкненою, а також є поверхнею обертання відносно гідростатичної осі.

У тому випадку, коли властивості матеріалів чутливі до впливу третього інваріанту, поверхня навантаження не є поверхнею обертання відносно гідростатичної осі, хоча і залишається симетричною відносно неї.

З урахуванням наведеного вище для матеріалів першого типу рівняння поверхні навантаження може бути задане у вигляді співвідношення

$$F(p, \tau, \theta, \chi_k) = 0, \quad (1.1)$$

де θ - пористість, χ_k - інші внутрішні змінні.

Для формулювання теорії пластичності одного лише рівняння поверхні навантаження мало. Необхідно знати, яким чином напружений стан впливає на зміну конфігурації. Оскільки пластична течія є незворотним процесом, зміна конфігурації описується швидкостями деформацій. Тому необхідно встановити зв'язок між напруженнями і швидкостями деформацій, який носить назву визначальних співвідношень. З цією метою у макроскопічних моделях поведінки матеріалів, які незворотно деформуються, зокрема у теорії пластичності,

припускають існування такої функції $D = D(e, \gamma, \theta, \chi_k)$, яка задовольняє співвідношенням

$$p = \frac{\partial D}{\partial e}, \quad \tau = \frac{\partial D}{\partial \gamma}, \quad (1.2)$$

де $e = e_1 + e_2 + e_3$ - перший інваріант тензору швидкостей деформацій, фізичний зміст якого - швидкість зміни об'єму; $\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}$ - другий інваріант девіатору швидкостей деформацій, що характеризує швидкість зміни форми. Рівняння (1.2) дають підстави називати цю функцію дисипативним потенціалом. Крім того, під час пластичної течії, на відміну від лінійно- і нелінійно-в'язких, має місце співвідношення

$$D = \frac{\partial D}{\partial e} e + \frac{\partial D}{\partial \gamma} \gamma. \quad (1.3)$$

Як було встановлено в роботах [33–35], усі сформульовані вище припущення дозволяють зробити висновок про існування функції

$$\Phi(p, \tau, \theta, \chi_k) = 0, \quad (1.4)$$

яка, за допомогою невизначеного множника λ дозволяє виразити інваріанти швидкостей деформацій у формі

$$e = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial p}, \quad \gamma = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \tau}. \quad (1.5)$$

Наведене співвідношення свідчить, що ця функція може розглядатися як псевдопотенціал. Сама ж функція дістала назву пластичний потенціал. Його

форма визначається виглядом дисипативного потенціалу і його властивостями. Ключова роль пластичного потенціалу в теорії пластичності полягає в тому, що він є джерелом визначальних рівнянь, тобто таких рівнянь, які визначають співвідношення між швидкостями деформацій і напруженим станом.

$$F = \Phi \quad (1.6)$$

Відхилення від цієї рівності, що відзначаються деякими дослідниками, зазвичай пов'язуються з накопиченням похибки експериментального аналізу або з відхиленнями від закону Гука, які можуть спостерігатися при переході пружно-пластичної межі.

Численні експериментальні дані, а також аналіз пластичної деформації з точки зору термодинаміки незворотних процесів накладають обмеження на вигляд і особливості поверхні навантаження. Зокрема, така поверхня має бути опуклою і замкненою. Ці її особливості покладаються в основу вибору та обґрунтування математичних процедур, пов'язаних з оцінкою напружено-деформованого стану, а також визначення еволюції і розподілу внутрішніх параметрів, що характеризують властивості виробів, які отримують.

Зрозуміти чутливість властивостей матеріалів до третього інваріанту тензора напружень можна за допомогою геометричних образів (рис.1.16).

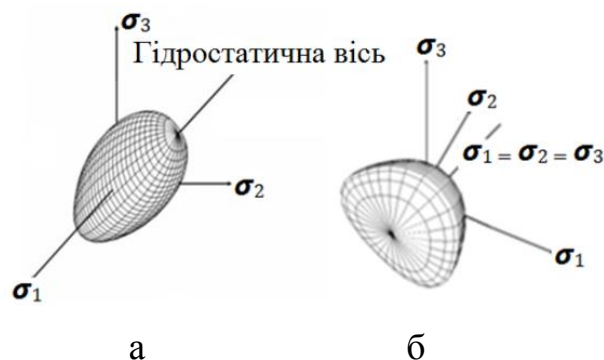


Рис. 1.16. Поверхні навантаження, що відповідають матеріалам, чий властивості не чутливі (а) та чутливі (б) до третього інваріанту тензора напружень

Відмінність добре спечених порошкових матеріалів від слабоспечених і порошоків [36,37] ілюструється рис.1.17. Для інтерпретації властивостей порошкових матеріалів використовувалася меридіанальна площина (площина $p-\tau$).

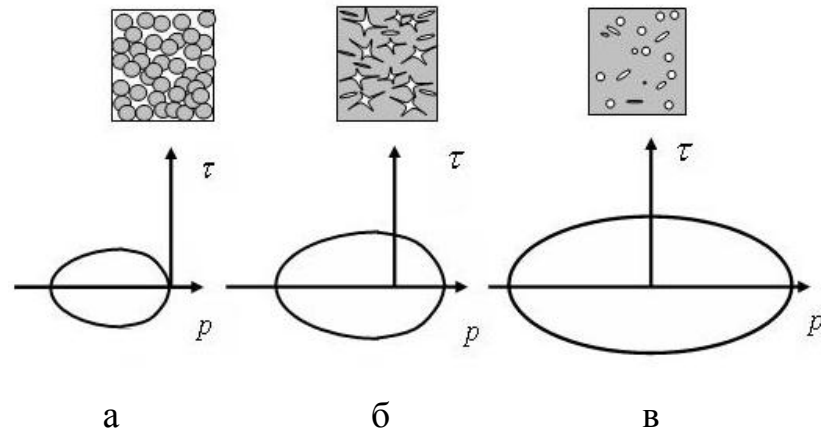


Рис. 1.17. Геометрична інтерпретація чутливості форми поверхні навантаження до внутрішньої зв'язності тіл, що деформуються: а - неспечений порошок; б - слабоспечене пористе тіло; в - спечене пористе тіло

Зокрема, контури навантажень, що відповідають певним породам піску і алюмінію встановлені в роботі [38]. Тут інтенсивність дотичних напружень і гідростатичний тиск представлені в нормованій формі (віднесені до всебічного стиснення) (рис.1.18).

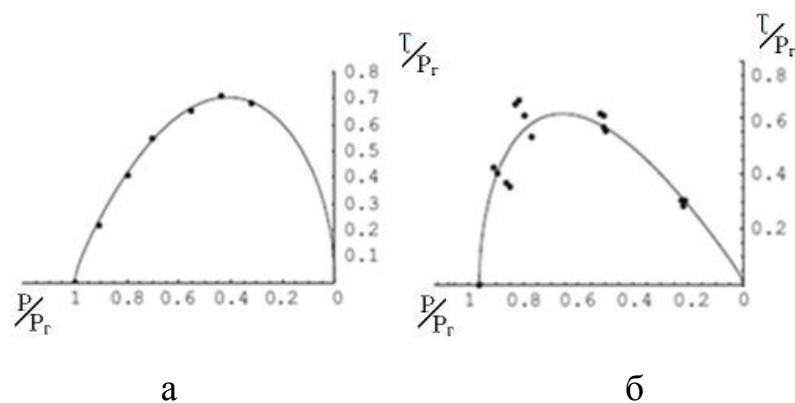


Рис. 1.18. Поверхні навантаження [38] порошку алюмінію (а) та піску (б); P_Γ - величина гідростатичного тиску при всебічному стисненні

Наведені дані на рис.1.18 підкреслюють ту обставину, що порошки не чинять опір розтягуючим навантаженням. Відповідно контури навантаження у меридіанальній площині для порошків розміщені переважно лівіше за нульове значення гідростатичного тиску (рис.1.19).

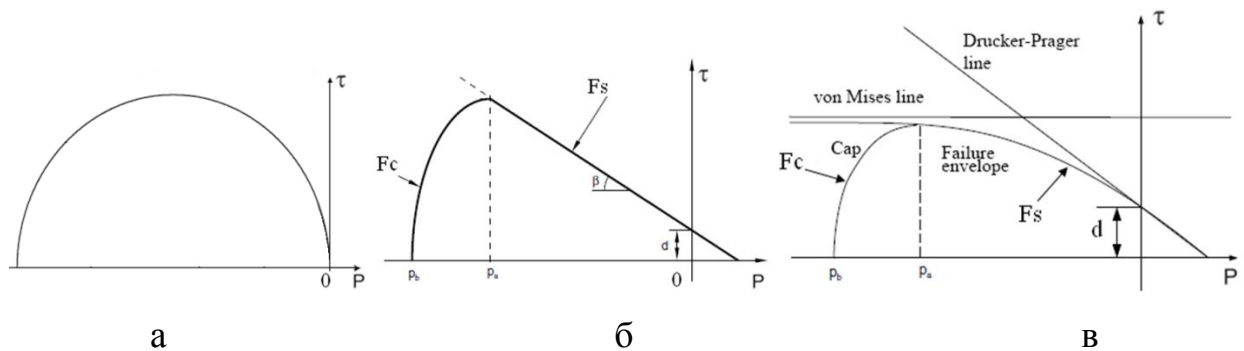


Рис. 1.19. Поверхні навантаження порошків: а - Cam - Clay [39,40];
б - Drucker - Prager - Cap [41-43]; в - DiMaggio - Sandler [44,45]

Спечені порошкові матеріали чинять опір розтягуючим навантаженням, тому контури навантаження таких матеріалів розташовуються як в області стиснення, так і в області напруг, що розтягують (рис.1.20). У той же час наявність недосконалих контактів обумовлює відмінність опору розтягування і стиснення.

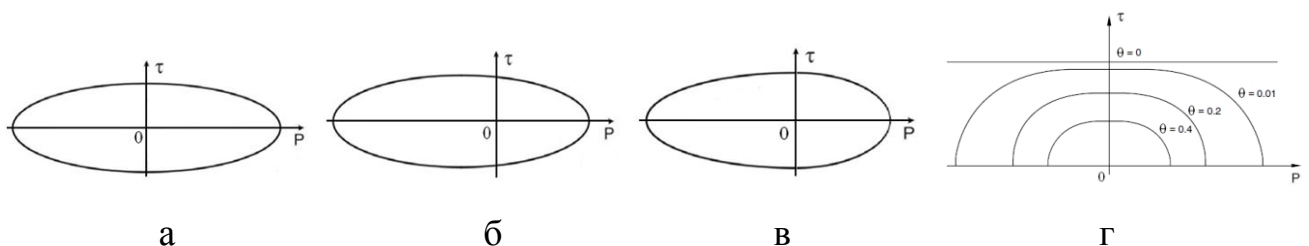


Рис. 1.20. Поверхні навантаження пористих тіл:
а - симетричний еліпс [46-52]; б - еліпс, зміщений в область стиснення [53];
в - поєднання двох еліпсів [54], г - Гурсона (Gurson) [55]

Різностійкість пористих тіл розтягуванню і стисненню можна враховувати за рахунок зміщення контура навантаження по осі гідростатичного тиску в бік стиснення (рис.4, б). Також можливе застосування критерію пластичності, контур навантаження якого складається з двох різних напівеліпсів, відповідних областям розтягування і стиснення (рис.4, в).

1.3.2.2. Континуальні аспекти

Найбільш поширеним методом моделювання при вирішенні задач деформування компактних, порошкових і пористих матеріалів є метод скінчених елементів (Finite Element Method, FEM). Метод передбачає заміну безперервних функцій їх дискретним аналогом - сукупністю кусочно - безперервних функцій, які визначені на кінцевому числі підобластей - скінчених елементах [56-60]. Досліджувана область розбивається на кінцеве число елементів, що мають спільні вузлові точки. Значення досліджуваної функції задаються у вузлах кінцевих елементів, а всередині елементів визначаються за допомогою апроксимуючих функцій. Найчастіше використовують апроксимуючі функції у вигляді лінійних, квадратичних або кубічних поліномів. Рівняння методу скінчених елементів можуть бути отримані на основі варіаційних або проекційно - сіткових методів.

Метод скінчених елементів має ряд переваг:

- універсальність, тобто можливість вирішувати практично будь-які крайові задачі;
- геометрична форма досліджуваного об'єкта може бути складною;
- можливість використання нерівномірного скінчено - елементного розбиття (більш дрібні елементи створюють в місцях найбільшої зміни досліджуваних функцій, а більш великі - в місцях, де особлива точність не потрібна);
- можна задавати різні властивості скінчених елементів в різних областях досліджуваного тіла (наприклад, при деформації біметалевих заготовок).

До недоліків методу відносяться:

- залежність результатів розрахунку від проведеної просторової дискретизації і типу обраних апроксимуючих функцій;

- спотворення форми скінчених елементів і, як результат, необхідність перебудови скінчено - елементної моделі при великих деформаціях.

При реалізації методу скінчених елементів застосовуються різні підходи до опису руху середовища, що деформується: лагранжевий, ейлеровий і лагранжево - ейлеровий [61,62]. При використанні лагранжевого підходу вузлові точки скінчених елементів переміщуються разом з точками матеріального середовища. В ейлеровому підході сітка скінчених елементів нерухома, відбувається течія матеріалу крізь сітку скінчених елементів. Змішаний лагранжево - ейлеровий підхід передбачає незалежний рух скінчених елементів і матеріалу тіла, що деформується. Рух сітки скінчених елементів задається таким чином, щоб зменшити її спотворення при великих деформаціях. Матеріал середовища може перетікати через скінчені елементи, що призводить до необхідності враховувати додаткові члени в рівняннях збереження.

Метод скінчених елементів широко застосовується при моделюванні процесів деформаційної обробки порошкових [63-67] і пористих [68-72] виробів.

Останнім часом в рамках континуального підходу з'явилися і успішно розвиваються нові методи моделювання, які не використовують побудову сітки скінчених елементів. Функції форми при такому підході залежать тільки від положення вузлових точок, що дозволяє виключити труднощі, пов'язані з спотвореннями сіток скінчених елементів. Безсітковий метод (Mesh-free method) був застосований при моделюванні процесу пресування порошкових виробів в роботах [73,74]. Проте, цей метод не знайшов достатнього поширення в області проектування отримання виробів з порошкових і пористих матеріалів. У більшості поширених програм використовується метод скінчених елементів.

1.3.3. Методи цифрового відображення закономірностей процесів формоутворення при виготовленні деталей з порошкових та пористих матеріалів

На даний момент створено цілий ряд універсальних програм, в яких використовується метод скінчених елементів. За допомогою цих програм можна моделювати процеси деформування різних матеріалів, зокрема порошкових і пористих. Розглянемо найбільш поширені з них.

1. ABAQUS - універсальна система загального призначення. Вона використовується як для проведення багатоцільового інженерного аналізу, так і для науково-дослідних і навчальних цілей. Імплементовані в систему моделі Drucker - Prager - Cap та Cam - Clay застосовуються при моделюванні ущільнення порошків (рис.1.21,а), а модель Гурсона - при моделюванні деформації пористих заготовок.

2. DEFORM 3D - спеціалізований інженерний програмний комплекс. В основному застосовується при розробці процесів обробки тиском компактних матеріалів, термічній і механічній обробці. Можна також моделювати процеси деформування пористих матеріалів (рис.1.21,б), так як в програму імплементована модель Шими (Shima) [52].

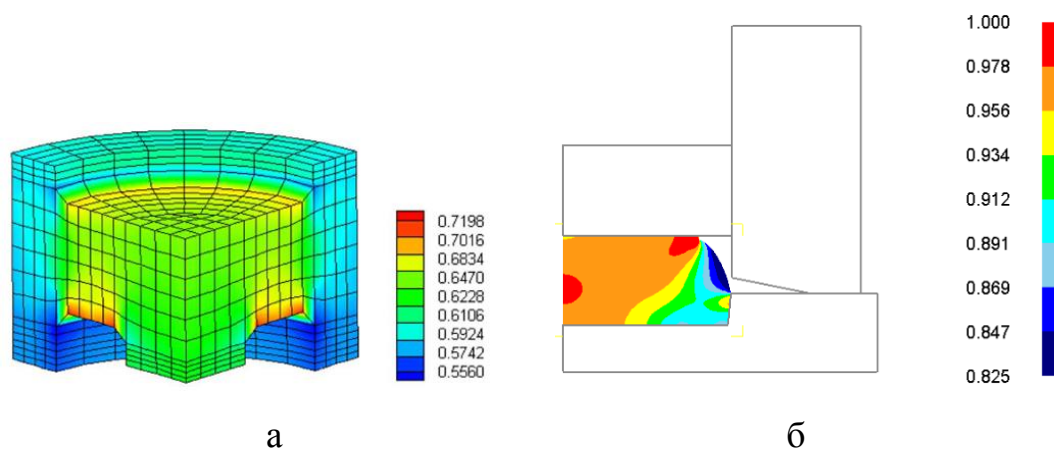


Рис. 1.21. Розподіл відносної щільності при:
а - пресуванні [75]; б - штампуванні [70]

До переваг програми слід віднести можливість автоматичної перебудови сітки скінчених елементів, що дозволяє моделювати складні процеси формозміни.

3. LS-DYNA - багатоцільова програма. Дозволяє вирішувати складні динамічні нелінійні задачі деформування твердих тіл, механіки рідини і газу, а також теплопереносу. Програма використовується в пакетах ANSYS, MD NASTRAN та інших. LS-DYNA широко застосовується при моделюванні традиційних технологій обробки металів тиском. У програму включений цілий ряд моделей, що дозволяють досліджувати процеси ущільнення порошкових матеріалів: Drucker - Prager - Cap, Cam - Clay, Brandt - Nilsson (рис.1.22,а) та Geologic-Cap (рис.1.22,б). При великих деформаціях і виникненні спотворень сітки скінчених елементів реалізована можливість її автоматичної перебудови.

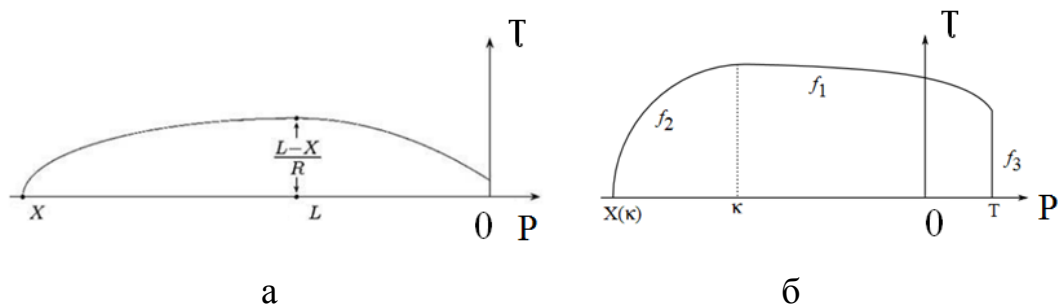


Рис. 1.22. Поверхні навантаження порошків: а - Brandt - Nilsson [76];
б - Geologic-Cap [77]

4. MARC - універсальна система, що дозволяє проводити комплексний аналіз впливу силових і теплових навантажень. Можливо врахування великих переміщень і деформацій, нелінійних властивостей матеріалів, складної контактної взаємодії. У програму включена модель Шими, що робить можливим моделювати процеси деформування матеріалів, що ущільнюються.

5. ANSYS - універсальна програмна система, що дозволяє вирішувати лінійні і нелінійні, стаціонарні і нестаціонарні задачі механіки деформуємого твердого тіла, задачі механіки рідини і газу, теплопередачі і теплообміну, електродинаміки,

акустики. У програмі реалізована модель порошкових матеріалів Drucker - Prager - Cap.

Сучасні програми моделювання методом скінченних елементів мають засоби побудови геометричних і скінчено - елементних моделей; задання властивостей матеріалів, початкових і граничних умов; візуалізації результатів моделювання. Вони можуть використовувати геометричні моделі CAD - систем (CATIA, Pro/ENGINEER, SolidEdge, SolidWorks, Autodesk Inventor та інші), а також скінчено - елементні моделі інших програм, наприклад FEMAP та GID.

Крім того, існує можливість імплементувати нові моделі матеріалів за допомогою підпрограм, які написані користувачем.

Висновки і постановка завдань досліджень

На підставі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. У харчовій промисловості використовується велика різноманітність деталей машин і апаратів. Їх можна класифікувати по цілому ряду ознак.

2. Характерною особливістю машин і апаратів харчової промисловості є наявність деталей, що безпосередньо контактують з сировиною або харчовими продуктами.

3. Середовища, в яких працюють деталі машин і апаратів, можуть бути різними, у тому числі сильно агресивними. Специфічні умови харчових виробництв визначають особливі вимоги до деталей технологічного обладнання. Матеріали для виготовлення деталей повинні бути стійкими до дії оброблювальних середовищ, а також не чинити негативний вплив на харчовий продукт.

4. У процесі експлуатації відбувається зношування деталей машин і апаратів, тому проблема підвищення зносостійкості деталей є актуальною. Вирішення цієї проблеми можливе на основі застосування сучасних ресурсозберігаючих технологій.

5. Успішний розвиток машинобудування можливий тільки на основі впровадження ефективних ресурсозберігаючих технологій. До числа ресурсозберігаючих технологій відносяться методи порошкової металургії, які мають ряд переваг, які дозволяють їм витіснити більш дорогі способи обробки металів: лиття, ковку та штампування, а також механічну обробку.

6. Запропонований ряд типових деталей машин і апаратів харчової промисловості, що доцільно отримувати методами порошкової металургії.

7. При моделюванні процесів деформування порошкових і пористих середовищ існує два підходи: дискретний і континуальний. Основним підходом є континуальний підхід.

8. Моделі пластичної течії порошків і пористих тіл відрізняються і відображають той факт, що пористі тіла чинять опір навантаженням розтягування, а порошки - ні.

9. Найбільш поширеним методом моделювання при вирішенні задач деформування порошкових і пористих матеріалів є метод скінчених елементів, який реалізований у ряді універсальних програмних систем. В сучасні програми імплементовані моделі порошкових і пористих тіл, що дає можливість моделювати процеси деформування дисперсних середовищ. Однак для порошків і пористих тіл застосовуються різні моделі пластичної течії, що викликає ряд незручностей при моделюванні. До того ж, не у всіх програмах зазначені моделі реалізовані одночасно.

Тому задача розроблення методів проектування ресурсозберігаючих технологій виготовлення деталей обладнання харчових виробництв є актуальною.

Недооцінка їх внеску у моделі деформування порошкових середовищ небажана, оскільки саме вони протягом деформування можуть сприяти неконтрольованому концентруванню недосконалостей, викликаючи згодом виникнення розшарувальних щілин із подальшим руйнуванням виробу ще під час його отримання.

Різноманітність експериментальних даних свідчить про присутність досить великої кількості механізмів течії і руйнування матеріалів, що отримуються технологіями порошкової металургії. Тут матеріал від сипкого стану, при якому він втрачає здатність чинити опір розтягуванню, у ході деформації такої здатності набуває.

Із наведеного випливає, що одним із завдань сучасної континуальної теорії пластичності пористих тіл є доповнення її параметрами, використання яких дасть змогу коректно, з точки зору механіки континууму, враховувати наведені особливості поведінки, притаманні порошкам та пористим тілам під час отримання виробів.

Природньо, що при цьому потрібно ясно уявляти фізичний зміст нових параметрів, забезпечуючи, щоб такі удосконалення відповідали відомим експериментальним даним.

У роботах [54, 80] було модифіковано рівняння поверхні навантаження, спочатку запропоноване в [47-50]. А саме, воно було представлено у вигляді

$$F = \frac{(p - p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} - \tau_s^2 = 0, \quad (2.1)$$

де φ і ψ - матеріальні функції, залежні від пористості, p_0 - значення гідростатичної компоненти напруженого стану, за якої об'єм пористого матеріалу не змінюється, τ_s - границя текучості матеріалу порошку або твердої фази пористого тіла. У роботі [80] у модель були введені нові параметри, після чого

вирази для матеріальних функцій були змінені в порівнянні з [47–50] наступним чином:

$$\psi_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{(1-\theta)^3}{\theta}; \quad (2.2)$$

$$\varphi = \frac{1}{(1+m)^2} \cdot (1-\theta)^3 \cdot (1-|2 \cdot a - 1|)^2; \quad (2.3)$$

$$\psi_1 = 4(1-\theta)\psi_0 \cdot \frac{(1-a)^2}{(1+m)^2}; \quad (2.4)$$

$$\psi_2 = 4(1-\theta)\psi_0 \cdot \frac{a^2}{(1+m)^2}; \quad (2.5)$$

$$p_0 = \tau_s \sqrt{1-\theta} \sqrt{\psi_0} \cdot \left(\frac{1-m-2 \cdot a}{1+m} \right); \quad (2.6)$$

$$\psi = \frac{1}{2}(1 - \text{Sign}(p - p_0))\psi_1 + \frac{1}{2}(1 + \text{Sign}(p - p_0))\psi_2 \quad (2.7)$$

Загальний зв'язок між напруженнями і швидкостями деформацій в покомпонентній формі визначається законом течії (1.5), що асоціюється з рівнянням пластичного потенціалу у формі

$$\sigma_{ij} = \frac{\tau_s \cdot \varphi}{w} \left[e_{ij} + \left(\frac{\psi}{\varphi} - \frac{1}{3} \right) \cdot e \cdot \delta_{ij} \right] + p_0 \cdot \delta_{ij} \quad (2.8)$$

З вираження для питомої швидкості дисипації енергії, а також гіпотези, що ця енергія розсіюється лише у зв'язку з пластичною деформацією, впливає кінетичне рівняння для накопичення деформацій. Аналогічно тому, як це пропонувалося в [81], деформаційне зміцнення твердої фази можна враховувати за допомогою рівняння (2.9)

$$w = \frac{\sqrt{\gamma^2 \varphi + e^2 \psi}}{\sqrt{1-\theta}} + \frac{p_0}{\tau_s} \cdot \frac{e}{1-\theta} \quad (2.9)$$

Безпосередньо із закону збереження маси еволюційне рівняння для пористості має вигляд:

$$\frac{d\theta}{dt} = (1-\theta)e \quad (2.10)$$

У модель введені нові параметри a і m . Розглянемо їх фізичний зміст і геометричну інтерпретацію. Для того, щоб визначити фізичний зміст, спочатку розглянемо випадок, коли дотичне напруження відсутнє і матеріал піддається всебічній дії. Тоді рівняння (2.1) трансформується до вигляду

$$\frac{(p-p_0)^2}{\psi} - \tau_s^2 = 0 \quad (2.11)$$

За всебічного стиснення $p < 0$. Тому $\psi = (1-\theta)\psi_0 \left(\frac{2-2a}{1+m}\right)^2$ і границя текучості на всебічний тиск буде визначена виразом

$$p_1 = p^- = -\sqrt{1-\theta}\tau_s\psi_0 \quad (2.12)$$

Тут верхнім індексом (-) позначена границя текучості на всебічне стиснення. Аналогічний аналіз для умов всебічного розтягу дає результат

$$p_2 = p^+ = -\frac{1-m}{1+m}p^- \quad (2.13)$$

Верхнім індексом (+) позначена границя текучості на всебічне розтягування. Звідси слідує вираження для m

$$m = \frac{p^- + p^+}{p^- - p^+} \quad (2.14)$$

Помітимо, що p^- за визначенням від'ємна, тоді як p^+ - додатна. Якщо вказані величини рівні між собою за абсолютною величиною, то $m = 0$. Це свідчить, що опори матеріалу розтягуванню і стисненню рівні між собою. В той же час, якщо матеріал не чинить опір деформації в умовах всебічного розтягування, $m = 1$. Аналогічним шляхом вдається отримати вираз і для параметра a (2.15).

$$a = \frac{-p_0 + p^+}{-p^- + p^+} \quad (2.15)$$

У загальному випадку вплив різних поєднань матеріальних параметрів a , m і θ на положення контура навантаження наведено на рис.2.2. Якщо границі текучості на розтяг та стиснення рівні між собою за абсолютною величиною та $p_0 = 0$, рівняння (2.1) трансформується до вигляду, в якому воно було запропоноване в [47-50]. Параметр m характеризує якість контактів порошкового тіла. За умови, що $m = 0$, недосконалі контакти між частинками порошку відсутні, що відповідає ілюстрації на рис.1.17,в і контур навантаження симетричний відносно початку координат. Зі збільшенням параметра m відбувається зміщення контуру поверхні навантаження уздовж гідростатичної осі у бік стискуючого напруження. Якщо $m = 1$, матеріал, що деформується, не чинить опір розтягуючим навантаженням, що ілюструється рис.1.17,а, а сам матеріал є сипким без зчеплення (контур поверхні навантаження проходить через початок координат).

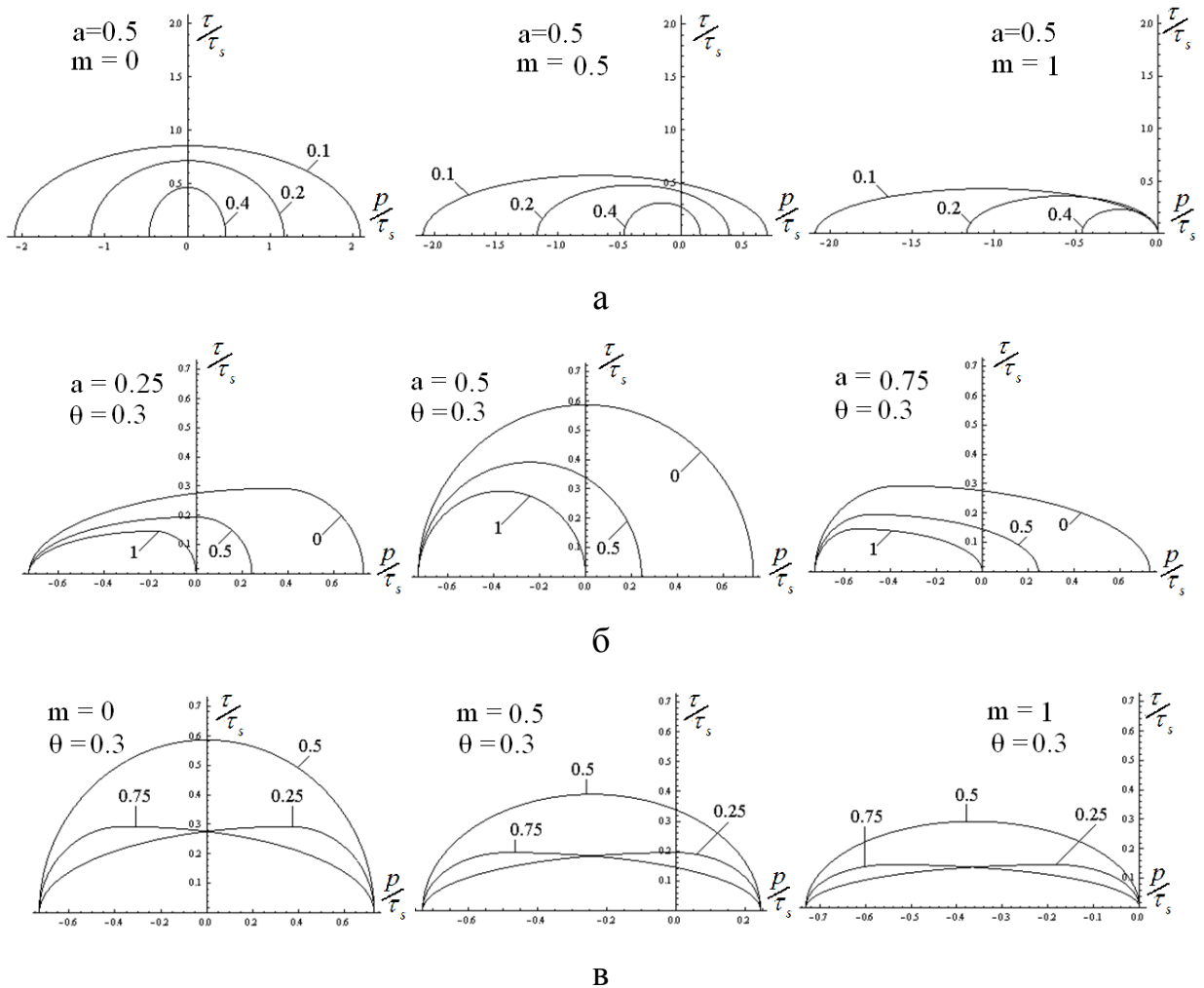


Рис.2.2. Вигляд поверхні навантаження, що відповідає різним значенням параметрів: $\theta = 0,1; 0,2; 0,4$ (а); $m = 0; 0,5; 1$ (б); $a = 0,25; 0,5; 0,74$ (в)

Слід зазначити роль параметра P_0 , який ділить діапазон зміни гідростатичного тиску на дві частини: зліва від цього параметру матеріал ущільнюється, справа розущільнюється. У цьому розумінні параметр a вказує на співвідношення цих областей. Зокрема, для моделей типу Drucker - Prager - Cap і DiMaggio - Sandler параметр $a > 0,5$, тобто переважає розущільнююча частина. Інша ситуація має місце у разі порошкового алюмінію [38]. Там, як свідчать дані, приведені на рис.1.18, переважає область ущільнення. Якщо $a = 0,5$ і $m = 0$, представлена модель перетворюється на модель типу [47-50], яка використовується для опису поведінки ідеально зв'язаних пористих тіл. Коли $a =$

0,5 і $m = 1$, співвідношення (2.1) - (2.7) відповідають моделі Cam - Clay, що описує незв'язані дисперсні системи.

Уявлення про контур поверхні навантаження може бути покладене в основу геометричної інтерпретації схем деформування порошкових і пористих тіл, яка використовується нижче. Приклад такої інтерпретації наведений на рис.2.3.

Наведена геометрична інтерпретація може бути використана для пояснення узагальнень, що характеризують модель, яка описується рівняннями (2.1) – (2.7).

У перших варіантах моделі, що фігурує у дослідженнях [47–50] впливом наведених ефектів нехтували. Тому для них справедливі рівності $m = 0$, $a = 0,5$.

Цій ситуації відповідає контур навантаження у вигляді еліпса, розташований у верхньому рядку зліва (рис.2.2).

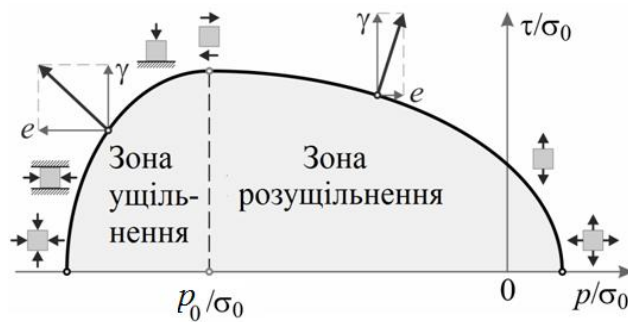


Рис. 2.3. Геометрична інтерпретація схем пресування порошків і деформування пористих тіл

З геометричної точки зору перехід від моделей [47-50] до узагальненої полягає у тому, що один еліпс замінюється двома, які мають спільну вертикальну вісь. Натомість горизонтальна складається з двох нерівних між собою осей, з чим і пов'язаний перехід від однієї функції ψ у роботах [47-50] до двох: ψ_1 і ψ_2 у рівняннях узагальненої моделі.

2.2. Аналітична модель деформування дисперсних матеріалів

2.2.1. Пластичне деформування

В основі чисельної реалізації задач моделювання процесів обробки металів тиском використовується один з найбільш відомих варіаційних принципів механіки - принцип віртуальних швидкостей. Відповідно до цього принципу, для будь-якого кінематично можливого поля швидкостей в довільний момент часу потужності внутрішніх і зовнішніх сил рівні (2.16).

$$\int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV = \int_S p_i v_i dS, \quad (2.16)$$

Рівняння (2.16) називають рівнянням віртуальних потужностей. Воно означає рівність потужностей внутрішніх сил (напружень σ_{ij}) в об'ємі тіла V на довільному (віртуальному) полі швидкостей і потужності зовнішніх сил на тому ж полі швидкостей [82].

Виходячи з варіаційного принципу, дійсне поле швидкостей будемо шукати як результат знаходження екстремуму функціоналу, що має вигляд:

$$J = \int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV - \int_S p_i v_i dS \quad (2.17)$$

З урахуванням визначальних співвідношень пластичної течії порошкових і пористих тіл рівняння (2.17) прийме вигляд:

$$J = \int_V \tau_s \left(\frac{\sqrt{\gamma^2 \varphi + e^2 \psi}}{\sqrt{1-\theta}} + \frac{p_0}{\tau_s} \cdot \frac{e}{1-\theta} \right) dV - \int_S p_i \cdot v_i dS, \quad (2.18)$$

де p_i - навантаження, прикладені на поверхні тіла, що деформується;

v_i - швидкості переміщення точок тіла, що деформується під дією навантажень p_i ;

V – об'єм тіла;

S – поверхня тіла.

Отримана в результаті знаходження екстремуму функціоналу (2.18) система диференціальних рівнянь замінюється дискретною скінчено-елементною моделлю, яка являє собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь [83]:

$$[K] \cdot \left\{ \dot{X} \right\} = \{P\} - \{P_0\}, \quad (2.19)$$

де $[K] = \sum_1^{N_e} \int_V [B]_{(e)}^T [D]_{(e)} [B]_{(e)} dV$ – глобальна матриця жорсткості системи;

N_e – кількість скінчених елементів;

V – об'єм елемента;

$\left\{ \dot{X} \right\}$ – стовпець вузлових швидкостей;

$\{P\}$ – стовпець вузлових зусиль;

$\{P_0\} = \sum_1^{N_e} [B]_{(e)}^T \{P_0\}_{(e)} dV$ – стовпець вузлових зусиль, відповідних величині

зміщення центру еліпсів, що апроксимують контур

поверхні навантаження уздовж осі p ;

$[B]_{(e)}$ - матриця, що зв'язує швидкості пластичних деформацій в елементі зі швидкостями переміщень його вузлів;

$[D]_{(e)}$ - матриця, що зв'язує компоненти напружень в елементі зі швидкостями деформацій. Вона визначається на основі співвідношень (2.8).

2.2.2. Пружно-пластичне деформування

При пружно-пластичній деформації порошкових і пористих матеріалів прирощення загальної деформації складається з суми пружних $d\xi_{ij}^e$ і пластичних $d\xi_{ij}^{pl}$ деформацій (2.20). Пружні деформації зворотні, а пластичні - незворотні.

$$d\xi_{ij} = d\xi_{ij}^e + d\xi_{ij}^{pl} \quad (2.20)$$

Прирощення пружних деформацій визначаються згідно із законом Гука (2.21).

$$d\xi_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{kk}) \delta_{ij} \quad (2.21)$$

Прирощення пластичних деформацій визначаються відповідно асоційованого з поверхнею течії (2.1) закону (течія відбувається в напрямку, що нормальний до цієї поверхні):

$$d\xi_{ij}^{pl} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}; \lambda > 0 \quad (2.22)$$

Відповідно, збільшення об'ємної деформації і деформації зсуву визначається виразами (2.23) та (2.24).

$$de^{pl} = \lambda \frac{\partial F}{\partial p} = \frac{2(p - p_0)}{\psi} \quad (2.23)$$

$$d\gamma^{pl} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \tau} = \frac{2\tau}{\phi} \quad (2.24)$$

Варіаційний функціонал і система рівнянь методу скінченних елементів для моделі пружно-пластичного деформування приймають вигляд (2.25) і (2.26).

$$J = \int_V \tau_s \left(\frac{\sqrt{\gamma^2 \varphi + e^2 \psi}}{\sqrt{1-\theta}} + \frac{\dot{p}_0}{\tau_s} \cdot \frac{e}{1-\theta} \right) dV - \int_S \dot{p}_i \cdot v_i dS, \quad (2.25)$$

$$[K] \cdot \{\dot{X}\} = \{\dot{P}\} - \{\dot{P}_0\} \quad (2.26)$$

2.3. Алгоритмічна модель

2.3.1. Процес пластичного деформування

Система рівнянь (2.19) є системою нелінійних алгебраїчних рівнянь відносно $\{\dot{X}\}$. В той же час глобальна матриця жорсткості $[K]$ залежить від координат вузлів $\{X\}$ скінчених елементів. Таким чином, дана система рівнянь являє собою також систему диференційних (за часом) рівнянь відносно $\{X\}$.

Система диференційних рівнянь вирішується методом кінцевих різниць. На часовому інтервалі $\Delta t = t_{m+1} - t_m$ координати вузлів скінченних елементів визначаються наступним чином

$$\{X\}_{m+1} = \{X\}_m + \int_{t_m}^{t_{m+1}} \left\{ [K]^{-1} (\{P\} - \{P_0\}) \right\} \cdot dt \quad (2.27)$$

При двошаровій апроксимації отримаємо [83-85]:

$$\begin{aligned} \Delta\{X\}_{m+1} = & (1 - \alpha) \cdot \Delta t \cdot [K]_m^{-1} (\{P\} - \{P_0\})_m + \\ & + \alpha \cdot \Delta t \cdot [K]_{m+1}^{-1} (\{P\} - \{P_0\})_{m+1} \end{aligned} \quad (2.28)$$

де $0 \leq \alpha \leq 1$, при обчисленнях вважали $\alpha = 0.5$.

Рішення задач деформування порошкових і пористих матеріалів виконувалося поетапно, методом послідовних навантажень. В якості першого наближення на кожному кроці використовувалося рішення задачі лінійно-в'язкої течії матеріалу, яке потім уточнювалося ітераційним методом. Ітераційний процес припинявся після того, як різниця між знайденими значеннями вузлових швидкостей ставала, в порівнянні з попередніми, меншою, ніж наперед задане мале число. Визначивши поле швидкостей, знаходили значення пористості, величини компонент напружено-деформованого стану та переходили на наступний етап навантаження. Схема алгоритмічної моделі пластичного деформування порошкових та пористих матеріалів наведена на рис.2.4.

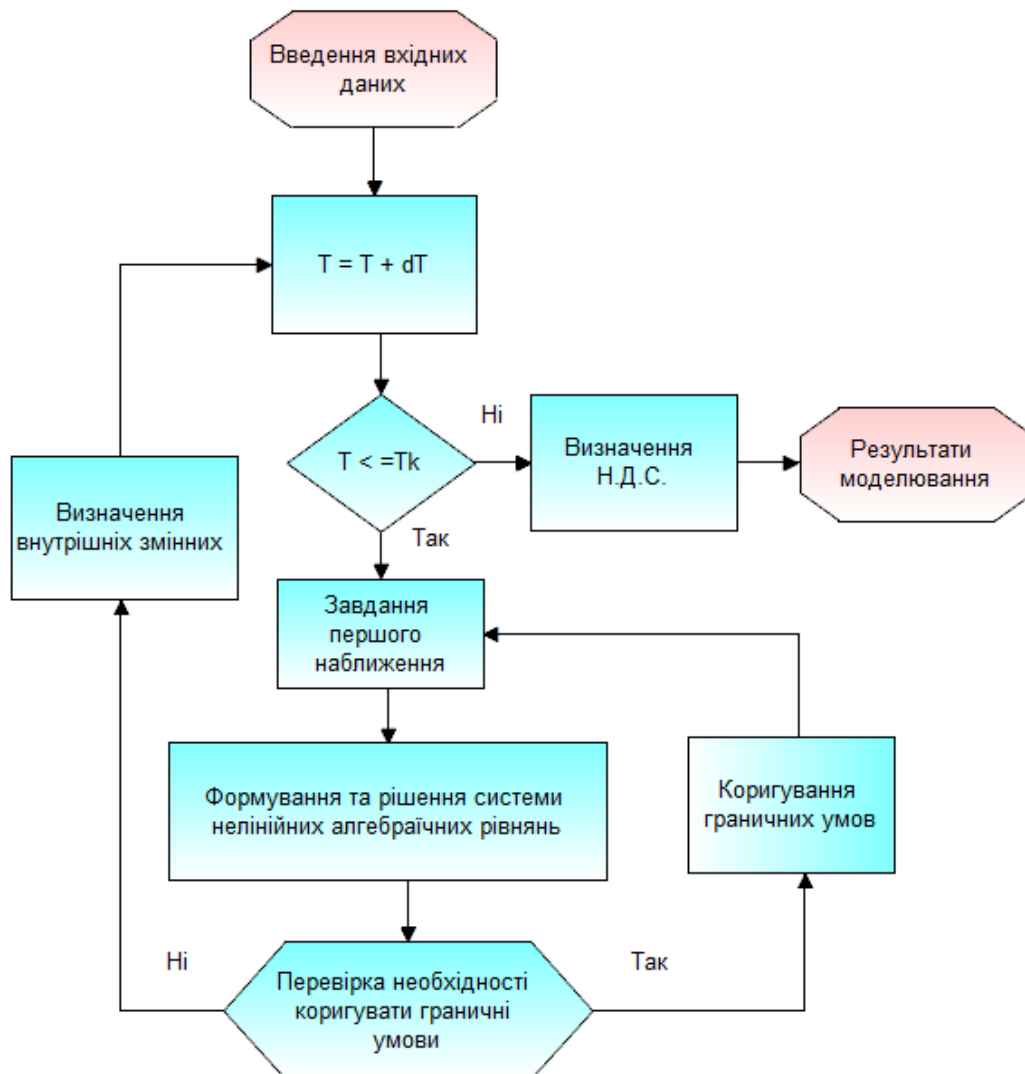


Рис. 2.4. Схема алгоритмічної моделі пластичного деформування

2.3.2. Процес пружно-пластичного деформування

Моделювання процесів деформування порошкових і пористих матеріалів також виконувалося методом послідовних навантажень. На кожному кроці навантаження визначалися напруги, причому вважали, що матеріал є пружним.

Потім обчислювали пластичний потенціал $F(\sigma_{ij})$ і, в залежності від його величини, проводили коригування напружень і матеріальних параметрів моделі.

Узагальнена модель пластичного деформування порошкових і пористих матеріалів була імплементована в програмні системи ABAQUS та LS-DYNA за допомогою підпрограм. Алгоритмічна модель цих підпрограм має вигляд:

1. Введення прирощення деформацій та поточних значень матеріальних параметрів моделі:

$$d\xi_{ij}^{n+1}, \sigma_{ij}^n, \theta^n, \omega^n$$

2. Визначення наближених значень прирощень напружень:

$$d\sigma_{ij}^* = E_{ij}^e d\xi_{ij}^{n+1}$$

3. Визначення наближених напружень:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^n + d\sigma_{ij}^*$$

4. Обчислюємо пластичний потенціал $F(\sigma_{ij})$.

Якщо $F(\sigma_{ij}) \leq 0$, коригування напружень і матеріальних параметрів не здійснюється.

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}, \theta^{n+1} = \theta^n, \omega^{n+1} = \omega^n$$

Виходимо з підпрограми

4. Якщо $F(\sigma_{ij}) > 0$, коригування напружень і матеріальних параметрів здійснюється:

4.1. Коригуємо збільшення пружних деформацій:

$$de^e = de^{n+1} - de^{pl} = de^{n+1} - \lambda \frac{\partial F}{\partial p}$$

$$d\gamma^e = d\gamma^{n+1} - d\gamma^{pl} = d\gamma^{n+1} - \lambda \frac{\partial F}{\partial \tau}$$

В результаті ітераційного рішення нелінійного рівняння $F(\sigma_{ij}(\lambda)) = 0$ визначаємо параметр λ .

4.2. Обчислюємо:

$$\sigma_{ij}^{n+1}, \theta^{n+1}, \omega^{n+1}$$

4.3. Виходимо з підпрограми.

Схема алгоритмічної моделі пружно-пластичного деформування наведена на рис.2.5.

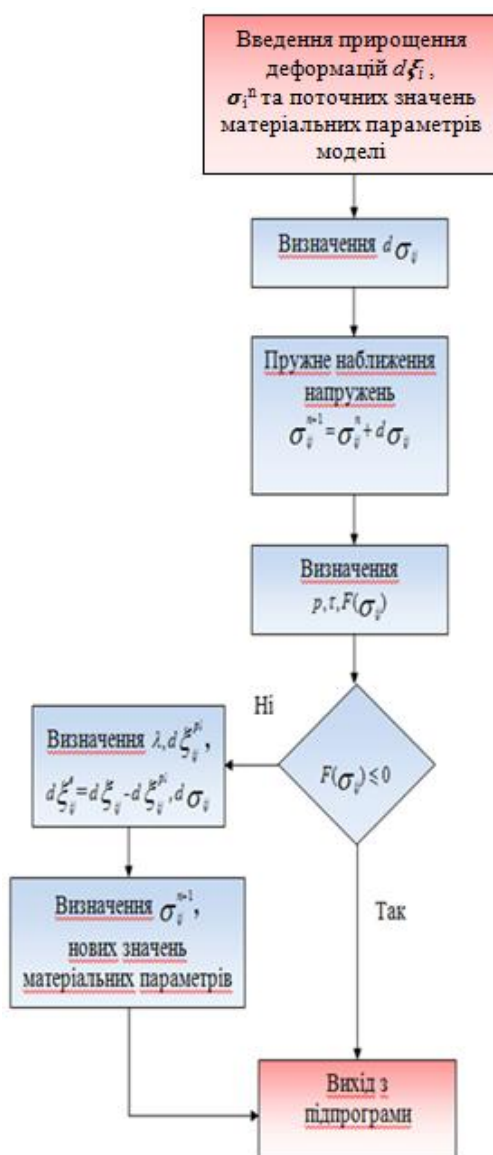


Рис.2.5. Схема алгоритмічної моделі пружно-пластичного деформування

Більш детально алгоритм корекції напруг і матеріальних параметрів матеріалу розглянутий у роботі [86], графічна ілюстрація цього алгоритму наведена на рис.2.6.

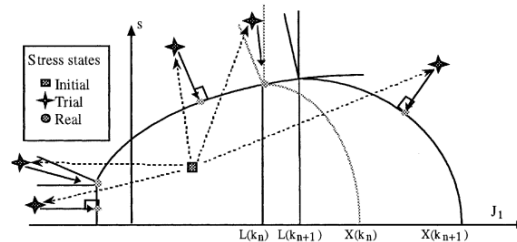


Рис.2.6. Графічна ілюстрація алгоритму корекції [86]

2.4. Цифрова модель

Алгоритмічні моделі були реалізовані у вигляді відповідних цифрових моделей. Схема цифрової моделі пластичного деформування порошкових і пористих матеріалів наведена на рис.2.7.

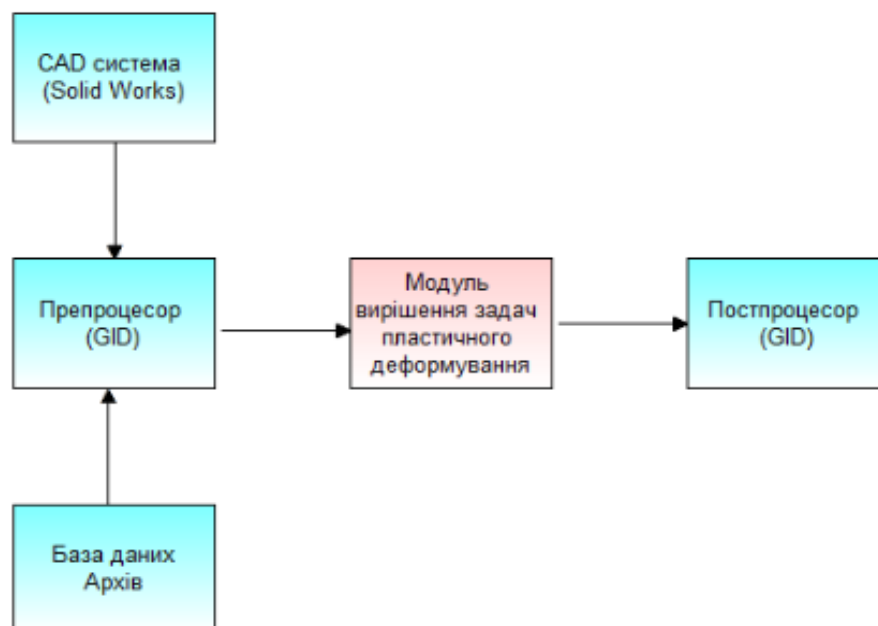


Рис. 2.7. Схема цифрової моделі пластичного деформування

Цифрова модель має наступні основні блоки: препроцесор, модуль моделювання та постпроцесор. Передбачена можливість введення геометричних моделей з CAD - систем та робота з базою даних.

В якості пре- і постпроцесора використовується програмний пакет GID [87].

Модуль вирішення задач пластичного деформування реалізований на алгоритмічній мові програмування C. При його розробці були використані та модифіковані окремі модулі програми [88]. При проведенні обчислювальних експериментів геометричну модель створювали в програмі SolidWorks [89].

Цифрова модель пружно-пластичного деформування була реалізована у вигляді підпрограм VUMAT і UMAT, які були імплементовані відповідно в програмні системи ABAQUS [90] та LS-DYNA [91].

VUMAT - це призначена для користувача підпрограма в ABAQUS/Explicit, яка написана на мові програмування FORTRAN. Вона використовується для нових моделей матеріалів, які задає користувач. Користувач може задавати внутрішні змінні стану, які оновлюються разом з рішенням на кожному кроці.

Для кожного кроку навантаження ABAQUS інтегрує рівняння рівноваги на основі напруженого стану на початку кроку в кожній точці інтегрування і передає тензор градієнта деформації, тензор напружень і внутрішні змінні в підпрограму VUMAT. Підпрограма VUMAT обчислює компоненти напружень і внутрішні змінні, що задаються користувачем, в кінці заданого прирощення деформації для кожної точки інтеграції та передає їх в ABAQUS. Використовуючи цю інформацію, ABAQUS може продовжити обчислення для наступного кроку навантаження.

Підпрограма UMAT також написана на мові програмування FORTRAN. Її призначення і взаємодія з програмною системою LS-DYNA аналогічні.

Схема, що показує взаємодію між підпрограмами VUMAT і UMAT та програмними системами ABAQUS та LS-DYNA, наведена на рис.2.8.

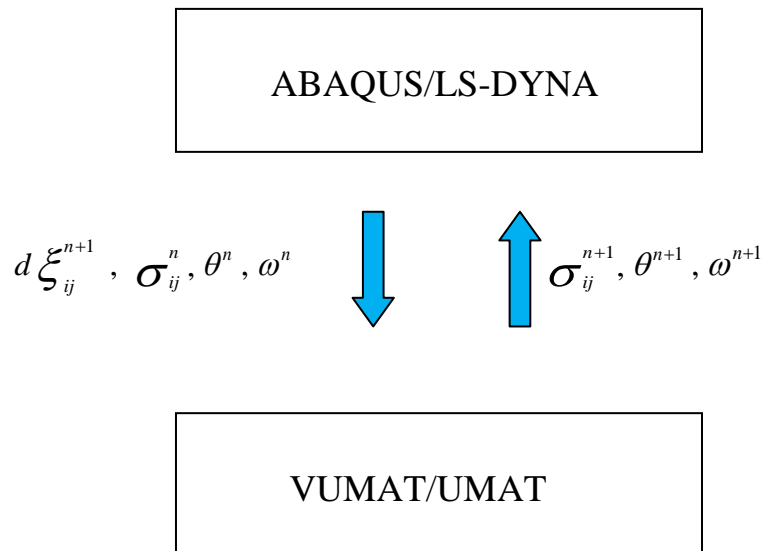


Рис. 2.8. Схема взаємодії між підпрограмами VUMAT і UMAT та програмними системами ABAQUS та LS-DYNA

2.5. Аналіз адекватності цифрової моделі

Для перевірки адекватності розробленої методики моделювання був розглянутий ряд завдань деформування порошкових і пористих матеріалів. Результати обчислювального експерименту порівнювалися з експериментальними даними та результатами комп'ютерного моделювання, які були отримані іншими авторами.

2.5.1. Пресування порошкових матеріалів

Технологічні процеси пресування металевих та неметалевих порошків знайшли широке застосування при отриманні виробів методами порошкової металургії. Тому було проведено їх комп'ютерне моделювання.

В роботі [92] наведені експериментальні дані щодо розподілу щільності при односторонньому та двосторонньому пресуванні порошків нержавіючої сталі,

проведено моделювання цих процесів методом скінчених елементів. Необхідні дані для обчислювального експерименту були взяті з цієї роботи.

Початкова межа текучості матеріалу порошку дорівнювала 215 МПа, модуль пружності дорівнював 220 ГПа. Зміцнення матеріалу твердої фази враховували на основі наведеної в [92] експериментальної кривої деформаційного зміцнення. Діаметр матриці приймали рівним 20 мм, кінцева висота спресованого виробу дорівнювала 18.7 мм. Величину початкової пористості приймали рівною 0.4. Вважали, що величина початкової пористості була однаковою у всіх областях порошку.

2.5.1.1. Одностороннє пресування

Схема одностороннього пресування порошку наведена на рис.2.9. Порошок 4 знаходиться в матриці 3. При односторонньому пресуванні нижній пуансон 2 нерухомий. Ущільнення матеріалу відбувається під дією верхнього пуансона 1. Верхній пуансон переміщався з постійною швидкістю.

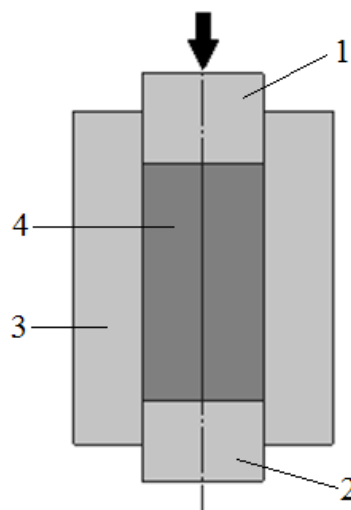


Рис. 2.9. Схема одностороннього пресування:

1 - верхній пуансон; 2 - нижній пуансон; 3 - матриця; 4 - порошок

Результати обчислень наведені на рис.2.10 (в силу симетрії розглядається половина осьового перерізу). Також для порівняння наведені результати, що отримані в роботі [92].

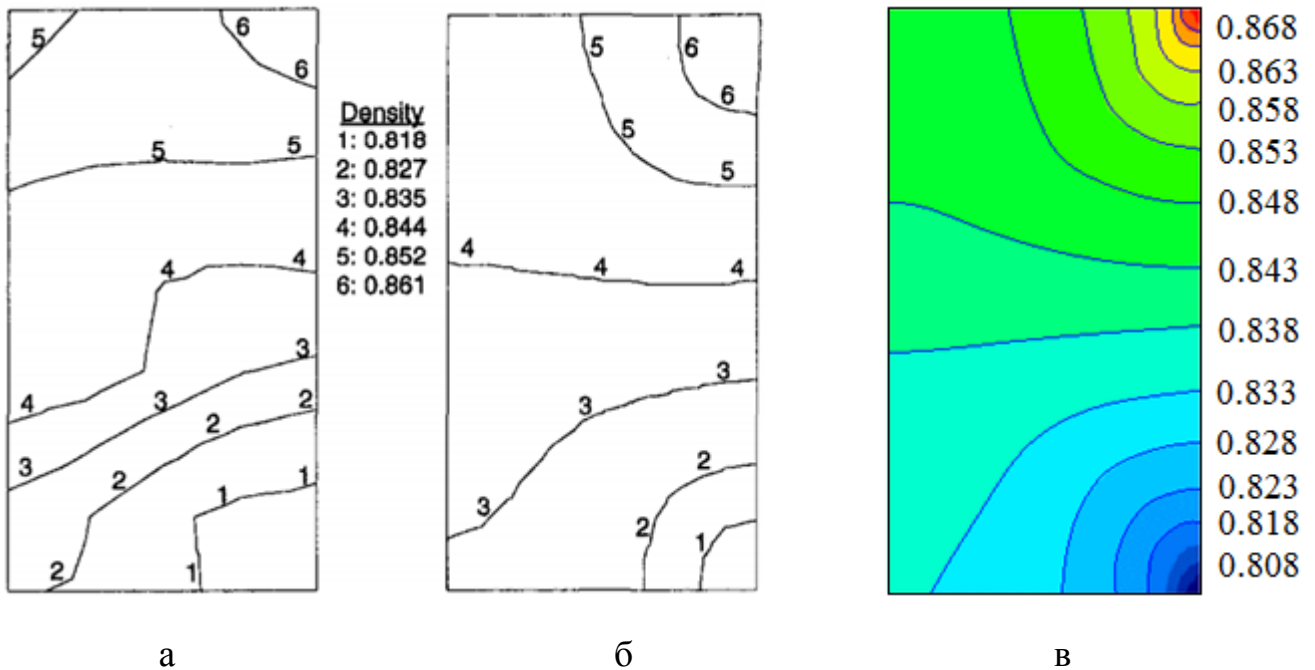


Рис. 2.10. Розподіл відносної щільності при односторонньому пресуванні: експериментальні дані (а) і результати моделювання (б) [92] та результати обчислювального експерименту (в)

При односторонньому пресуванні величина відносної щільності розподілена по висоті нерівномірно. Відносна щільність максимальна у верхній частині пресовки і мінімальна у нижній її частині. Зони мінімальної та максимальної пористості розташовані в області контакту порошку з матрицею. Зі збільшенням контактного тертя нерівномірність розподілу відносної щільності зростає.

Результати обчислювального експерименту близькі до даних роботи [92].

2.5.1.2. Двостороннє пресування

Схема двостороннього пресування порошку наведена на рис.2.11. При двосторонньому пресуванні обидва пуансона переміщуються назустріч один одному. Швидкості переміщення верхнього і нижнього пуансонів були рівні. При використанні схеми двостороннього пресування ущільнення порошку відбувається під одночасним впливом верхнього та нижнього пуансонів.

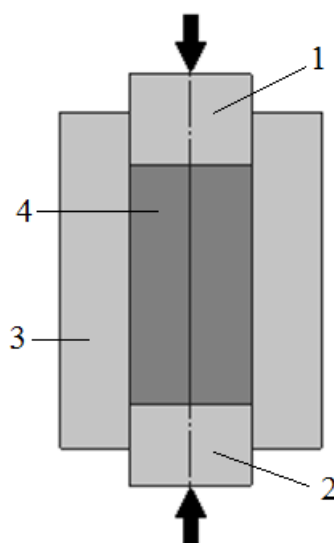


Рис. 2.11. Схема двостороннього пресування:

1 - верхній пуансон; 2 - нижній пуансон; 3 - матриця; 4 - порошок

Результати обчислень наведені на рис. 2.12. При двосторонньому пресуванні максимальне ущільнення порошку відбувається у верхній і нижній частинах виробу. У той же час в середній частині пресовки величина відносної щільності нижче. Нерівномірність розподілу залишкової пористості обумовлена впливом зовнішнього тертя. Можна також відзначити, що при двосторонньому пресуванні величина пористості розподілена більш рівномірно.

Результати обчислювального експерименту відповідають даним, що отримані в роботі [92].

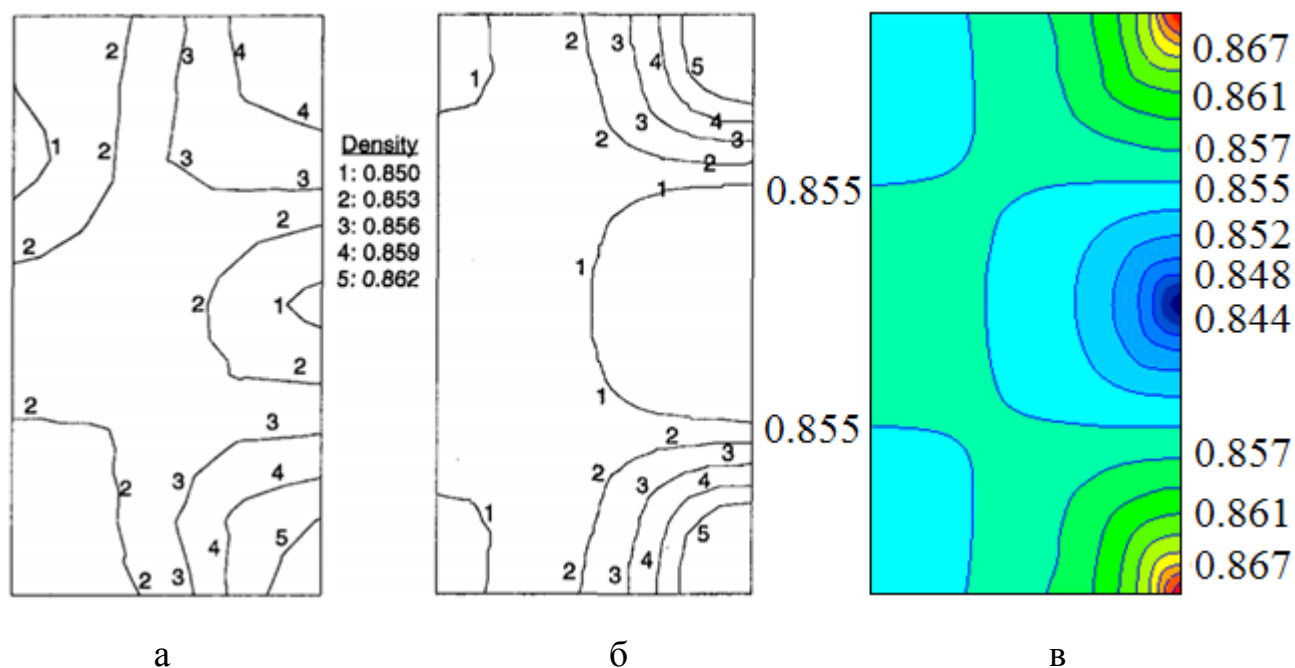


Рис. 2.12. Розподіл відносної щільності при двосторонньому пресуванні: експериментальні дані (а) і результати моделювання (б) [92] та результати обчислювального експерименту (в)

В роботі [93] досліджували процес двостороннього пресування порошку губчастого титану.

Були проведені металографічні дослідження мікроструктури поверхні повздовжніх перерізів пресовок. Досліджували зміну форми та розмірів пор в нижній, середній та верхній частинах виробів (рис.2.13).

Результати досліджень показали, що ущільнення матеріалу у верхній і нижній частинах пресовки проходить з приблизно однаковою інтенсивністю. Порівнювали структуру матеріалу в областях 1-3 зі структурою в областях 7-9. Була встановлена ідентичність структури за розміром і морфологією порового простору верхніх і нижніх шарів виробу. У цих областях відносна щільність максимальна. При цьому, у середніх по висоті областях у бічній поверхні пресовок (області 4 і 6) відносна щільність мінімальна.

Експериментальні дані підтверджують результати, що отримані при моделюванні.

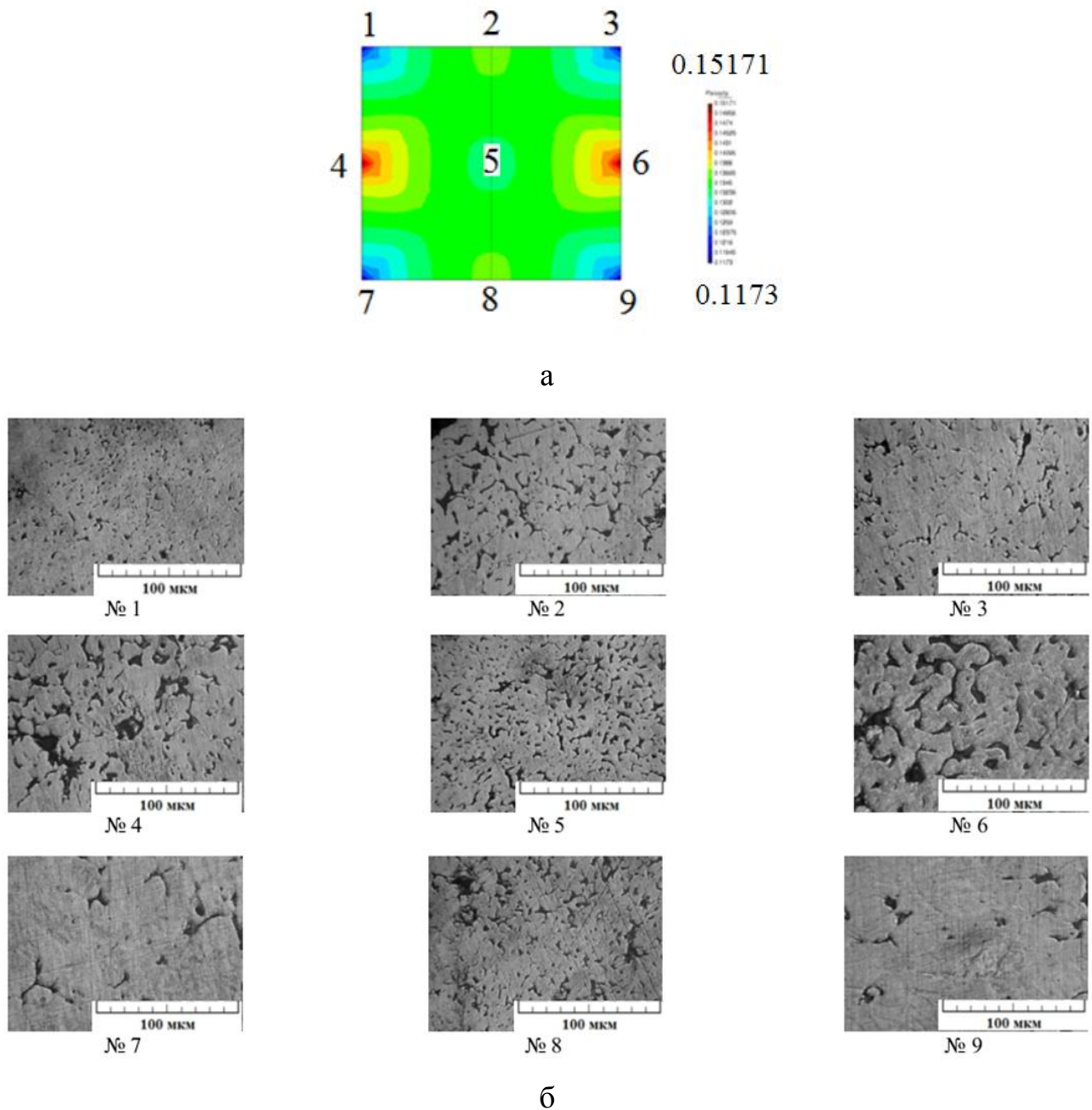


Рис. 2.13. Розподіл пористості, отриманий при моделюванні і позначення областей, в яких досліджували мікроструктуру матеріалу (а) та мікроструктура в перерізі брикету [93] (б)

2.5.2. Вільна осадка пористої заготовки

Розглянемо процес вільної осадки пористої заготовки (рис.2.14). Заготовка циліндричної форми 3 поміщена між верхньою 1 і нижньою 2 плитами. Нижня

плита нерухома, деформування відбувається за рахунок переміщення верхньої плити, яка рухається з постійною швидкістю.

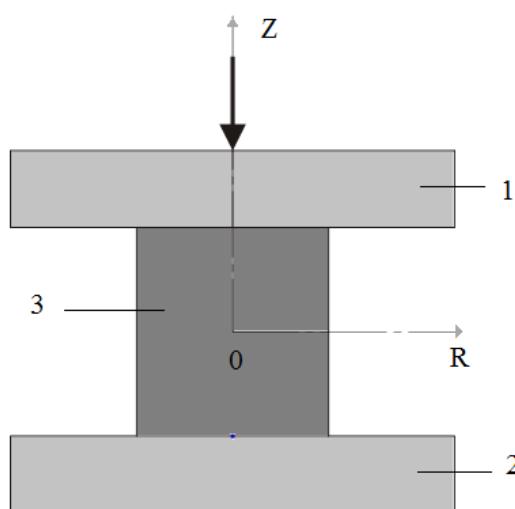


Рис. 2.14. Схема вільної осадки: 1 - верхня плита;
2 - нижня плита; 3 - заготовка

Процес вільної осадки пористих циліндричних заготовок досліджували в роботі [94] методом скінченних елементів. Відношення початкових висоти заготовки до її діаметру дорівнювало одиниці. Величина початкової пористості по всьому об'єму заготовки була однаковою і дорівнювала 0.2.

На рис.2.15 наведені дані щодо розподілу відносної щільності по осьовому перерізу заготовки. Результати моделювання свідчать, що розподіл пористості нерівномірний (на рисунку показана чверть осьового перерізу заготовки). Максимальне ущільнення відбувається в центральній зоні заготовки та у її торцях близько бічної поверхні. В області опуклості бічної поверхні пористість максимальна. У торцях заготовки в безпосередній близькості від осі симетрії знаходиться зона утрудненої деформації. У цій зоні також пористість максимальна.

Характер розподілу відносної щільності відповідає результатам роботи [94].

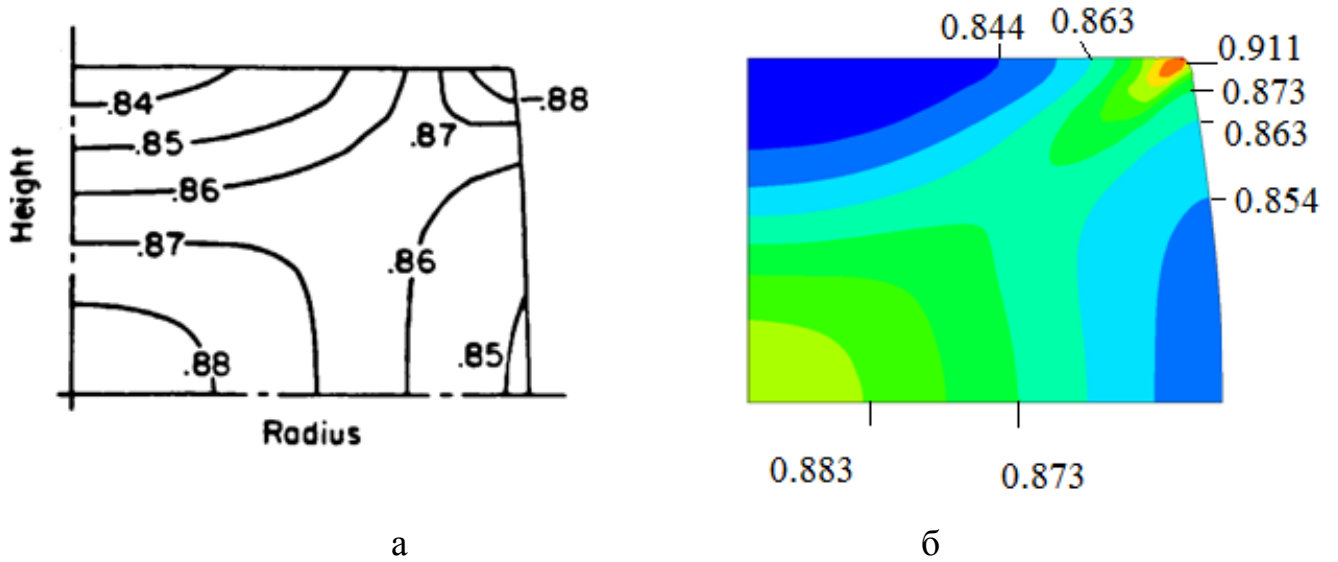


Рис. 2.15. Розподіл відносної щільності: а - результати роботи [94]; б - результати обчислювального експерименту

В роботі [95] були проведені металографічні дослідження поверхні осьових перерізів деформованих заготовок (рис.2.16).

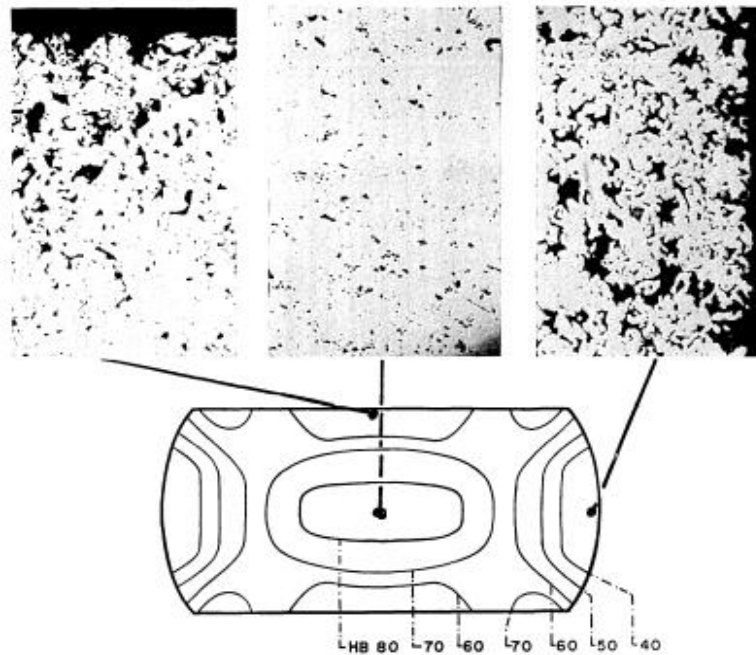


Рис. 2.16. Мікроструктура в перерізі заготовки [95]

Вивчалися форма та розміри пор. У центральній області виробу відбулося максимальне ущільнення матеріалу. У той же час в зонах утрудненої деформації величина залишкової пористості вище. Можна також відзначити підвищення пористості в області опуклості бічної поверхні заготовки. Таким чином можна констатувати, що результати моделювання відповідають наведеним експериментальним даним.

Висновки до розділу 2

1. Розроблена математична модель процесів формоутворення структурно-неоднорідних пористих матеріалів.
2. На основі узагальненої моделі пластичного деформування порошкових і пористих матеріалів та методу скінчених елементів розроблена методика визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів ресурсозберігаючих технологій виготовлення деталей обладнання харчових виробництв.
3. Проведена перевірка адекватності розроблених цифрових моделей. Результати обчислень порівнювалися з результатами, які були отримані іншими авторами. Величина розбіжності результатів при односторонньому і двосторонньому пресуванні, а також при вільній осадці не перевищувала відповідно 11%, 10% і 12%.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ МАШИН І АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ З ПОРИСТИХ СПЕЧЕНИХ ЗАГОТОВОК

3.1. Штампування втулок циліндричної форми

У машинах і апаратах харчової промисловості використовуються різні деталі, виготовляти які доцільно методами порошкової металургії. До таких деталей можна віднести бронзові вкладиші внутрішніх опор і зовнішніх підшипників для похилих дифузійних апаратів ДС-8, ДС-12, ДС-19, ПДС стандартних і ремонтних розмірів (рис.3.1,а) і бронзові лабіринтні ущільнювачі внутрішніх опор транспортної системи похилих дифузійних апаратів ДС-8, ДС-12 (рис.3.1,б).

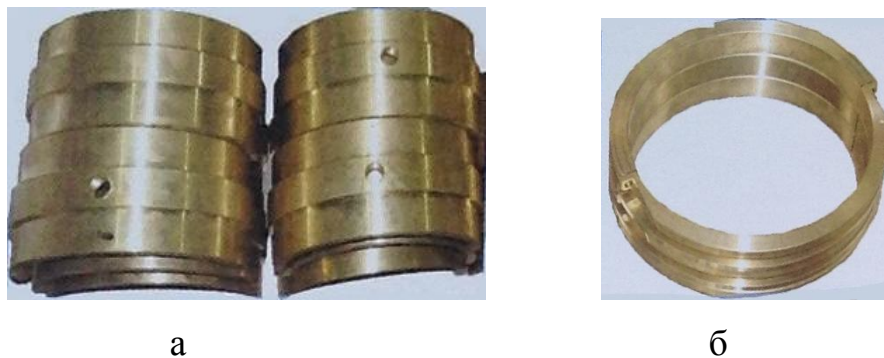


Рис. 3.1. Бронзові вкладиші (а) та ущільнювачі (б)

Розглянемо дві схеми штампування таких виробів, що мають кільцеподібну форму (рис.3.2). Перша схема передбачає використання заготовки, внутрішній діаметр якої більше діаметру оправки (рис. 3.2,а). При цьому є можливість радіальної течії матеріалу до центру. У другому випадку (рис.3,б) внутрішній діаметр заготовки дорівнює діаметру оправки (схема допресовки). Маса обох заготовок рівні, їх початкова пористість $\theta = 0.2$. Верхній і нижній пуансони рухаються назустріч один одному з однаковою швидкістю. Коефіцієнт тертя між заготовкою та інструментом приймали рівним 0.15.

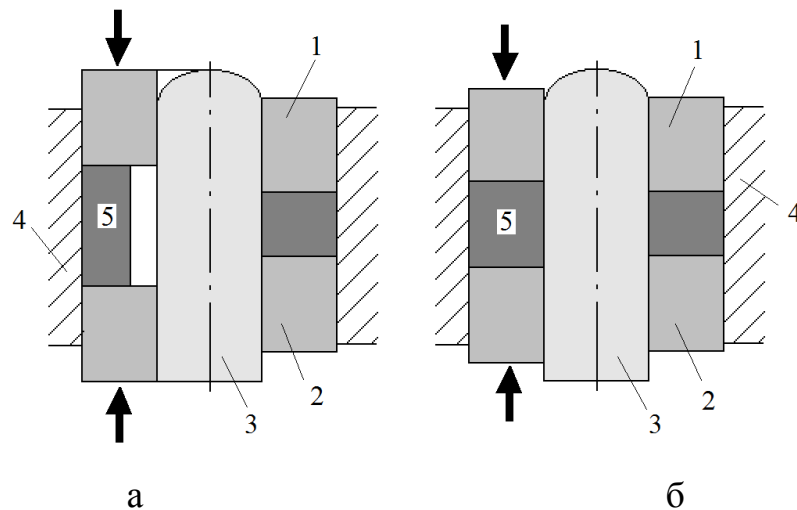


Рис. 3.2. Схеми штампування: а - з радіальною течією до центру; б - допрессовка: 1 - верхній пуансон, 2 - нижній пуансон, 3 - оправка, 4 - матриця, 5 - пориста заготовка

Результати комп'ютерного моделювання наведені на рис. 3.3 - 3.5. В силу симетрії розглядається права половина осьового перерізу штампованої заготовки.

На початковій стадії деформування заготовки першого типу відбувається радіальна течія матеріалу до центру. Внутрішня її поверхня, в результаті дії тиску, набуває опуклу ("бочкоподібну") форму. Розподіл пористості (рис. 3.3,а) та еквівалентної пластичної деформації (рис. 3.4,а) нерівномірні по перерізу заготовки. Найменша пористість і найбільша еквівалентна деформація - в області торців заготовки у внутрішній її поверхні, а також в центрі. Відповідно, найбільша пористість і найменша еквівалентна деформація - в області опуклої внутрішньої поверхні заготовки, біля центральної частини її торців і близько матриці в середній частині висоти заготовки.

При реалізації другої схеми штампування (допрессовка) радіальна течія матеріалу заготовки відсутня. Пористість (рис. 3.3,б) та еквівалентна деформація (рис. 3.4,б) також розподілені нерівномірно, але характер цього розподілу відрізняється. Найменша пористість і найбільша еквівалентна деформація - у торців заготовки в областях контакту з матрицею та оправкою. Найбільша пористість і найменша еквівалентна деформація - також в областях контакту з

матрицею та оправкою, в середній частині висоти заготовки, що обумовлено впливом тертя.

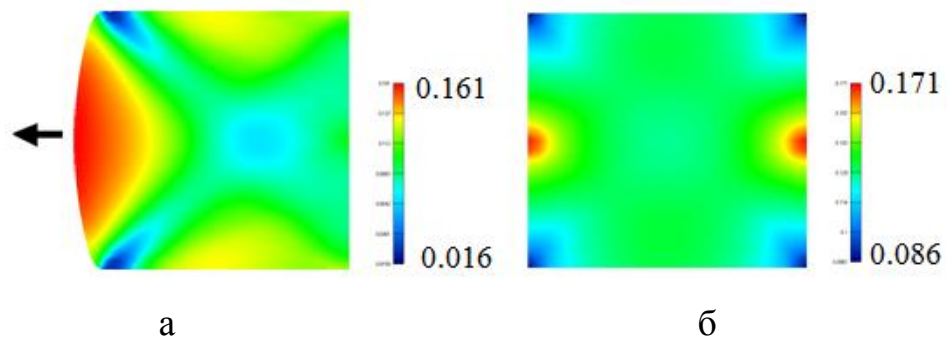


Рис. 3.3. Розподіл пористості: а - при штампуванні з радіальною течією до центру;
б - при допресовці

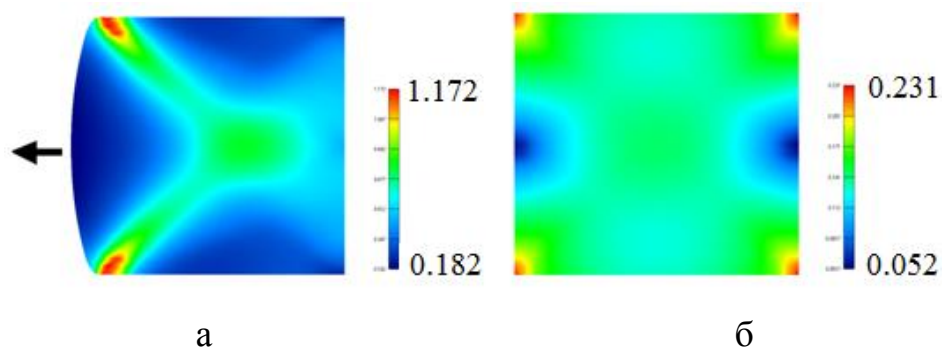


Рис. 3.4. Розподіл еквівалентної пластичної деформації: а - при штампуванні з
радіальною течією до центру; б - при допресовці

На заключній стадії штампування внутрішня поверхня заготовки першого типу впирається в оправку і подальше її ущільнення відбувається за схемою допресовки. Величина пористості в кінці деформування мала і її відмінність по перерізу заготовки незначна. Розподіл пористості при штампуванні заготовки другого типу аналогічний.

У той же час слід зазначити відмінність в рівні еквівалентної пластичної деформації (рис. 3.5).

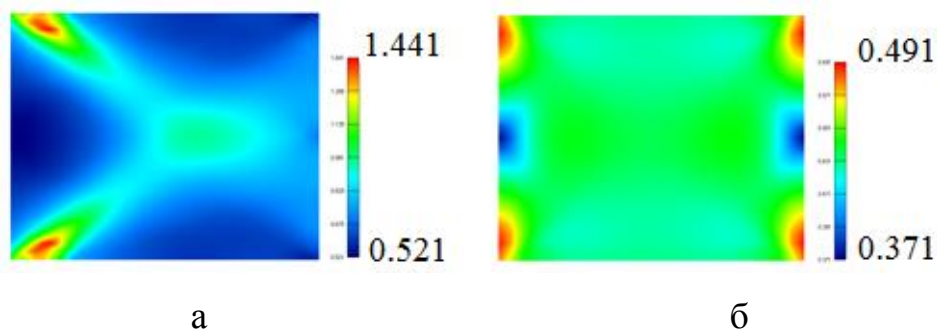


Рис. 3.5. Розподіл еквівалентної пластичної деформації у виробі: а - при штампуванні з радіальною течією до центру; б - при допресовці

При штампуванні заготовки першого типу, коли відбувається радіальна течія матеріалу, величина еквівалентної пластичної деформації значно вище, що може сприяти отриманню більш високих експлуатаційних властивостей виробів.

3.2. Штампування деталей з внутрішньою конусоподібною поверхнею

Деталі, що мають кільцеподібну форму, широко використовуються в машинах і апаратах сучасного машинобудування. Серед номенклатури розглянутих виробів можна виділити групу деталей, що мають похилу конічну поверхню. Як приклад, можна привести деталі, зображені на рис.3.6. Вони мають кільцеподібну форму, а верхня їх частина являє собою похилу конічну поверхню. Вироби такого типу застосовуються в млинах для розмелювання борошна, кави та інших.

Розглядається процес гарячого штампування виробів такого типу в штампі з кільцевим конічним компенсатором [15, 96].

Компенсатор служить для розміщення об'єму надлишкового металу (облоя), а також дозволяє заповнити та максимально ущільнити порожнини штампа, які є зонами утрудненої деформації.

Конструкція компенсатора повинна забезпечувати витікання надлишку металу тільки на заключній стадії штампування. Крім того, опір витіканню металу

в облой має бути досить високим, щоб забезпечити повне заповнення штампа та ущільнення матеріалу по всьому об'єму виробу.



Рис. 3.6. Борошномолка Vititek VLM-2200 і жорна до неї (а), жорна кавомолки (б) та кормоагрегатів (в)

При проектуванні конструкції штампа важливо знати закономірності ущільнення та формозміни заготовок на всіх етапах штампування. Встановлення цих закономірностей експериментальними методами є трудомістким і дорогим процесом. Тому доцільно використовувати метод попереднього комп'ютерного моделювання.

Схема деформування передбачає наявність зсувних деформацій, за рахунок яких з'являється можливість підвищити експлуатаційні властивості виробів [97].

На рис.3.7 представлені форма штампованого виробу (а) та схема деформування (б).

Розміри виробу були наступними: внутрішній діаметр 32 мм, зовнішній діаметр 54 мм, внутрішня висота 6 мм і зовнішня висота 11 мм.

Вихідна заготовка мала кільцеподібну форму (порожній циліндр). Внутрішній її діаметр дорівнював діаметру оправки і дорівнював 32 мм. Зовнішній діаметр заготовки змінювався і приймав значення 49.6 мм і 52 мм. Відповідно, висоти дорівнювали 14.35 мм і 12.27 мм.

Величина початкової пористості заготовки θ_0 дорівнювала 0.2, матеріал її твердої фази - сталь.

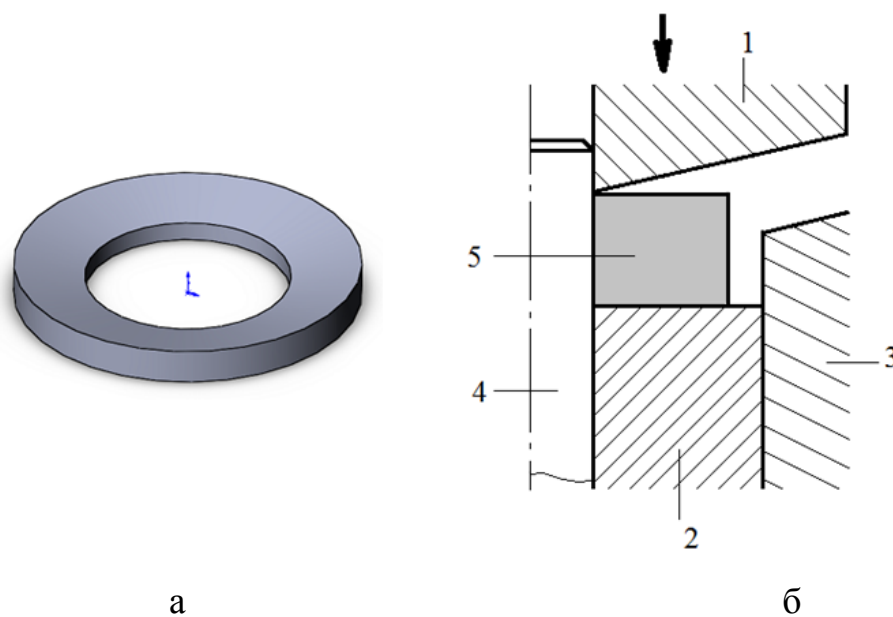


Рис. 3.7. Порошковий виріб (а) і схема деформування (б):
 1 - верхній пуансон, 2 - нижній пуансон, 3 - матриця,
 4 - оправка, 5 - заготовка

Розглядалося також штампування біметалевих заготовок. При цьому висота верхнього шару дорівнювала одній третині загальної висоти заготовки. Матеріал верхнього шару - легована сталь. При чисельному моделюванні вважали, що межа текучості верхнього шару вище межі текучості нижнього шару в два рази.

Оправка, нижній пуансон і матриця були нерухомі. Деформування заготовки відбувалося за рахунок переміщення верхнього пуансона. На заключній стадії штампування між верхнім пуансоном і матрицею залишається зазор, в який витікає надлишковий метал. Коефіцієнт тертя між заготовкою та інструментом приймали рівним 0.15.

Наявність зазору між зовнішньою поверхнею заготовки та матрицею забезпечує течію матеріалу в радіальному напрямку від центру. Такий напрям течії матеріалу призводить до того, що деформуєма заготовка досягає зони компенсатора в кінці штампування, і таким чином мінімізуються втрати матеріалу.

Досліджувана схема деформування є осесиметричною. Тому в подальшому розглядається права половина осьового перерізу штампованої заготовки.

На рис.3.8 наведені результати моделювання штампування однорідної заготовки, властивості якої були однакові по всьому об'єму.

У початковий момент деформування відбувається ущільнення порошкового матеріалу в верхній частині заготовки близько її внутрішньої поверхні. Відбувається радіальна течія матеріалу в напрямку від центру. Нижня частина внутрішньої поверхні заготовки відходить від оправки.

При подальшому переміщенні верхнього пуансона процес ущільнення поширюється на інші області виробу, що деформується. Зовнішня поверхня заготовки досягає поверхні матриці, при цьому внутрішня її поверхня повністю контактує з оправкою. Починається витікання металу в порожнину компенсатора (простір між верхнім пуансоном і матрицею). Розподіл пористості на цьому етапі нерівномірний. Мінімальна пористість, як і раніше у верхній частині заготовки у її внутрішній поверхні. Зі збільшенням радіуса величина пористості зростає. Максимальна пористість відповідає області витікання матеріалу в компенсатор.

Крім того, менш інтенсивно матеріал ущільнюється в нижній частині заготовки у її зовнішній і внутрішній поверхнях.

На заключному етапі штампування матеріал повністю заповнює порожнину штампа, відбувається доущільнення зон утрудненої деформації і вирівнювання щільності за об'ємом виробу. При цьому надлишок металу витікає в облой. Невелике зменшення щільності спостерігається в нижній частині заготовки у зовнішній поверхні.

При штампуванні біметалевої заготовки більш інтенсивно ущільнюється нижній шар, матеріал твердої фази якого має більш низьку межу текучості (рис.3.9). Початкова пористість шарів була однаковою ($\theta_0 = 0.2$).

Можна відзначити, що в процесі деформування відбувається вдавлювання більш міцного верхнього шару в менш міцний нижній шар. Це призводить до ефекту витікання нижнього шару з під верхнього. В результаті отримати необхідний біметалічний виріб не представляється можливим.

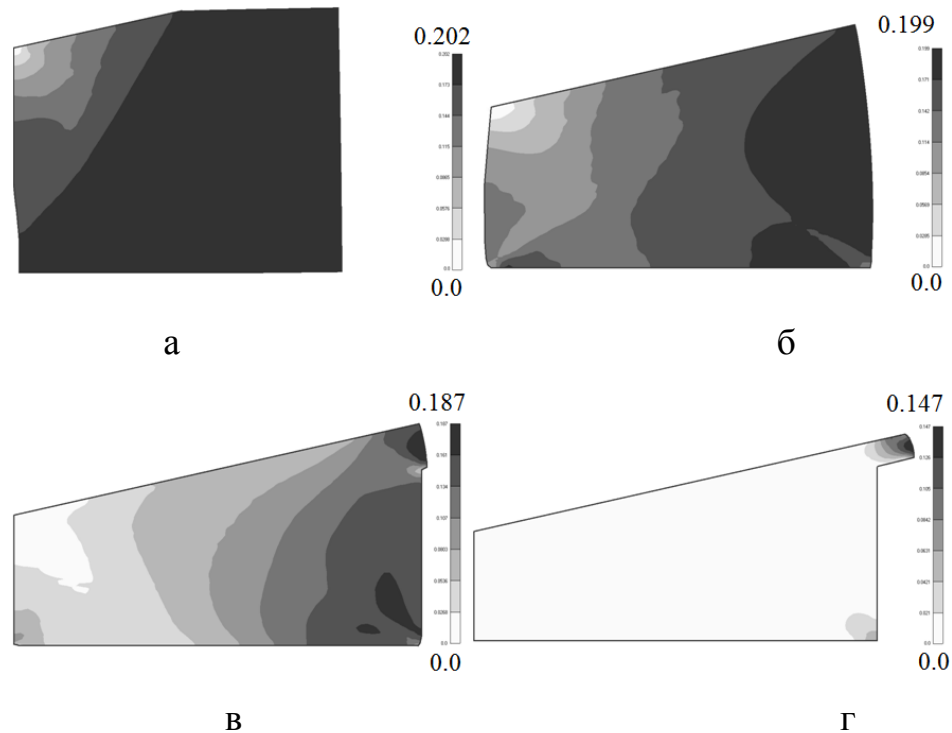


Рис. 3.8. Розподіл пористості на послідовних етапах (а, б, в, г) штампування однорідної заготовки ($\theta_0 = 0.2$)

Для запобігання витікання матеріалу нижнього шару з під верхнього шару було запропоновано використовувати заготовки з різною початковою пористістю шарів.

На рис.3.10 наведені результати ущільнення такої біметалевої заготовки. Межа текучості твердої фази верхнього шару була вищою, ніж межа текучості твердої фази нижнього шару. При цьому величина пористості верхнього шару була вище (дорівнювала 0.3), а нижнього шару - нижче (дорівнювала 0.15).

На початку штампування більш інтенсивно ущільнюється верхній шар. Потім процес ущільнення поширюється на нижній шар.

На момент, коли починається витікання матеріалу в компенсатор, мінімальна пористість шарів - у внутрішній поверхні заготовки, максимальна - в області компенсатора.

У кінці процесу деформування величина пористості мінімальна та її розподіл за об'ємом заготовки рівномірний. Таким чином, отримання двошарового біметалевого виробу стає можливим.

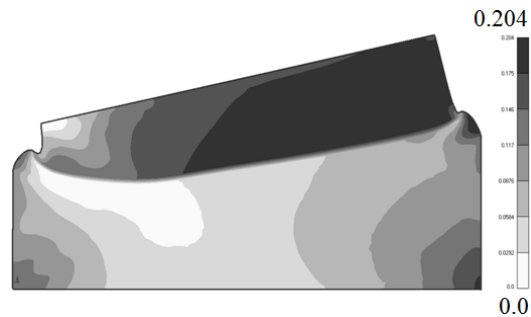


Рис.3.9. Розподіл пористості при штампуванні біметалевої заготовки, початкова пористість шарів однакова ($\theta_0 = 0.2$)

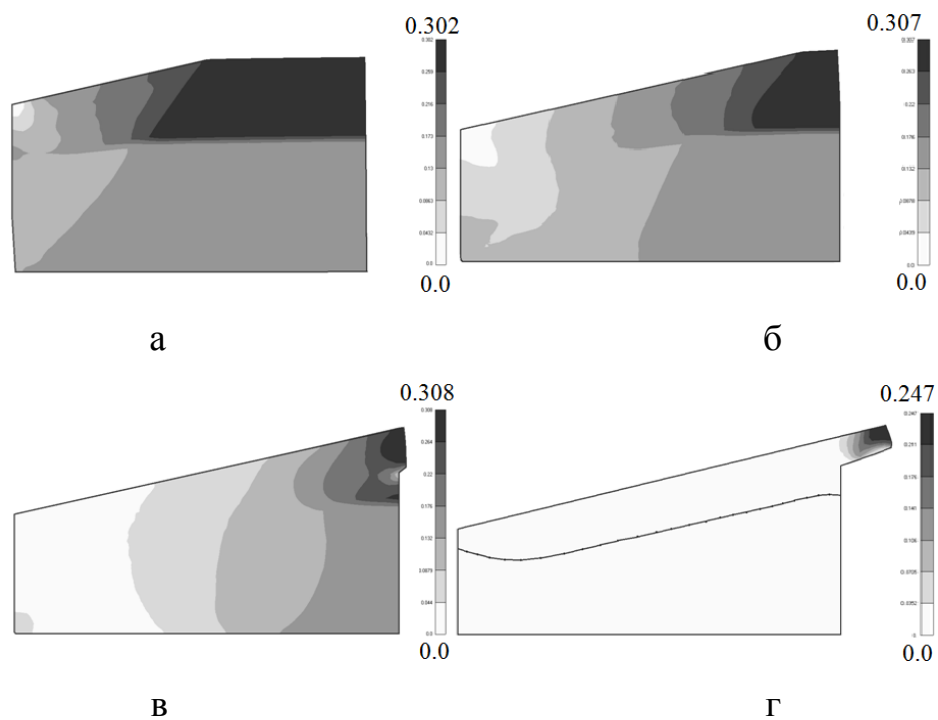


Рис.3.10. Розподіл пористості на послідовних етапах (а, б, в, г) штампування біметалевої заготовки, початкова пористість верхнього шару дорівнювала 0.3, нижнього - 0.15

У той же час слід зазначити викривлення поверхні розділу між шарами. В результаті товщина верхнього шару близько внутрішньої поверхні заготовки менше, ніж в інших частинах виробу.

3.3. Радіальне видавлювання втулок із внутрішнім фланцем

Втулки із внутрішнім фланцем (рис.3.11) знайшли широке застосування в сучасному машинобудуванні. Одним з методів їх отримання є метод радіального видавлювання трубчастих заготовок [98, 99].



Рис. 3.11. Втулка із внутрішнім фланцем [98, 99]

Проведений аналіз показав, що такі вироби застосовуються і в харчовій промисловості. Нижче, як приклад, наведені деякі деталі машин та апаратів (рис.3.12, рис.3.13).

Ефективними методами отримання заготовок під подальше радіальне видавлювання є методи порошкової металургії. В результаті досягається значна економія матеріалу і стає можливим отримання деталей з високими експлуатаційними характеристиками.

Процеси отримання виробів методами видавлювання пористих заготовок досліджені на даний момент досить повно. В основному, розглянуті схеми прямого [100,101] та зворотнього видавлювання [102]. Є також дослідження, в яких вивчено радіально - пряме видавлювання [103].



Рис. 3.12. Типові деталі типу втулка із внутрішнім фланцем, що застосовуються в харчовому виробництві: а - гайка кріплення корпусу тістоузла для пельменного апарату; б - кришка до фасувального автомату масла та творогу

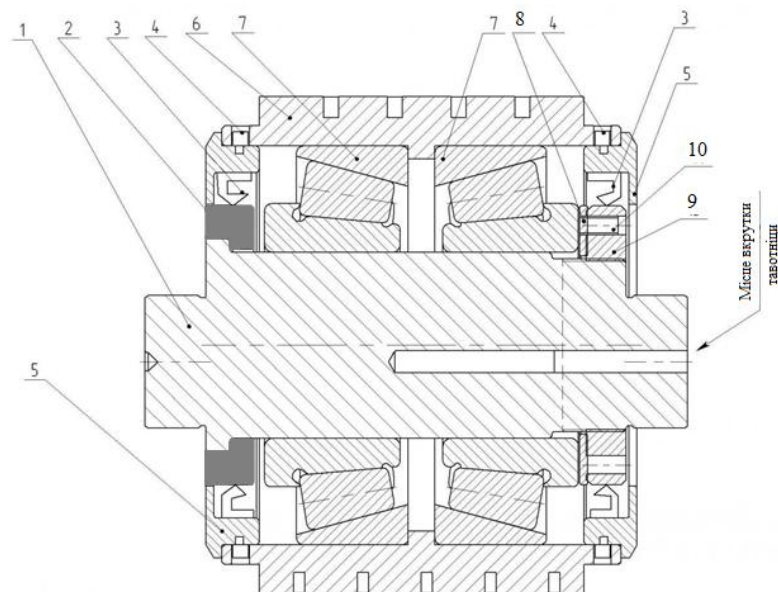


Рис. 3.13. Пресуючий ролик гранулятора біомаси:

1 – вал; 2 - вперта шайба; 3 - манжет армований; 4 - стопорний штифт; 5 - кришка; 6 - обичайка; 7 - підшипник; 8 - перфорована шайба; 9 - стопорна гайка; 10 - штифт стопорної гайки

У той же час, процес радіального видавлювання втулок із внутрішнім фланцем з порошкових пористих заготовок практично не досліджений.

Розрахункова схема процесу радіального видавлювання приведена на рис.3.14.

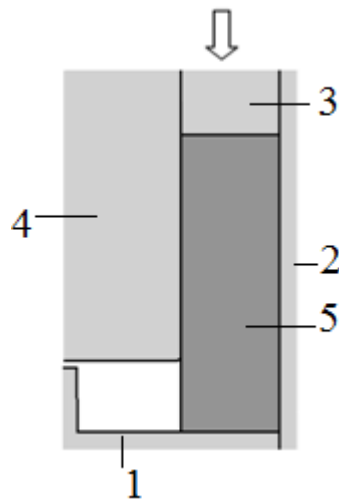


Рис. 3.14. Розрахункова схема процесу радіального видавлювання: 1 - пуансон, 2 - матриця, 3 - контрпуансон, 4 - оправка, 5 - заготовка

Внутрішній діаметр матриці дорівнював 60 мм, діаметр оправки - 40 мм. Висота простору, в яке видавлювався матеріал фланця - 15 мм. Як матеріал твердої фази пористої заготовки розглядали сталь та алюмінієвий сплав. Початкова пористість дорівнювала 0.15 і її розподіл за об'ємом вважали рівномірним. Коефіцієнт тертя приймали рівним 0.15.

3.3.1. Аналіз еволюції полів показників якості виробів

При використанні схеми видавлювання, наведеної на рис.3.14, процес деформування протікає в кілька етапів. При цьому розподіл параметрів, що характеризують властивості виробів змінюється (рис.3.15).

Максимальна щільність матеріалу відповідає області фланця і нижній частині втулки. У той же час, в області опуклої вільної поверхні фланця величина відносної щільності мінімальна. При цьому збільшення пористості не відбувається, що пояснюється зменшенням внутрішнього радіусу фланця і течією матеріалу в область, що звужується. Менша величина відносної щільності спостерігається також у верхній частині втулки.

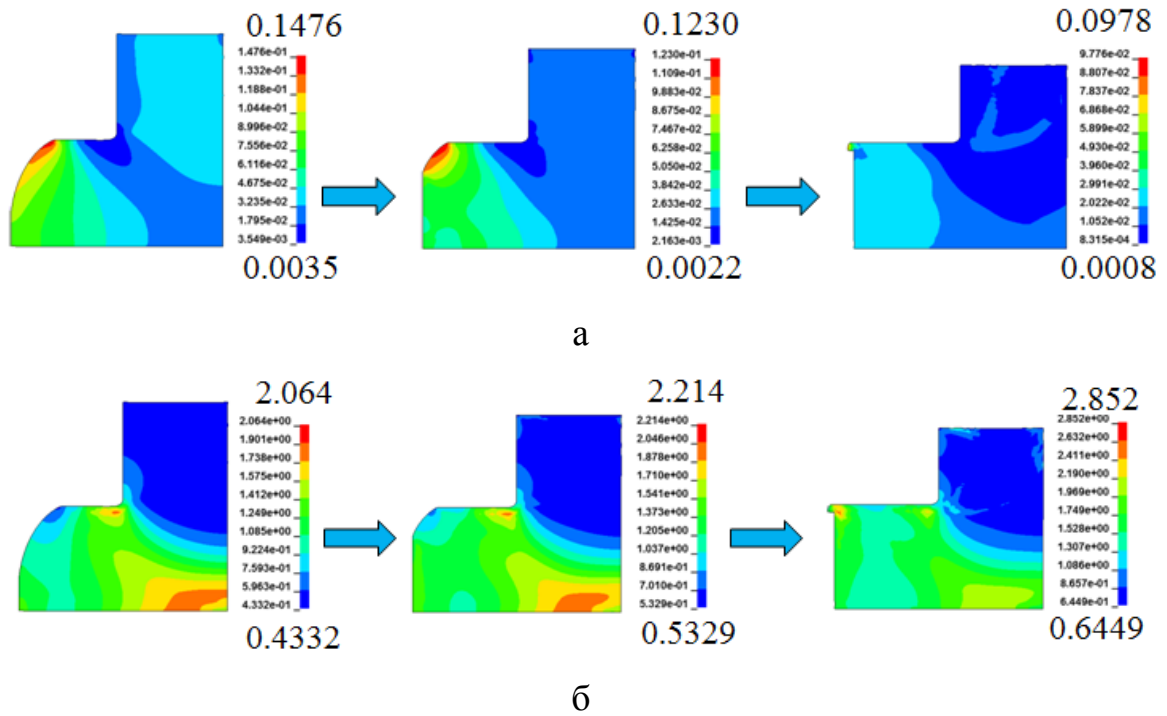


Рис. 3.15. Аналіз еволюції полів показників якості виробів: а - розподіл пористості; б - розподіл величини накопиченої пластичної деформації

Після контакту з обмежуючою поверхнею триває заповнення порожнини штампа і настає заключний етап, на якому надлишок матеріалу витікає в компенсатор. Відбувається доуцілювання зон утрудненої деформації і вирівнювання щільності за об'ємом виробу (рис.3.15,а).

На відміну від відносної щільності, величина накопиченої пластичної деформації на заключному етапі розподілена істотно нерівномірно (рис.3.15,б). Більшою мірою матеріал деформований в області фланця і нижній частині втулки, в меншій мірі - в області верхньої частини втулки.

3.3.2. Дослідження впливу початкової форми заготовки

Початкова форма заготовки була кільцеподібною (рис.3.16): без зазору (а), з зазором між внутрішньою поверхнею заготовки та оправкою (б), а також з внутрішньою конічною поверхнею (в). Маса заготовок були однакові.

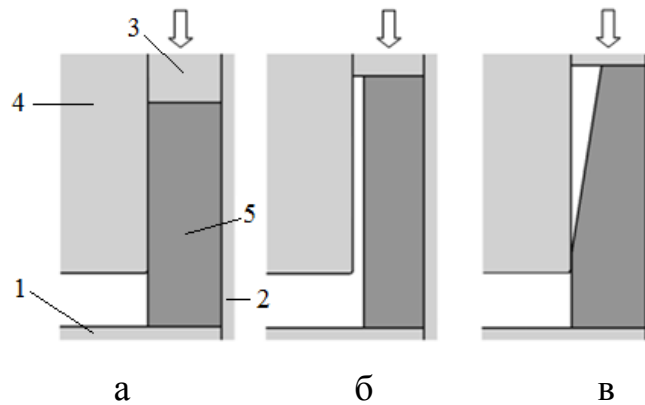


Рис. 3.16. Розрахункова схема видавлювання заготовок різної форми: 1 - пуансон, 2 - матриця, 3 - контрпуансон, 4 - оправка, 5 - заготовка

Радіальна течія матеріалу залежить від початкової форми заготовки. Якщо зазор між внутрішньою поверхнею заготовки та оправкою відсутній, то відбувається радіальна течія матеріалу в постійний по висоті простір між пуансоном та оправкою (рис.3.17,а).

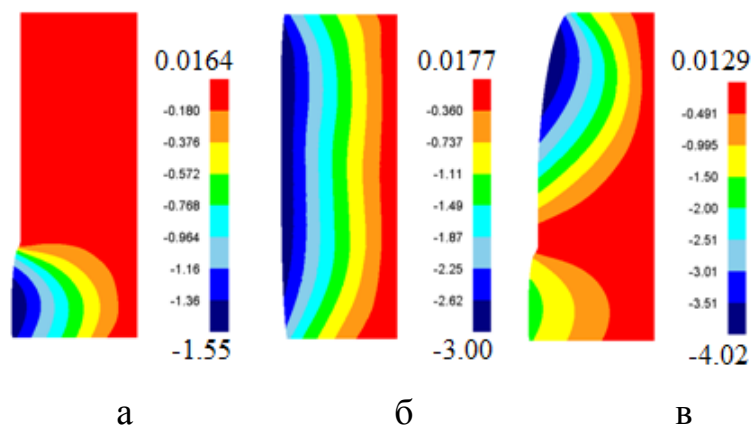


Рис. 3.17. Величина радіального переміщення матеріалу на початковому етапі, мм

При деформації заготовки, що має зазор між внутрішньою її поверхнею та оправкою, відбувається осадка з радіальною течією до центру (рис.3.17,б). Після того, як відбудеться контакт заготовки з поверхнею оправки, починається процес радіального видавлювання фланця.

Деформування заготовки із внутрішньою конічною поверхнею характеризується наявністю двох зон радіальної течії матеріалу (рис.3.17,в). Спочатку відбувається радіальна течія до центру у верхній частині заготовки. Потім починається одночасна радіальна течія матеріалу в нижній частині заготовки. По мірі збільшення ступеня деформації інтенсивність течії у верхній частині зменшується (відбувається контакт матеріалу з поверхнею оправки), а течія в простір між пуансоном та оправкою зростає.

Ущільнення заготовки з внутрішньою конічною поверхнею проходить в кілька етапів. Спочатку відбувається ущільнення у верхній частині втулки. Потім, зі збільшенням ступеня деформації, починається більш інтенсивне ущільнення матеріалу, що витікає во фланець. При цьому, у верхній частині втулки залишається область раніше ущільненого матеріалу. У верхній частині втулки, у її внутрішній поверхні, є також область менш щільного матеріалу.

На рис.3.18 наведено розподіл величини накопиченої пластичної деформації для трьох типів заготовок.

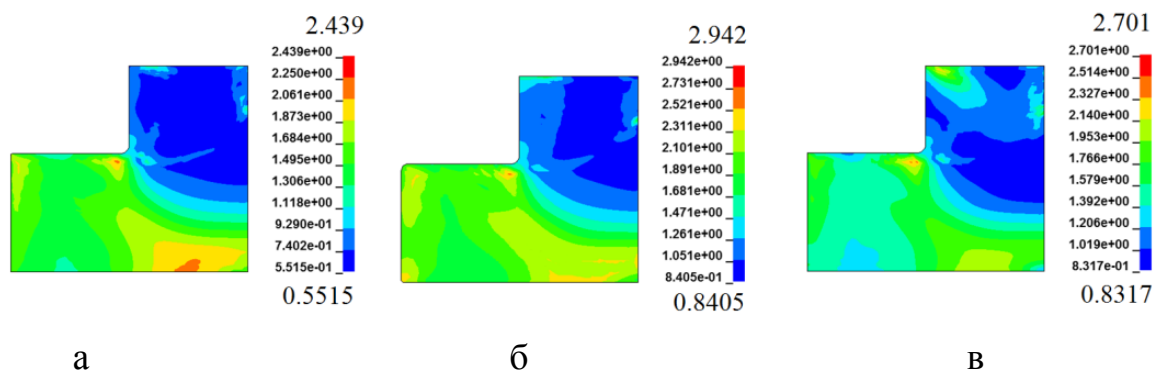


Рис. 3.18. Розподіл величини накопиченої пластичної деформації

Розподіл накопиченої деформації при видавлюванні заготовки без зазору з поверхнею оправки істотно нерівномірний (рис.3.18,а). Найбільші значення цей параметр приймає в області фланця і нижній частині втулки. Мінімальні значення - у верхній частині втулки. Максимальна величина накопиченої деформації - в нижній частині втулки у її зовнішній поверхні.

При видавлюванні заготовки, що має початковий зазор з поверхнею оправки, характер розподілу величини накопиченої пластичної деформації аналогічний (рис.3.18,б). У той же час, додаткова радіальна течія матеріалу в простір зазору дозволяє підвищити загальний рівень накопиченої деформації.

Застосування заготовки третього типу, з внутрішньою кінчною поверхнею, дозволяє підвищити значення накопиченої деформації у верхній частині втулки за рахунок додаткової радіальної течії на початковому етапі процесу (рис.3.18,в).

Додаткова радіальна течія на початковому етапі видавлювання дозволяє підвищити загальний рівень накопичених деформацій (рис.3.18,б) і збільшити значення цього параметра у верхній частині втулки (рис.3.18,в).

3.3.3. Дослідження впливу висоти робочої порожнини

Розглянутий вплив висоти робочої порожнини (рис.3.19).

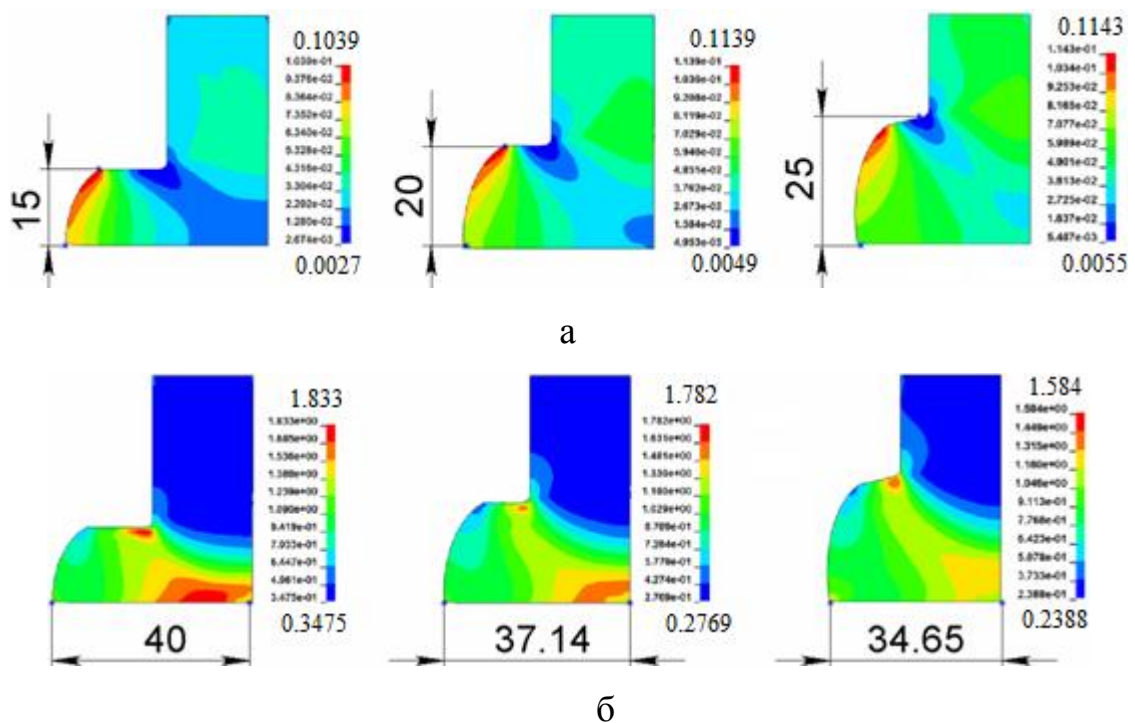


Рис. 3.19. Вплив висоти порожнини, мм: а - розподіл пористості; б - розподіл величини накопиченої пластичної деформації

Висота робочої порожнини приймала значення 15, 20 і 25 мм. Початкові розміри та властивості заготовок, а також параметри процесу були однаковими. Результати моделювання наведені на рис.3.19.

Зі збільшенням висоти робочої порожнини, довжина фланця зменшується. При цьому, величина пористості зростає, а величина накопиченої пластичної деформації зменшується.

3.4. Зворотне видавлювання втулок із внутрішньою порожниною

Серед деталей, що застосовуються у вузлах машин та апаратів харчової галузі, можна виділити велику групу, відмінною рисою якої є наявність внутрішньої порожнини. Деякі приклади застосування таких деталей в харчовому обладнанні наведені на рис.3.20.

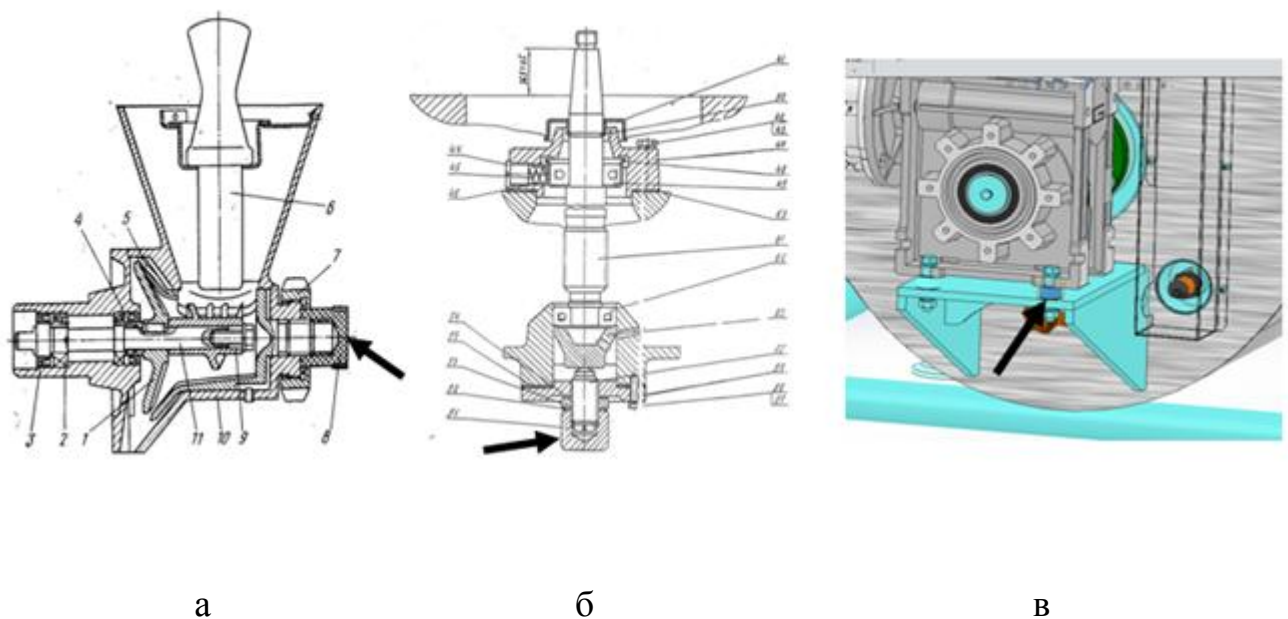


Рис.3.20. Харчове обладнання:

а - механізм МОП-П-1 для подрібнення сухарів і спецій; б - привід сепаратора - сливковідділювача марки Ж5-ОСЦП-1; в - проміжна (компенсаційна) втулка для обладнання кондитерського виробництва

Поширеним методом отримання виробів із внутрішньою порожниною є метод зворотного видавлювання заготовок, в тому числі пористих. Як було сказано раніше, пористі заготовки можуть містити різні дефекти, зокрема - недосконалі контакти між частинками порошку, що може обмежувати можливість отримання виробів цим методом. Істотний вплив на процес деформування роблять також пластичні властивості матеріалу твердої фази пористого тіла.

Встановлення закономірностей течії порошкового матеріалу при зворотному видавлюванні та врахування впливу на цей процес різних матеріальних характеристик виробу являють собою актуальну задачу.

Схема зворотного видавлювання приведена на рис.3.21. Порошкова заготовка 3 поміщається на виштовхувач 2 і деформується під впливом пуансона 1, що рухається з постійною швидкістю. Бічна поверхня заготовки обмежена нерухомою матрицею 4.

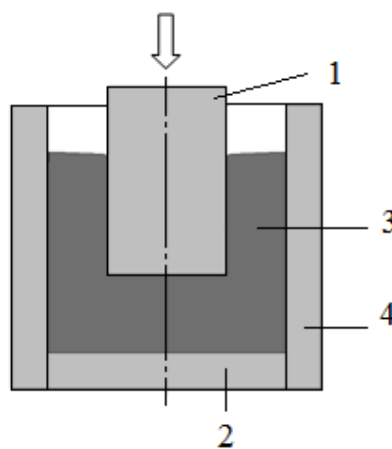


Рис. 3.21. Розрахункова схема зворотного видавлювання: 1 - пуансон;
2 - виштовхувач; 3 - заготовка; 4 - матриця

При моделюванні розглядали три варіанти поєднань матеріальних параметрів пористого тіла: $a=0.5$, $m=0.0$ (рис.3.22,а - контур поверхні навантаження симетричний, недосконалі контакти відсутні); $a=0.5$, $m=0.5$ (рис.3.22,б - порошкове тіло має недосконалі контакти) і $a=0.55$, $m=0.5$ (рис.3.22,в - є недосконалі контакти та контур навантаження несиметричний).

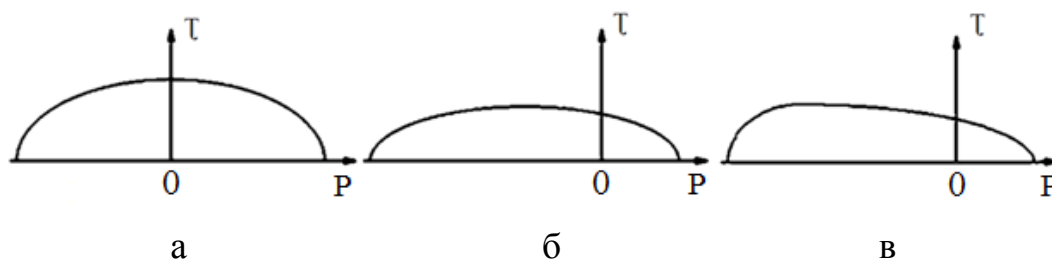


Рис. 3.22. Контури поверхні навантаження при різних значеннях матеріальних параметрів: а - $a=0.5$, $m=0.0$; б - $a=0.5$, $m=0.5$; в - $a=0.55$, $m=0.5$

3.4.1. Аналіз еволюції полів показників якості виробів

Комп'ютерне моделювання показало, що на початковому етапі процесу видавлювання відбувається осадка та ущільнення порошкової заготовки, а потім починає переважати процес витікання матеріалу в зазор між пуансоном і матрицею.

На рис.3.23 і рис.3.24 наведені відповідно результати по розподілу залишкової пористості та величини накопиченої пластичної деформації на послідовних етапах зворотного видавлювання для випадку, коли недосконалі контакти відсутні (рис.3.22,а).

Максимальне ущільнення матеріалу відбувається в області торця пуансона у його зовнішній поверхні. Безпосередньо під пуансоном знаходиться зона утрудненої деформації. По мірі протікання процесу очаг деформації зміщується в напрямку дна заготовки.

Розподіл залишкової пористості в отриманому виробі нерівномірний. Максимальне ущільнення матеріалу відбулося в областях дна та нижньої внутрішньої поверхні стінки отриманої деталі. Мінімальна щільність відповідає верхній частині стінки деталі в області контакту з матрицею. В області утрудненої деформації під пуансоном також спостерігається зменшення відносної щільності.

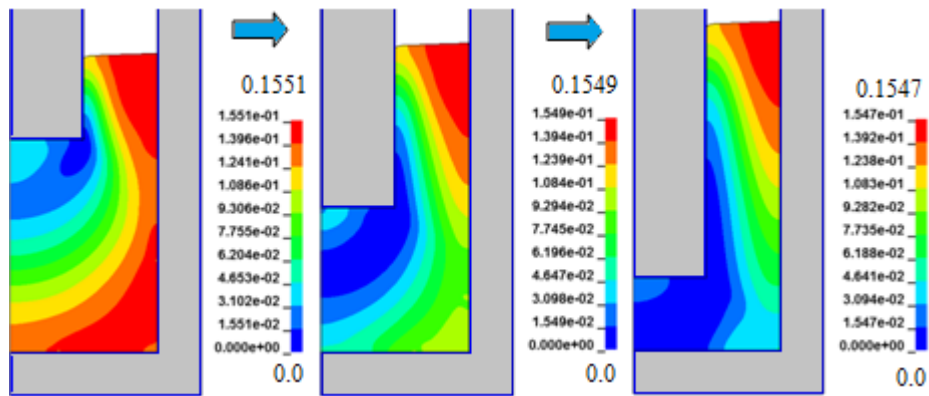


Рис. 3.23. Зміна розподілу пористості в процесі зворотного видавлювання ($a=0.5$, $m=0.0$)

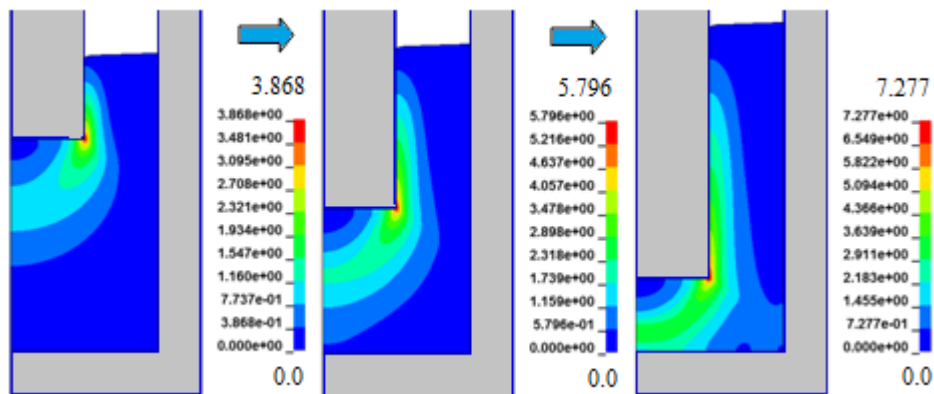


Рис. 3.24. Зміна розподілу накопиченої деформації твердої фази в процесі зворотного видавлювання ($a=0.5$, $m=0$)

Зміна розподілу накопиченої пластичної деформації відбувається аналогічно зміні відносної щільності.

3.4.2. Вплив структурно - механічних параметрів матеріалу заготовки на показники якості готових виробів

На рис.3.25 і рис.3.26 представлені результати по розподілу залишкової пористості та величини накопиченої пластичної деформації при різних значеннях

матеріальних параметрів порошкового тіла. Величина переміщення пуансона була однаковою.

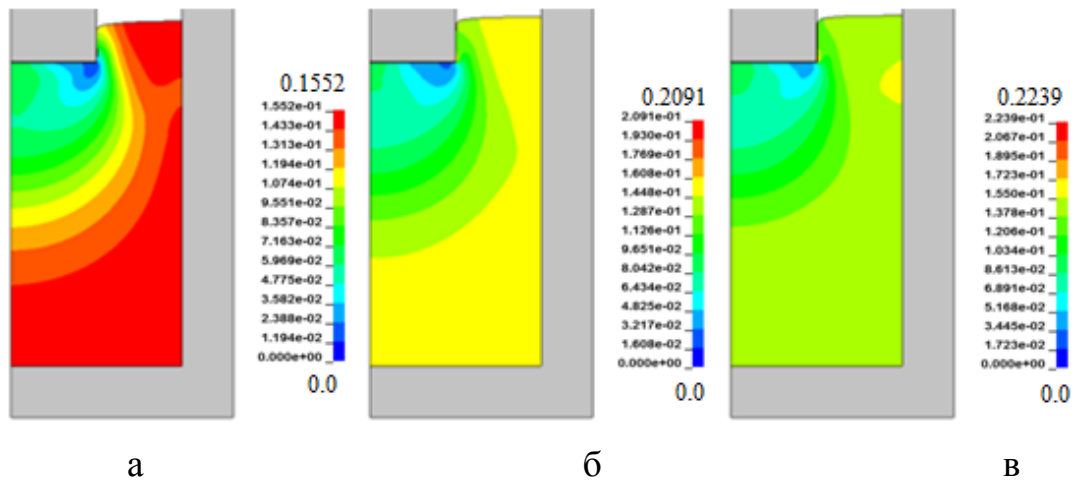


Рис. 3.25. Розподіл пористості при різних значеннях матеріальних параметрів: а - $a=0.5$, $m=0.0$; б - $a=0.5$, $m=0.5$; в - $a=0.55$, $m=0.5$

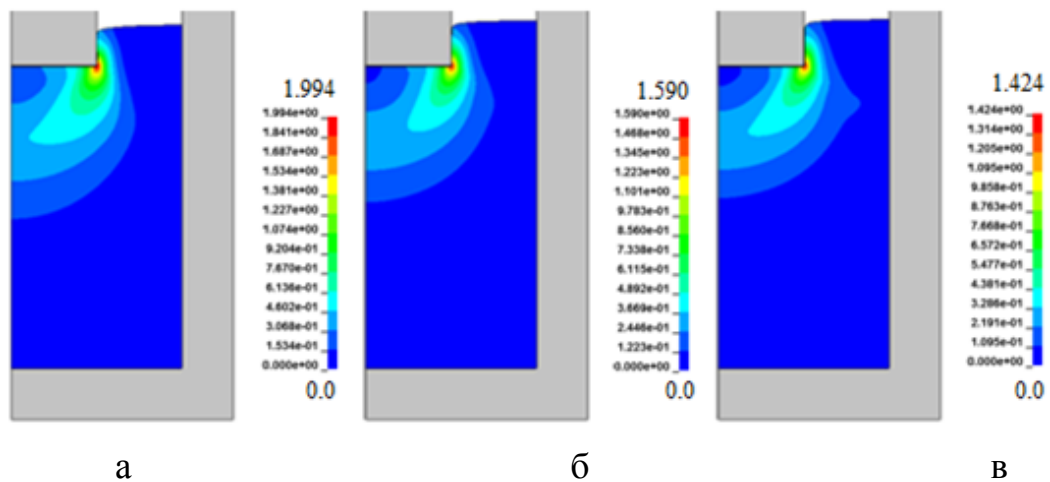


Рис. 3.26. Розподіл накопиченої деформації твердої фази при різних значеннях матеріальних параметрів: а - $a=0.5$, $m=0.0$; б - $a=0.5$, $m=0.5$; в - $a=0.55$, $m=0.5$

Як видно з рис.3.25, характер розподілу пористості для всіх розглянутих значень матеріальних параметрів аналогічний. У той же час наявність недосконалих контактів між частинками (рис.3.25,б) призводить до збільшення

величини залишкової пористості. При цьому відбувається збільшення висоти видавленої стінки виробу. У разі несиметричності контуру навантаження (рис.3.25,в) при $a > 0.5$ процес розуцільнення матеріалу заготовки може посилюватися.

Наявність недосконалих контактів впливає на величину накопиченої пластичної деформації матеріалу пористого тіла - вона стає меншою (рис.3.26,б). Несиметричність контура навантаження призводить до ще більшого її зменшення.

Висновки до розділу 3

1. Наявність радіальної течії при штампуванні виробів типу "втулка" призводить до підвищення рівня накопичених пластичних деформацій матеріалу.

2. При штампуванні біметалевих заготовок, що мають внутрішню конусоподібну поверхню, уникнути явища видавлювання нижнього шару з під верхнього можна за рахунок відмінності початкових пористостей шарів.

3. На заключному етапі радіального видавлювання втулки із внутрішнім фланцем розподіл щільності за об'ємом виробу вирівнюється, при цьому розподіл величини накопиченої пластичної деформації істотно нерівномірний.

4. При зворотному видавлюванні наявність недосконалих контактів у матеріалі пористих заготовок призводить до появи зон розуцільнення порошкового матеріалу та зменшення величини накопиченої пластичної деформації в цих зонах.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЛЬТРУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ СПИРТОВОГО ВИРОБНИЦТВА *

4.1. Технологічні особливості виготовлення фільтруючих елементів

Одним із важливих напрямків порошкової металургії є створення пористих проникних матеріалів, працездатність та область застосування яких визначається наявністю взаємозв'язаної структури пор.

Пористі проникні матеріали широко застосовуються в різних галузях сучасної промисловості [104-106]. Зокрема, вони використовуються в якості фільтрів, що забезпечують очищення рідин і газів.

Перспективним методом отримання фільтруючих елементів є радіально-ізостатичне пресування порошків [107-109]. Метод дозволяє виготовляти довгомірні вироби простої та складної форми з рівномірним розподілом пористості. Ущільнення порошку відбувається під впливом еластичного елемента, що дозволяє ефективно механізувати та автоматизувати процес, підвищити культуру виробництва, зменшити енерговитрати тощо. Малі об'єми проміжних середовищ дозволяють зменшити металомісткість, габарити і вартість обладнання порівняно з іншими видами пресування.

Методом радіально-ізостатичного пресування отримують також багатошарові фільтри, пористість шарів яких відрізняється. Завдяки наявності змінної пористості має місце більш рівномірний розподіл забруднювача по об'єму у порівнянні з одношаровими фільтруючими елементами, що дозволяє збільшити ресурс роботи фільтру. При цьому ефективність очищення підвищується [12,110, 111]. Перспективним напрямом є створення фільтруючих елементів складної форми, а також елементів з розвиненою поверхнею.

*Робота виконана спільно з Луцьким національним технічним університетом

Одним з методів збільшення площі робочої поверхні є формування ребристої бічної поверхні, оскільки саме така трансформація забезпечує ефективніше використання виробів [112].

У Луцькому національному технічному університеті розроблена технологія отримання багат шарових градієнтних фільтруючих елементів і фільтруючих матеріалів складної форми, спроектовано та виготовлено обладнання для її реалізації.

Схема і зовнішній вигляд пристрою для радіально-ізостатичного пресування наведені на рис.4.1. Основним елементом пристрою є жорстка циліндрична рама, яка може сприймати значні осьові навантаження. Рама складається з окремих пластин. При пресуванні навантаження рівномірно розподіляється на кожен з пластин, що дозволяє створювати більш високі тиски.

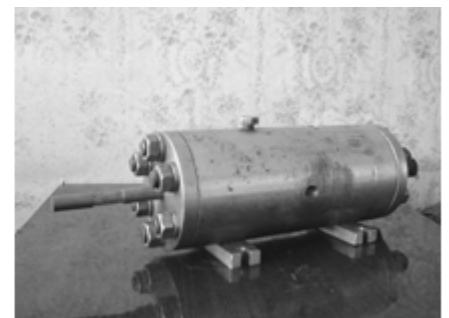
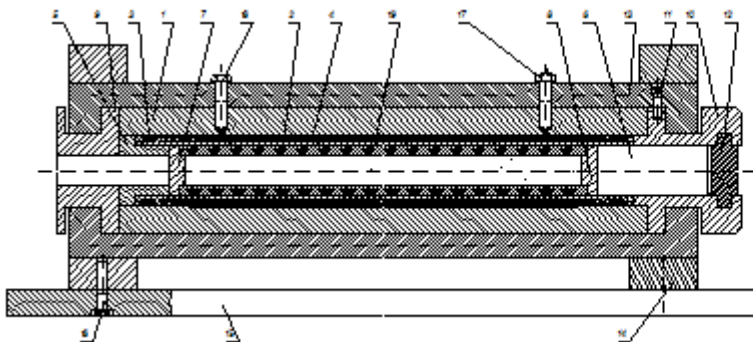


Рис. 4.1. Пристрій для пресування ущільнювальних матеріалів різного роду: металічні, керамічні порошки, графіт, волокна, дріт, сітка, тощо [109].

За допомогою розробленого обладнання можливе отримання виробів різного призначення з порошкових та інших ущільнювальних матеріалів. Однак при цьому виникає ряд труднощів, пов'язаних з передбаченням розподілу властивостей за об'ємом одержуваних виробів.

Тому, у зв'язку з необхідністю управляти величиною пористості шарів фільтруючих елементів, було проведено моделювання процесу їх отримання.

4.2. Пресування фільтруючих елементів циліндричної форми

4.2.1. Схеми технологічного процесу формоутворення багат шарових градієнтних фільтруючих елементів

Схема технологічного процесу наведена на рис.4.2.



Рис. 4.2. Схема технологічного процесу отримання багат шарових градієнтних фільтруючих елементів з порошку ШХ15

При пресуванні багат шарових 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 фільтруючих пористих порошкових виробів, економії сировини та витрат на виготовлення суцільний еластичний вкладиш можна виготовляти у вигляді набору вкладишів один в одному. Це дає змогу керувати товщиною шарів і отримувати вироби з більш широким діапазоном розмірів, а також дозволяє покращити технологічність та культуру пресування.

Можливі дві схеми пресування фільтруючих елементів циліндричної форми: на оправку та на матрицю (рис.4.3). Обидві ці схеми були розглянуті.

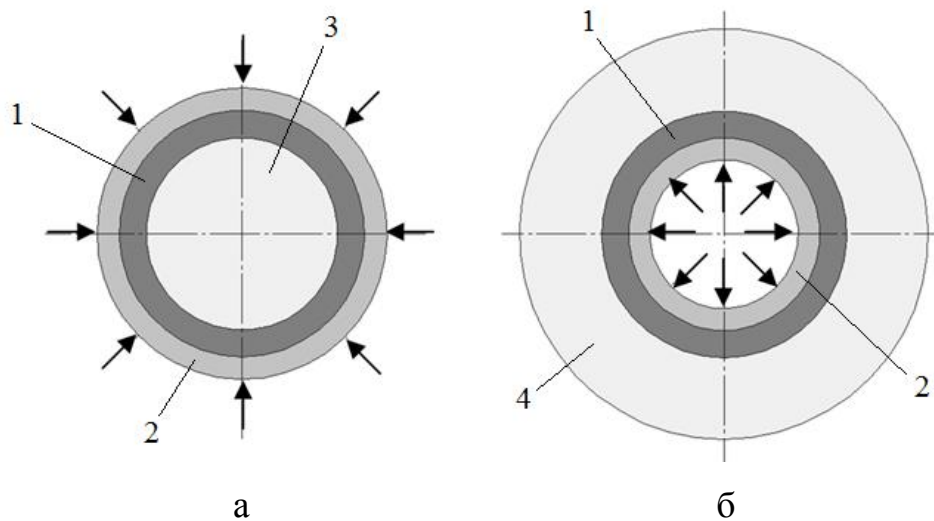


Рис. 4.3. Схеми пресування на оправку (а) та на матрицю (б): 1 - порошок, що ущільнюється; 2 - пружний елемент; 3 - оправка; 4 - матриця

4.2.2. Пресування на оправку

Методом комп'ютерного моделювання досліджено процес радіально-ізостатичного пресування фільтруючих елементів на оправку. Матеріал фільтруючих елементів - сталь ШХ15, матеріал еластичного елемента -

поліуретан. У зв'язку з симетрією розглядали половину осьового перерізу фільтруючого елемента.

Схема пресування на оправку фільтруючого елемента, що має форму пустотілого циліндра, наведена на рис.4.4. Переміщення внутрішньої поверхні порошку 1 в напрямку зменшення радіусу обмежено жорсткою оправкою 2. Зовнішня поверхня виробу переміщується 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 фільтруючого 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.

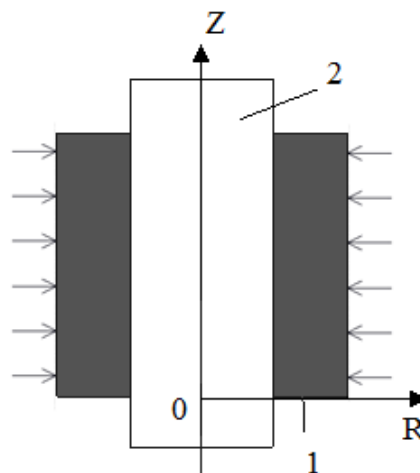


Рис. 4.4. Розрахункова схема ущільнення фільтруючого елемента циліндричної форми на оправку: 1 - порошок, що ущільнюється, 2 - оправка

Результати моделювання по розподілу пористості по перерізу фільтруючих елементів наведені на рис.4.5.

При ущільненні одношарового фільтра розподіл пористості нерівномірний (рис.4.5,а). Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Отриманий результат відповідає даним, наведеним в роботах [109, 113, 114]. По мірі збільшення ступеня деформації різниця між величинами пористості матеріалу у внутрішньої і зовнішньої поверхонь фільтра зменшується.

На рис. 4.5,б представлено розподіл пористості в двошаровому фільтрі. Ущільнення другого (зовнішнього) шару відбувається так само, як і першого шару. При цьому більш щільний внутрішній шар деформується незначно та виконує роль оправки. Подальше збільшення навантаження призводить до того, що настає момент, коли зовнішній шар ущільнився і обидва шари продовжують деформуватися одночасно.

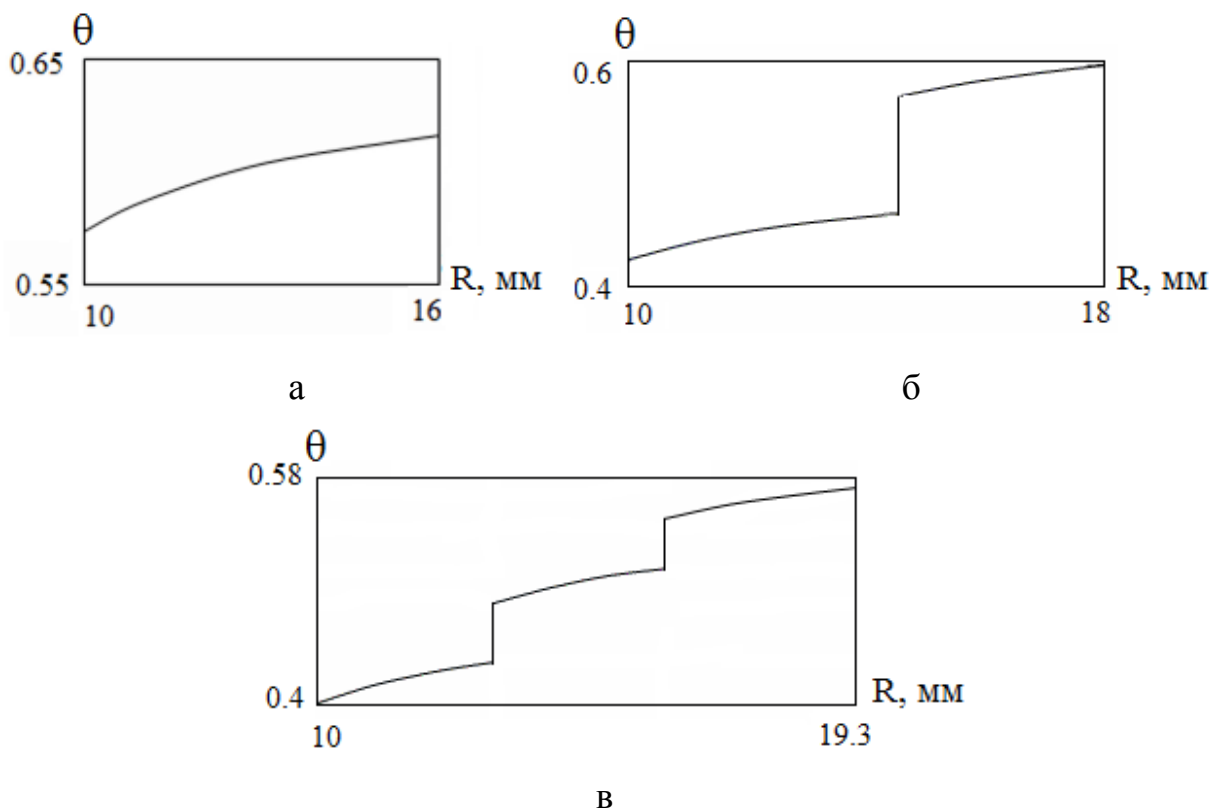


Рис. 4.5. Розподіл пористості θ по радіусу в одношаровому (а), двошаровому (б) і тришаровому (в) фільтруючих елементах

Ущільнення шарів тришарового фільтра відбувається аналогічно (рис. 4.5,в). Товщиною і пористістю шарів можна управляти за рахунок зміни початкової пористості засипаного порошку, внутрішнього діаметра еластичного елемента, а також тиску пресування.

4.2.3. Пресування на матрицю

Схема пресування на матрицю фільтра, що має форму пустотілого циліндра, наведена на рис.4.6. Переміщення зовнішньої поверхні порошку 1 в напрямку збільшення радіусу обмежено жорсткою матрицею 2. Внутрішня 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.

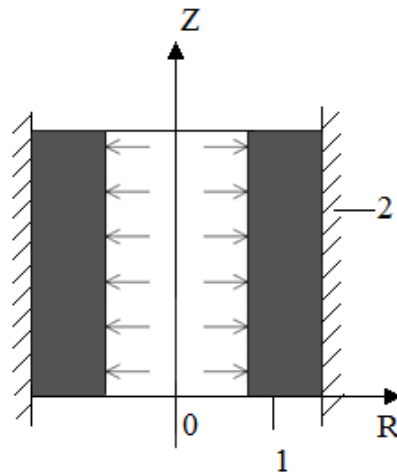


Рис. 4.6. Розрахункова схема ущільнення фільтруючого елемента циліндричної форми на матрицю: 1 - порошок, що ущільнюється, 2 - матриця

Результати моделювання по розподілу пористості по перерізу фільтруючих елементів наведені на рис.4.7.

Встановлено, що мінімальна пористість кожного шару відповідає області у його внутрішній поверхні. У той же час величина пористості багат шарових фільтруючих елементів збільшується від поверхневого шару до внутрішнього. Тому при виготовленні багат шарових фільтруючих елементів використовувати схему пресування на матрицю не є доцільним.

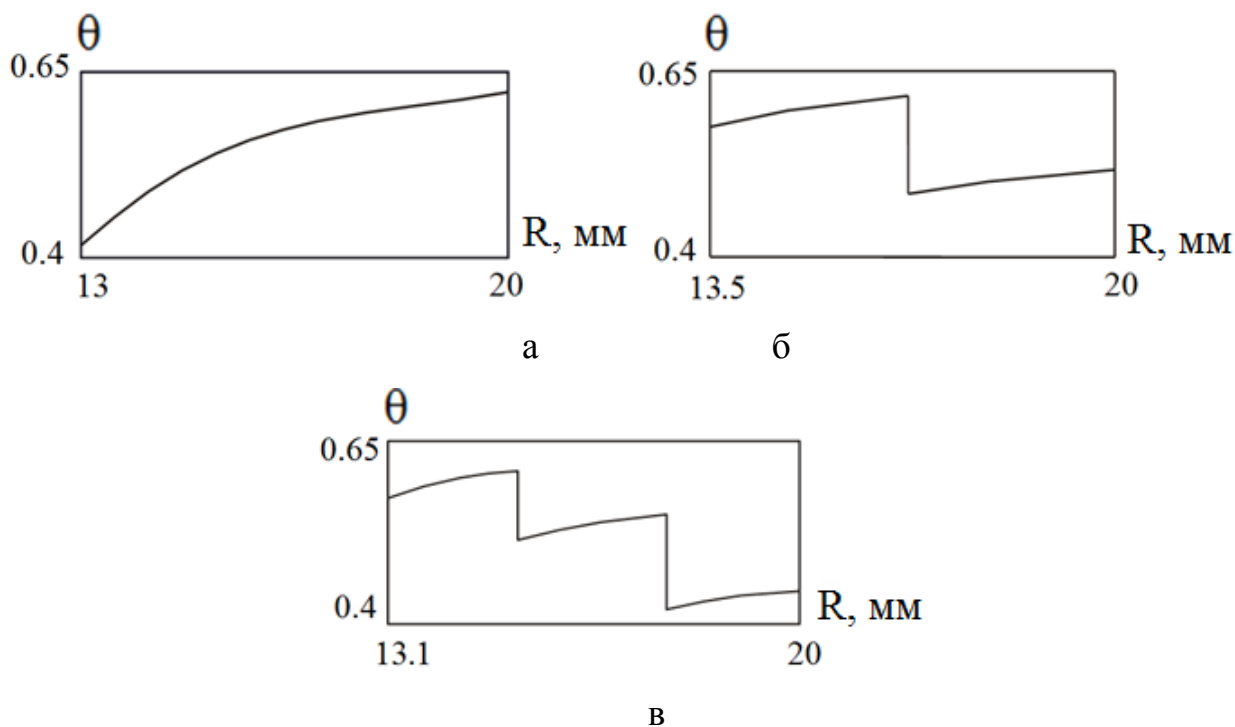


Рис. 4.7. Розподіл пористості θ по радіусу в одношаровому (а), двошаровому (б) і тришаровому (в) фільтруючих елементах

4.3. Пресування фільтруючих елементів у формі колби

Схема форми для пресування фільтрів зі сферичним дном та розрахункова схема для проведення обчислень наведені на рис.4.8

Було встановлено, що розподіл пористості та накопиченої пластичної деформації нерівномірний. Стінка фільтруючого елемента має більшу щільність, ніж дно (рис.4.9). Тому далі був проведений аналіз різних варіантів навантаження.

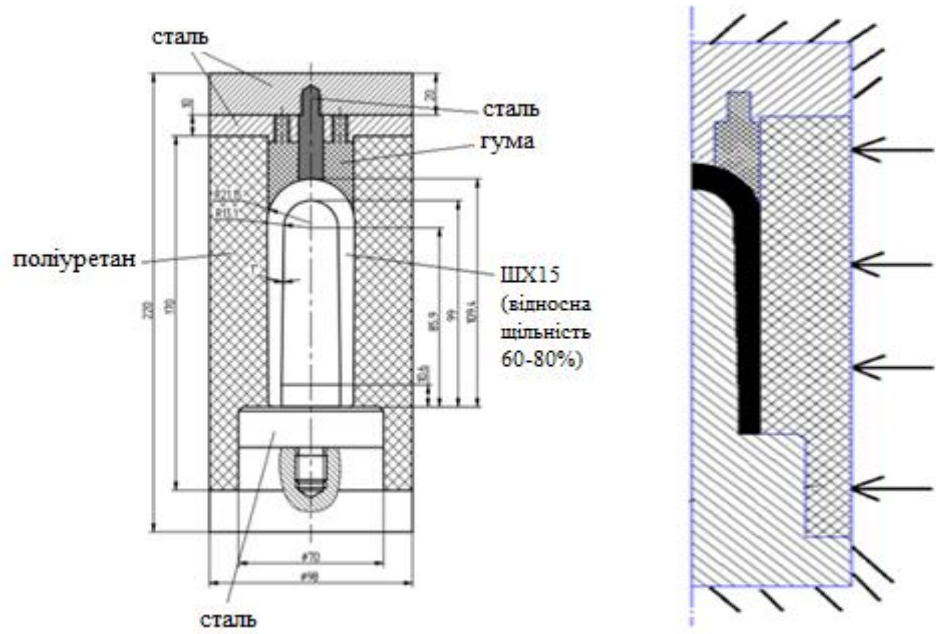


Рис.4.8. Форма для пресування та розрахункова схема

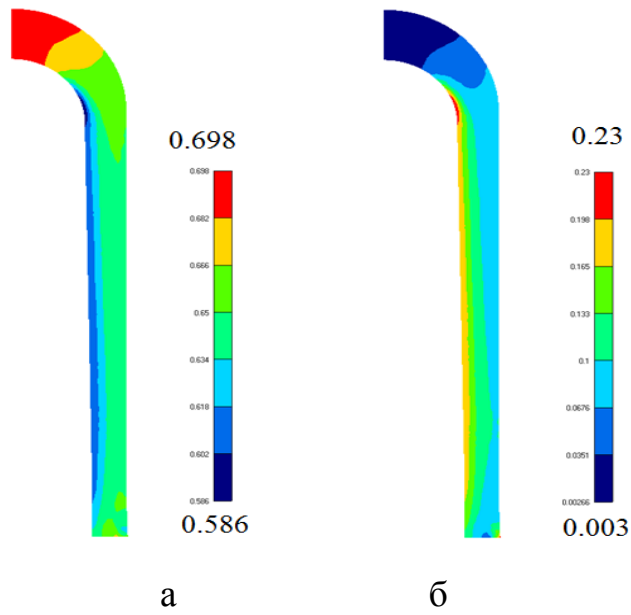


Рис. 4.9. Розподіл пористості (а) та величини накопиченої пластичної деформації (б)

Розглядалися схеми радіального, осьового та комбінованого ущільнення (рис.4.10).

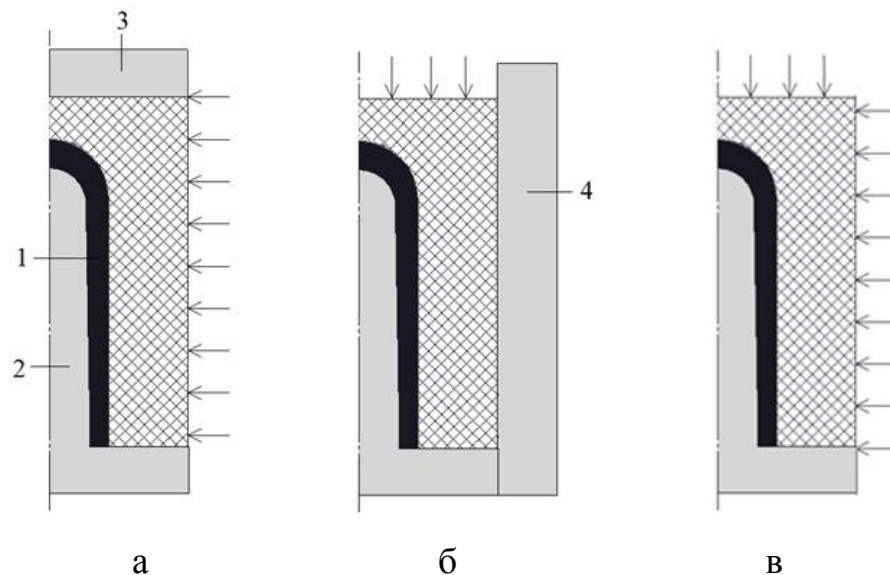


Рис. 4.10. Аналіз варіантів навантаження, розрахункові схеми радіального (а), осьового (б) та комбінованого (в) ущільнення: 1 - порошок, що ущільнюється, 2 - оправка, 3 - кришка, 4 - стінка

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.4.10,а), а при осьовому ущільненні нерухома стінка (4 на рис.4.10,б).

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

На рис.4.11 приведені результати комп'ютерного моделювання. У початковий момент при радіальному навантаженні відбувається ущільнення стінки фільтруючого елемента (рис.4.11,а). Розподіл пористості по радіусу стінки фільтра нерівномірний. Зі збільшенням радіуса пористість зростає. При подальшому пресуванні відбувається збільшення відносної щільності стінки і поширення процесу ущільнення на дно фільтруючого елемента. Проте, як видно з рисунку, у кінці процесу пресування величина пористості в області 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 пористість вище.

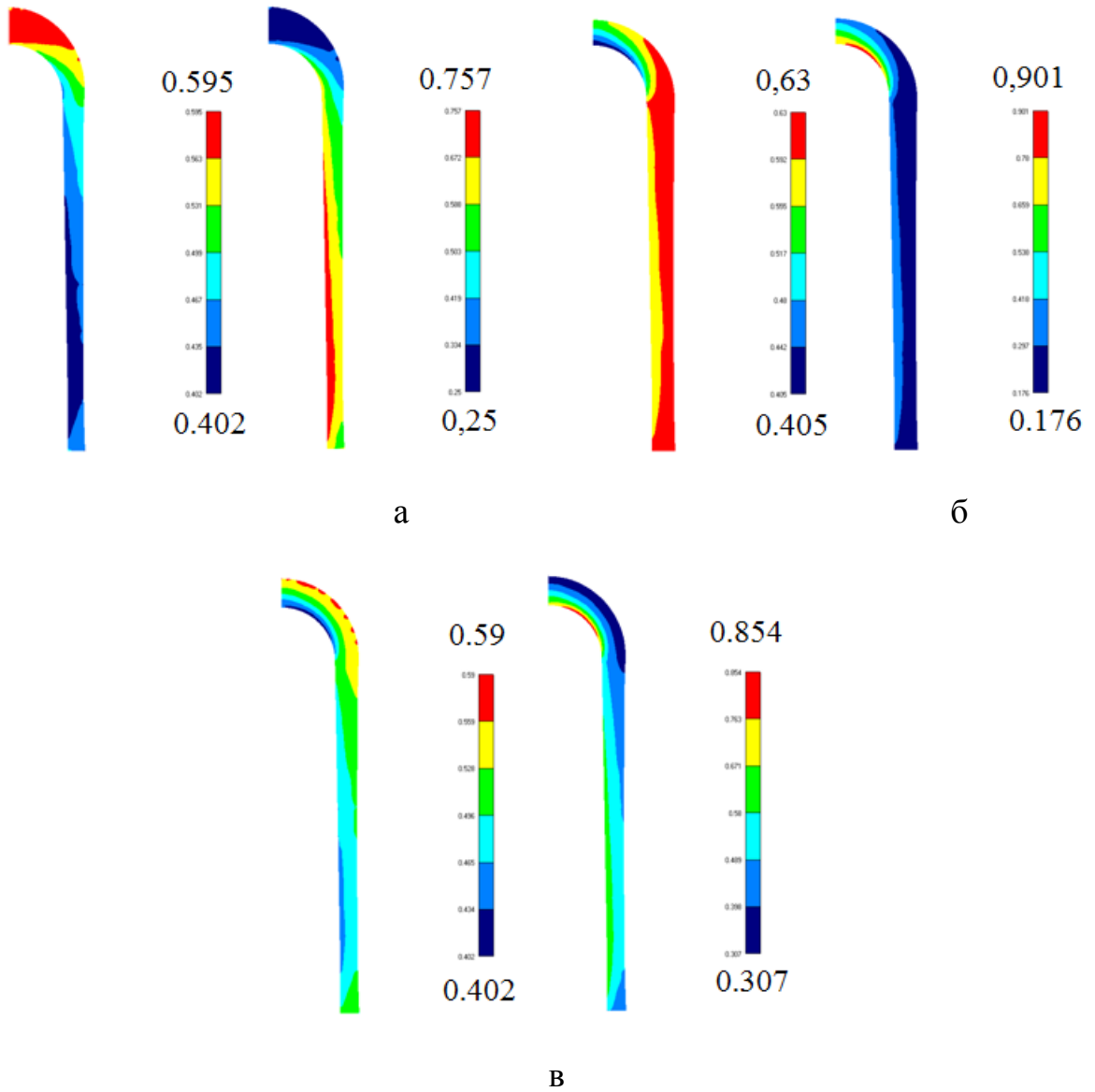


Рис. 4.11. Розподіл пористості та величини накопиченої деформації при радіальному (а), осьовому (б) та комбінованому (в) ущільненні

На рис.4.11,б представлений розподіл пористості та накопиченої пластичної деформації при осьовому навантаженні. Найбільш інтенсивно порошок ущільнюється в області дна фільтра. Розподіл пористості по радіусу дна нерівномірний. Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Ущільнення порошку в

області стінки відбувається в меншому ступені. У внутрішній поверхні стінки пористість нижче, а у зовнішній - вище.

Таким чином, як при радіальному, так і при осьовому ущільненні порошку розподіл величини пористості нерівномірний. У першому випадку менш інтенсивно ущільнюється дно, а в другому - стінка фільтра. У зв'язку з цим була розглянута схема ущільнення, при якій порошок ущільнювали в радіальному та в осьовому напрямку. В результаті застосування такої схеми величина пористості розподілена більш рівномірно.

Висновки до розділу 4

1. Розподіл величини пористості при радіально-ізостатичному пресуванні порошкового фільтруючого елемента циліндричної форми нерівномірний. Зі збільшенням радіуса величина пористості зростає.

2. При виготовленні багат шарових фільтруючих елементів доцільно застосовувати схему ущільнення на оправку, а не на матрицю.

3. Величина пористості при пресуванні порошкових фільтрів у вигляді колби розподілена за об'ємом виробу нерівномірно. Її розподіл залежить від схеми ущільнення - застосування комбінованої схеми дозволяє отримати більш рівномірний розподіл пористості.

РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ ПРАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

5.1. Фільтруючі елементи для розділення технологічних рідин на Луцькому МПД ДП «Укрспирт»

На основі результатів комп'ютерного моделювання та встановлених закономірностей у Луцькому національному технічному університеті були одержані одношарові та багат шарові фільтруючі елементи, виготовлені методом радіально-ізостатичного пресування з порошку сталі ШХ15, отриманого з промислових відходів, а саме:

- одношарові фільтруючі матеріали (-0,315+0,200 мм);
- двошарові фільтруючі матеріали - перший шар (-0,315+0,200 мм), другий шар (-0,160+0,100 мм);
- тришарові фільтруючі матеріали - перший шар (-0,315+0,200 мм), другий шар (-0,160+0,100 мм); третій шар (-0,100+0,050 мм).

Також були отримані фільтруючі елементи складної форми у вигляді колби. Зовнішній вигляд фільтруючих елементів наведений на рис.5.1.

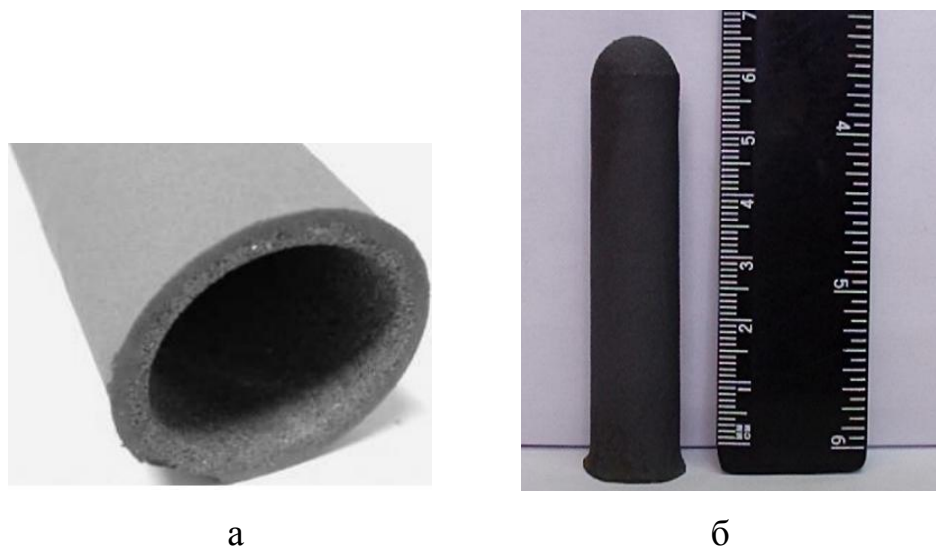


Рис.5.1. Фільтруючі елементи: а - двошаровий;
б - складної форми у вигляді колби

Структура двошарового та тришарового фільтруючих елементів наведена на рис.5.2.

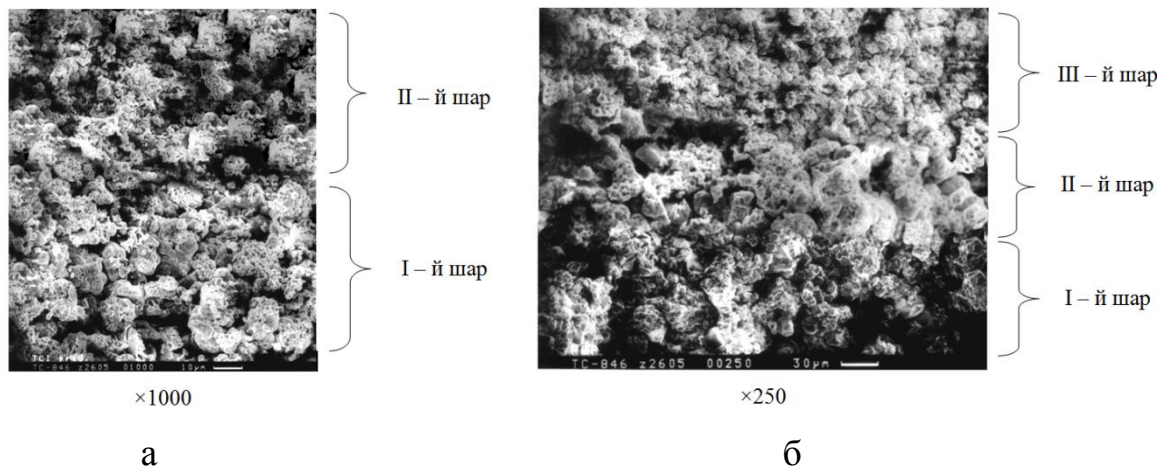


Рис. 5.2. Структура двошарового та тришарового фільтруючих елементів

Виготовлені фільтруючі елементи були впроваджені на Луцькому МПД ДП «Укрспирт». Фільтруючі матеріали використовувалися для очищення технічної води від механічних забруднень у апаратах для очищення технічного спирту та технічної води (відходів спиртогорілчаного виробництва) від різноманітних можливих механічних включень.

Встановлено, що використання одношарових фільтруючих матеріалів із порошку сталі ШХ15, які отримані методом сухого радіально-ізостатичного пресування, підвищує рівномірність поророзподілу фільтруючих матеріалів на 20-30% і збільшує проникливість на 15-20%. 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 технічного спирту та технічної води (відходів спиртогорілчаного виробництва) від різноманітних можливих механічних включень склав 34800 грн.

5.2. Тонкостінні втулки для прес-гранулятора фірми ТОВ “ ГРАНТЕХ ІНЖИНІРИНГ”

На підприємстві ТОВ "ГРАНТЕХ ІНЖИНІРИНГ" виготовляється широка номенклатура виробів типу тонкостінних втулок. В якості матеріалу виробів використовуються різні марки сталей, а також бронза. Деякі з цих деталей наведені на рис.5.3.

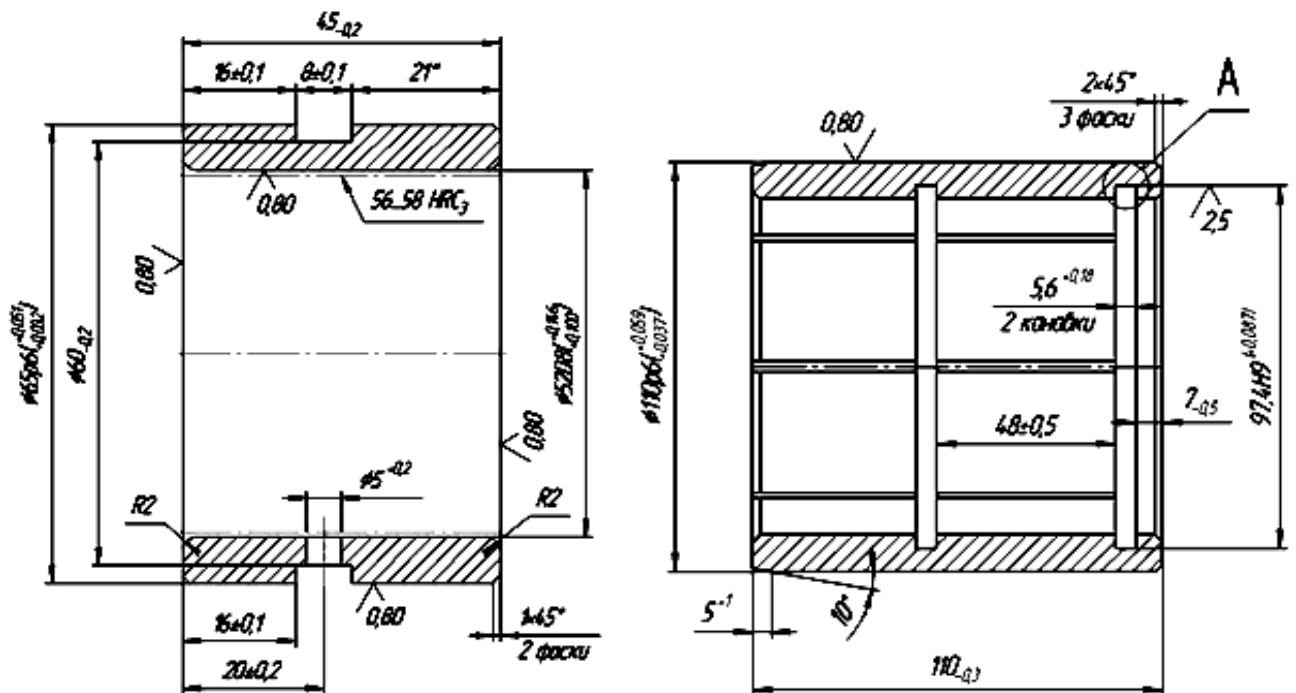


Рис. 5.3. Тонкостінні втулки

В даний час тонкостінні втулки на підприємстві виготовляють механічною обробкою, при цьому велика кількість металу йде у відходи. Тому виникла задача розглянути можливість отримання цих виробів методами порошкової металургії із спечених пористих заготовок. Методом комп'ютерного моделювання були досліджені закономірності ущільнення і формозміни пористих заготовок при технологічних операціях прямого видавлювання та радіального ущільнення. В якості заготовок використовували втулки, отримані методом пресування та

спікання. Матеріалом заготовок була сталь. Також вважали, що початкові властивості матеріалу (пористість, накопичена пластична деформація) були рівномірно розподілені за об'ємом виробів.

5.2.1. Пряме видавлювання

Розрахункова схема процесу прямого видавлювання наведена на рис.5.4. Деформування заготовки 4 відбувається в результаті впливу пуансона 1, що рухається з постійною швидкістю. В результаті відбувається течія матеріалу заготовки в отвір, що звужується, між матрицею 2 і оправкою 3.

Початкова пористість заготовки дорівнювала 0.1. Зовнішній діаметр заготовки дорівнював 140 мм, внутрішній 100 мм. Висота заготовки була 45.5 мм. Внутрішній діаметр матриці, що відповідає зовнішньому діаметру отриманої втулки, дорівнював 120 мм, зовнішній діаметр оправки був 100 мм.

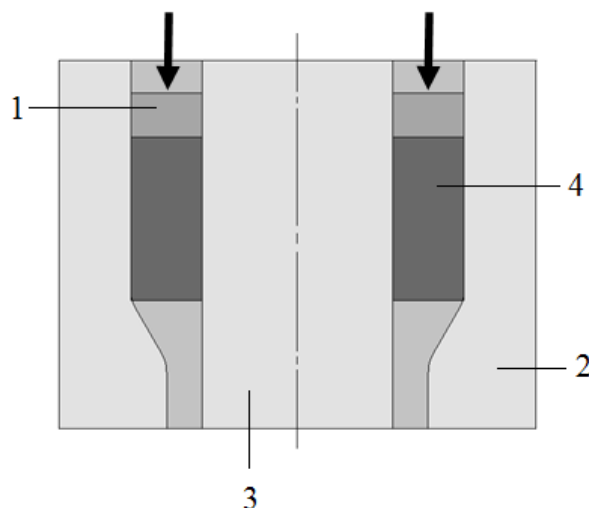
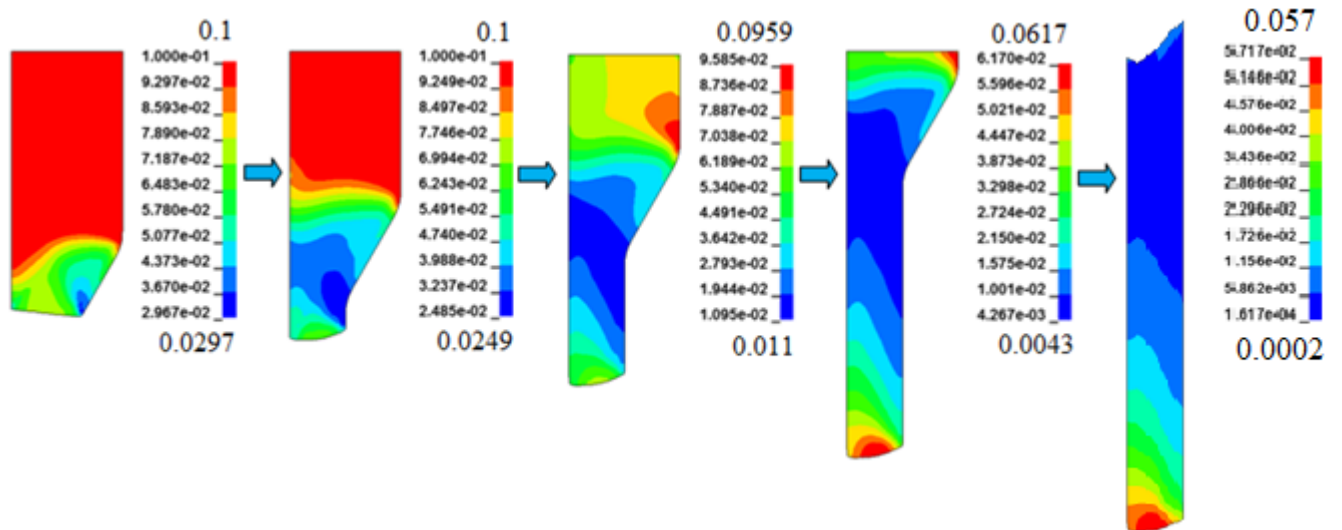


Рис. 5.4. Розрахункова схема прямого видавлювання:

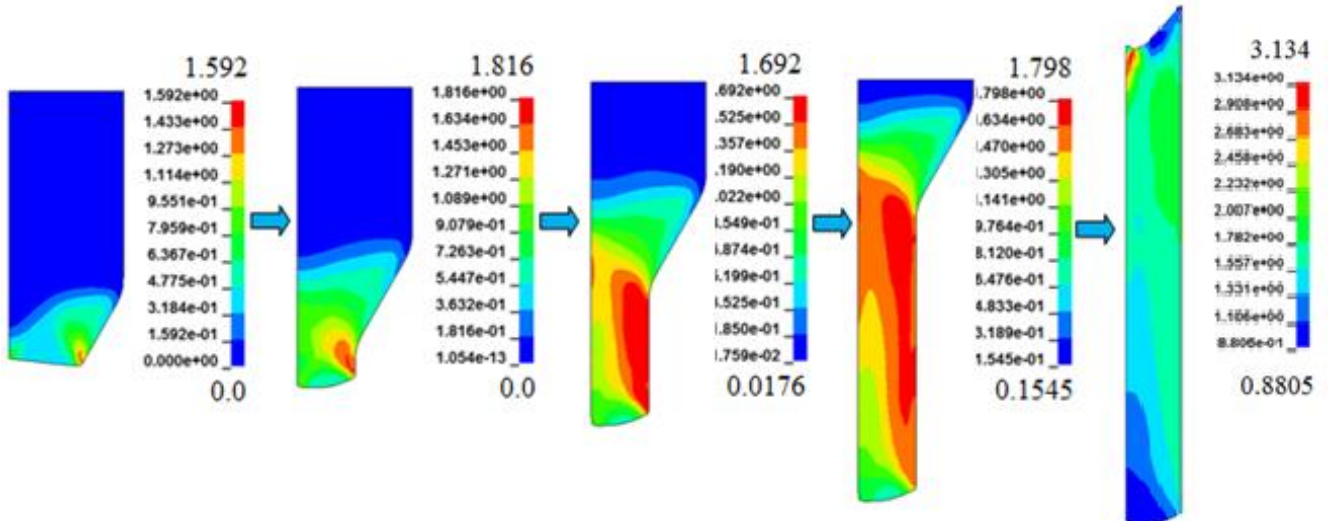
1 - пуансон; 2 - матриця; 3 - оправка; 4 - заготовка

На рис.5.5 наведені результати обчислювального експерименту, що показують зміну форми виробу, а також зміну розподілу пористості та

накопиченої пластичної деформації в процесі прямого видавлювання. Найбільш інтенсивно процес ущільнення матеріалу пористої заготовки відбувається в області переходу конічної поверхні матриці в більш вузьку циліндричну поверхню.



а



б

Рис. 5.5. Аналіз еволюції полів показників якості виробів: а - розподіл пористості; б - розподіл величини накопиченої пластичної деформації

Верхня частина заготовки і область, що розташована біля вільної від навантажень поверхні матеріалу, ущільнюються менш інтенсивно. Аналогічно

змінюється розподіл накопиченої пластичної деформації матеріалу твердої фази виробу. Найбільша величина накопиченої деформації в області контакту заготовки з поверхнею матриці. В області у вільній від навантажень поверхні виробу величина накопиченої деформації нижче.

Залишкова пористість і накопичена деформація в отриманому виробі розподілені нерівномірно (крайні праві зображення на рис.5.5). В області у торця заготовки, вільного від впливу навантажень, величина пористості максимальна (5.7%), а накопичена деформація мінімальна.

Зменшити величину залишкової пористості в цій області можна за рахунок застосування протитиску. На рис.5.6 показана послідовність операцій прямого видавлювання. Спочатку видавлюється перша заготовка 1. Потім друга 2, яка остаточно видавлює першу. Третя заготовка 3 остаточно видавлює другу.

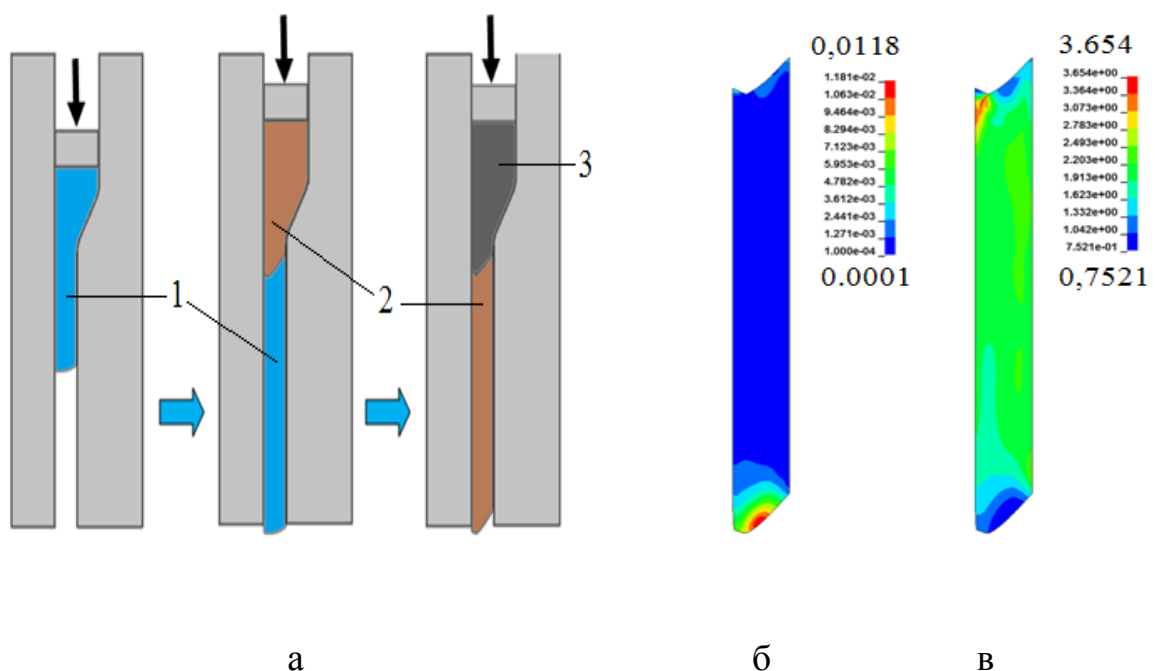


Рис. 5.6. Послідовність операцій прямого видавлювання (а) та розподіл величин пористості (б) і накопиченої деформації (в) в другій заготовці

Перша заготовка здійснювала тиск на другу. Розподіл пористості та величини накопиченої пластичної деформації твердої фази в другій заготовці свідчить, що

вплив протитиску призводить до більш рівномірного розподілу цих параметрів, зменшенню пористості та збільшенню накопиченої деформації.

5.2.2. Радіальне ущільнення

Ущільнення пористої заготовки можливо за рахунок її обтиснення по внутрішній поверхні. Наявність пористості дозволяє проводити таке ущільнення в замкнутому об'ємі. Розрахункова схема радіального обтиснення наведена на рис.5.7. Заготовка 3 розташована в матриці 2. Переміщення матеріалу в радіальному напрямку та його ущільнення відбуваються в результаті впливу пуансона 1, що має конічну форму та переміщується у вертикальному напрямку з постійною швидкістю.

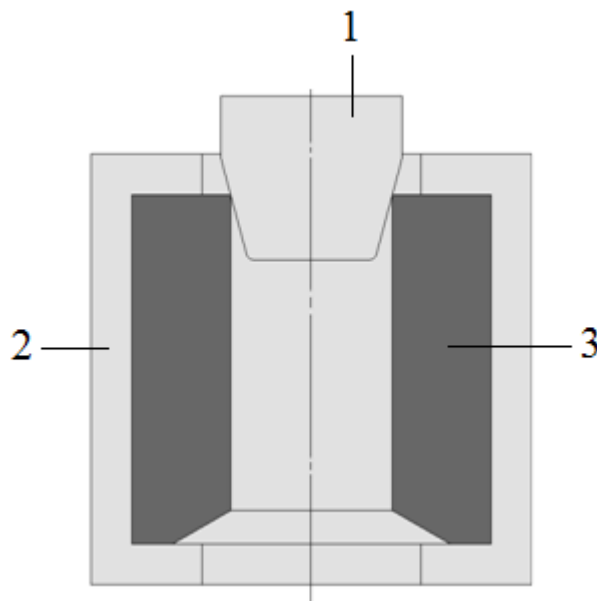


Рис. 5.7. Розрахункова схема радіального ущільнення:

1 - пуансон; 2 - матриця; 3 - заготовка

Початкова пористість заготовки була 0.15. Її зовнішній діаметр дорівнював 120 мм, внутрішній 72 мм. Висота заготовки була 85 мм.

Деформування заготовки проводилося за два проходи. На рис.5.8 і рис.5.9. наведені результати моделювання.

Ущільнення матеріалу відбувається локально (рис.5.8). Спочатку ущільнюється верхня частина заготовки. Далі, відповідно до зміщення пуансона, зона ущільнення переміщується вниз. В кінці першого проходу весь матеріал в області внутрішньої поверхні заготовки ущільнився. Максимальне ущільнення матеріалу відбулося в центрі, а в меншій мірі у торців заготовки.

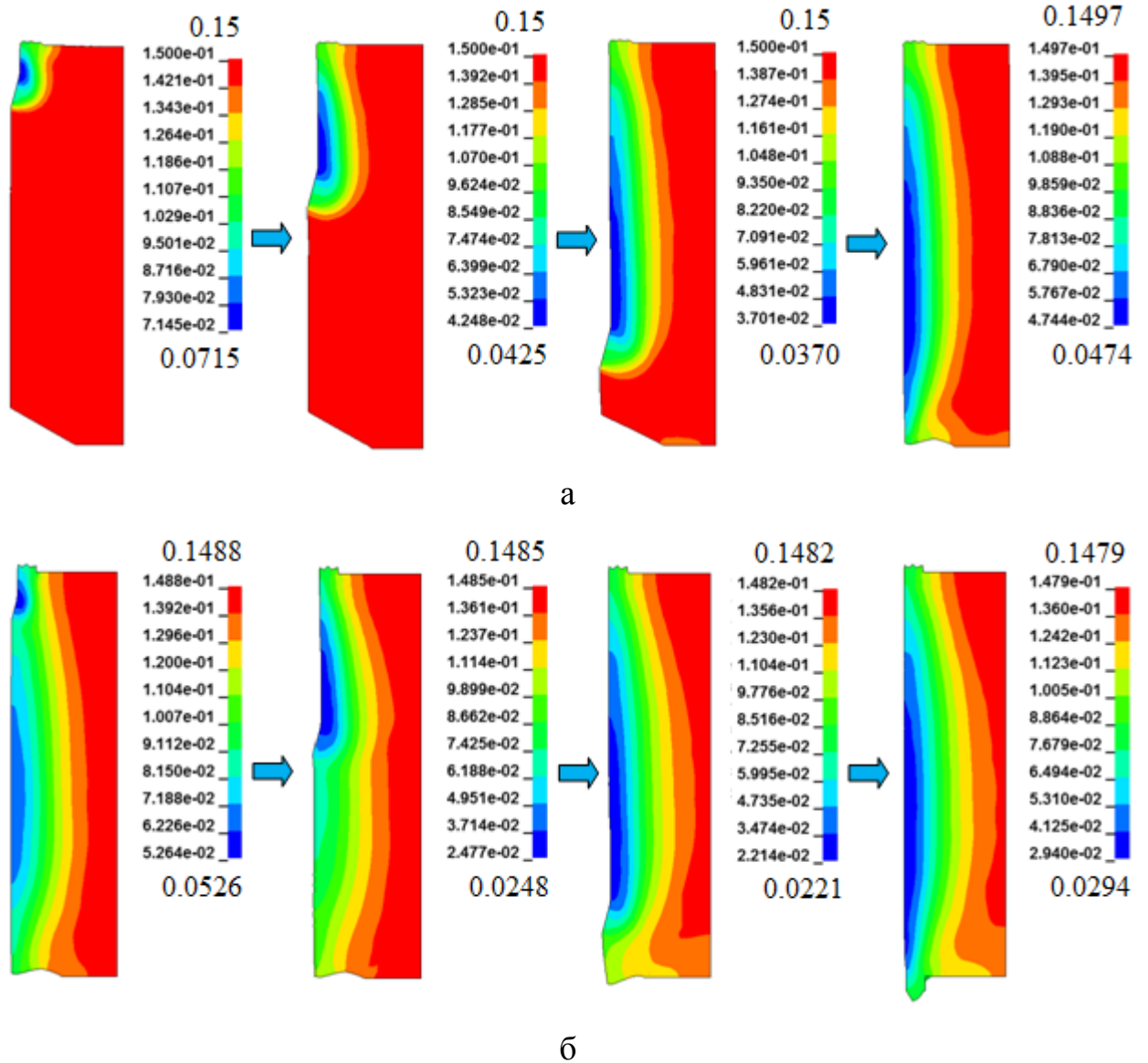


Рис. 5.8. Аналіз еволюції полів пористості при першому (а) і другому (б) проходах

Зі збільшенням радіусу величина пористості зростає і приймає максимальне значення у зовнішній поверхні заготовки. За рахунок течії матеріалу в вертикальному напрямку в нижній частині заготовки, у її внутрішній поверхні, утворюється заусенець.

Діаметр пуансона після першого проходу збільшували. При другому проході область ущільненого матеріалу збільшується і поширюється у напрямку до зовнішньої поверхні заготовки.

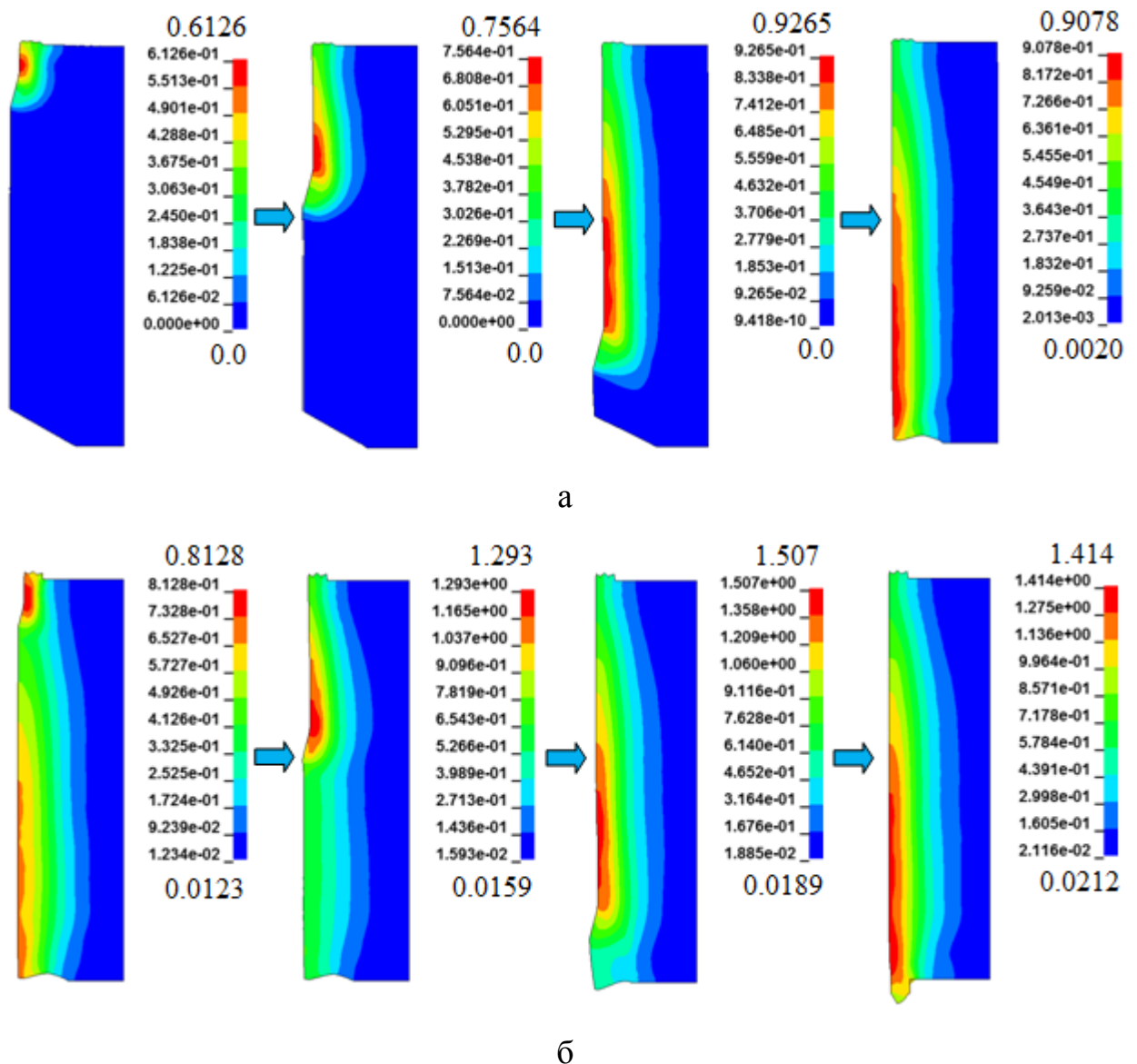


Рис. 5.9. Аналіз еволюції полів величини накопиченої пластичної деформації при першому (а) і другому (б) проходах

Однак, у зовнішній поверхні заготовки, особливо у її торців, матеріал заготовки ущільнюється незначно. Величина заусенця в нижній частині виробу збільшилася. Частково його утворення компенсувала початкова форма заготовки за рахунок наявності виїмки в нижній її частині. Невеликий заусенець утворився і в області верхнього торця виробу. Еволюція величини накопиченої пластичної деформації аналогічна зміні величини відносної щільності (рис.5.9). Максимальна накопичена деформація у внутрішній поверхні заготовки, а мінімальна величина у її зовнішній поверхні.

Результати обчислювальних експериментів передані на підприємство ТОВ "ГРАНТЕХ ІНЖИНІРИНГ" для використання при проектуванні технології отримання тонкостінних втулок.

Висновки до розділу 5

1. На основі результатів комп'ютерного моделювання та встановлених закономірностей у Луцькому національному технічному університеті були одержані одношарові та багат шарові фільтруючі елементи. Виготовлені фільтруючі елементи були впроваджені на Луцькому МПД ДП «Укрспирт».

2. Методом комп'ютерного моделювання досліджені закономірності ущільнення і формозміни пористих заготовок при технологічних операціях прямого видавлювання та радіального ущільнення тонкостінних втулок. Результати обчислювальних експериментів передані на підприємство ТОВ "ГРАНТЕХ ІНЖИНІРИНГ".

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі узагальненої моделі пластичного деформування порошкових і пористих матеріалів та методу скінчених елементів розроблена методика проектування ресурсозберігаючих технологій виготовлення деталей обладнання харчових виробництв
2. Наявність радіальної течії при штампуванні виробів типу "втулка" призводить до підвищення рівня накопичених пластичних деформацій матеріалу.
3. При штампуванні біметалевих заготовок, що мають внутрішню конусоподібну поверхню, відбувається видавлювання нижнього шару з під верхнього. Уникнути цього явища можна за рахунок відмінності початкових пористостей шарів.
4. Процес радіального видавлювання втулки із внутрішнім фланцем протікає в кілька етапів. На заключному етапі відбувається вирівнювання щільності за об'ємом виробу, при цьому розподіл величини накопиченої пластичної деформації істотно нерівномірний. Додаткова радіальна течія матеріалу на початковому етапі видавлювання дозволяє підвищити величину накопиченої пластичної деформації і збільшити рівномірність її розподілу.
5. На початковому етапі зворотного видавлювання відбувається осад та ущільнення пористої заготовки, а потім починає переважати процес видавлювання. Наявність недосконалих контактів у спечених порошкових заготовок призводить до появи зон розущільнення порошкового матеріалу та зменшення величини накопиченої пластичної деформації в цих зонах.
6. При радіально-ізостатичному пресуванні на оправку порошкового фільтруючого елемента циліндричної форми розподіл величини пористості нерівномірний. Зі збільшенням радіуса величина пористості зростає. При пресуванні порошкового фільтруючого елемента циліндричної форми на матрицю величина пористості зі збільшенням радіуса також зростає.

7. При виготовленні багат шарових фільтруючих елементів доцільно використовувати схему пресування на оправку, яка, на відміну від схеми пресування на матрицю, дозволяє отримати постійну зміну пористості по перерізу виробу.
8. Застосування схеми комбінованого ущільнення фільтруючого елемента складної форми у вигляді колби дозволяє отримати більш рівномірний розподіл пористості та накопиченої пластичної деформації.
9. При прямому видавлюванні тонкостінних втулок величина пористості в області у торця заготовки, вільного від впливу навантажень, максимальна, а накопичена деформація мінімальна. Вплив протитиску призводить до більш рівномірного розподілу цих параметрів, зменшенню пористості та збільшенню накопиченої деформації твердої фази.
10. При радіальному ущільненні тонкостінних втулок деформація матеріалу відбувається локально. Зі збільшенням радіусу величина пористості по перерізу виробу зростає.
11. Основні результати роботи впроваджено на Луцькому МПД ДП «Укрспирт» (м. Луцьк) та підприємстві ТОВ «ГРАНТЕХ ІНЖИНІРИНГ».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Малежик І.Ф., Зав'ялов В.Л., Шевченко О.Ю. та ін. Наука про процеси і апарати та її місце серед сучасних наук. *Харчова промисловість*. 2012. Вип. 12. С. 13–17.
2. Серьогін О. О., Пономаренко В. В., Люлька Д.М. Технологічне обладнання харчових виробництв: Конспект лекцій для студ. напряму підготовки 6.050502 «Інженерна механіка» (спеціальності «Обладнання переробних і харчових виробництв») денної та заочної форм навчання. К.: НУХТ, 2011. 160 с.
3. Сухенко Ю. Г., Литвиненко О. А., Сухенко В. Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: Підручник / під ред. професора Ю. Г. Сухенка. К.: НУХТ, 2010. 547 с.
4. Прейс Г. А., Сологуб Н. А., Некоз А. И. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности. М.: Машиностроение, 1979. 208 с.
5. Прейс Г. А. Повышение износостойкости деталей оборудования предприятий пищевой промышленности. М. - Киев: Машгго, 1963. 283 с.
6. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.
7. Кремнев Г. П., Новиков Ф. В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении: учебное пособие. Д. : ЛИРА, 2016. 297 с.
8. Хітров І. О., Осійчук Ю. С. Основи ресурсозбереження машинобудівної продукції. *Вісник НУВГП*, Серія «Технічні науки». 2016. Випуск 1(73). С. 195 - 201.
9. Гиршов В. Л., Котов С. А., Цеменко В. Н. Современные технологии в порошковой металлургии: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. Ун - та, 2010. 385 с.
10. Гропянов А. В., Ситов Н. Н., Жукова М. Н. Порошковые материалы: учебное пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. 74 с.
11. Кипарисов С. С., Либенсон Г. А. Порошковая металлургия. М.: "Металлургия", 1980. 496 с.

12. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, область применения: Справочник / Федорченко И. М., Францевич И. Н., Радомысельский И. Д. и др. Киев: Наукова Думка, 1985. 624 с.

13. Клименков С. С. Проектирование и производство заготовок в машиностроении: учебник. Минск: Техноперспектива, 2008. 407 с.

14. Свистун Л. И. Теоретические и технологические основы горячей штамповки порошковых карбидосталей конструкционного назначения : дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.06 / Южно-Российский государственный технический университет. Новочеркасск, 2010. 348 с.

15. Баглюк Г. А. Научно-технологические принципы получения изделий из порошковых материалов на основе гетерогенных железоуглеродистых сплавов с повышенной износостойкостью : дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.06 / НАН Украины, Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича. К., 2004. 486 с.

16. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник. 2-е видання, доп. та випр. Х.: Світ Книг, 2014. 495 с.

17. He Y., Wang Z., Evans T.J., Yu A.B., Yang R.Y. DEM study of the mechanical strength of iron ore compacts. *Int. J. Miner. Process.* 2015. Vol. 142. P. 73–81.

18. He Y., Evans T.J., Yu A.B., Yang R.Y., DEM investigation of the role of friction in mechanical response of powder compact, *Powder Technol.* 2017. Vol. 319. P. 183–190.

19. Martin C. L., Bouvard D. and Shima S. Study of particle rearrangement during powder compaction by the discrete element method. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* 2003. Vol. 51, Issue 4. P. 667-693.

20. Martin C. L., Bouvard D. Study of the cold compaction of composite powders by the discrete element method. *Acta Materialia.* 2003. Vol. 51. P. 373-386.

21. Martin C. L., Bouvard D. Isostatic compaction of bimodal powder mixtures and composites. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2004. Vol. 46. P. 907 - 927.

22. Sweeney S. M., Martin C. L. Pore size distributions calculated from 3-D images of DEM - simulated powder compacts. *Acta Materialia*. 2003. Volume 51, Issue 12. P. 3635-3649.
23. Martin C. L., Bouvard D., Delette G. Discrete element simulations of the compaction of aggregated ceramic powders. *Journal of the American Ceramic Society*. 2006. Vol. 89, Num. 11, P. 3379-3387.
24. Martin C. L. Elasticity fracture and yielding of cold compacted metal powders. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2004. Vol. 52. P. 1691-1717.
25. Huang Fen, An Xizhong, Zhang Yuxi, Yu A. B. Multi-particle FEM simulation of 2D compaction on binary Al/SiC composite powders. *Powder Technology*, Volume 314. 2017. Pages 39-48.
26. Frenning Goran. An efficient finite/discrete element procedure for simulating compression of 3D particle assemblies. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 197, Issues 49–50. 2008. Pages 4266-4272.
27. Gethin D.T., Ransing R.S, Lewis R.W, Dutko M., Crookc A.J.L. Numerical comparison of a deformable discrete element model and an equivalent continuum analysis for the compaction of ductile porous material. *Computers & Structures*. Volume 79, Issue 13. 2001. Pages 1287-1294.
28. Zavaliangos A. A multiparticle simulation of powder compaction using finite element discretization of individual particles. *Modeling and Numerical Simulation of Materials Behavior and Evolution*, ed. by A. Zavaliangos, V. Tikare, & E. Olevsky. Warrendale, Penn. Materials Research Society. 2002. P. 168-176.
29. Zavaliangos A. A Numerical study of the development of tensile principal stresses during die compaction. *Particulate Science and Technology*. 2003. Vol. 21. P. 105-115.
30. Galen S., Zavaliangos A. Strength anisotropy in cold compacted ductile and brittle powders. *Acta Materialia*. 2005. Vol. 53. P. 4801-4815.
31. Procopio A. T., Zavaliangos A. Simulation of multi-axial compaction of granular media from loose to high relative densities. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005. Vol. 53. P. 1523-1551.

32. Феноменологические теории прессования порошков / М. Б. Штерн, Г. Г. Сердюк, Л. А. Максименко и др. Киев: Наукова думка, 1982. 140 с.
33. Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. М.: Мир, 1966. 136 с.
34. Gurson A. L. Continuum theory for ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1 - Yield criteria and flow rules for porous media. *J. Eng. Mater. Technol.* 1977. Vol. 99. P.2–15.
35. Штерн М. Б. Определяющие уравнения для пластичных пористых тел. *Порошковая металлургия*. 1981. № 4. С. 17–23.
36. Штерн М. Б., Рудь В. Д. Механічні та комп'ютерні моделі консолідації гранульованих середовищ. Київ–Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2010. 232 с.
37. Рудь В. Д. Експериментальна механіка структурно - неоднорідних матеріалів: монографія. Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2010. 271 с.
38. Bigoni D., Piccolroaz A. A new yield function for geomaterials. *Constitutive modelling and analysis of boundary value problems in geotechnical engineering* (Napoli, 22–24 April, Hevelius). Hevelius, 2003. P. 265–281.
39. Roscoe K.H., Schofield A.N., Wroth C.P. On the yielding of soils. *Géotechnique*. 1958. Vol. 8, Issue 1. P. 22–53.
40. Schofield A.N., Wroth C.P. *Critical State Solid Mechanics*. McGraw-Hill, London, 1968. 218 p.
41. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Q. Appl. Math.* 1952. Vol. 10. P. 157–165.
42. Brewin P.R., Coube O., Dorémus P., Tweed J.H. *Modelling of Powder Die Compaction*. Springer-Verlag London Limited, 2008. 329 p.
43. Coube O., Riedel H. Numerical Simulation of Metal Powder Die Compaction with Special Consideration of Cracking. *Powder Metall.* 2000. Vol. 43. P. 123-131.
44. DiMaggio F.L., Sandler I.S. Material model for granular soils. *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, 1971. Vol. 97, Issue 3. P. 935–950.
45. Desai C. S., Hashmi Q. S. E. Analysis, evaluation and implementation of a nonassociative model for geologic materials. *Int. J. Plastic.* 1989. Vol. 5. P. 397-420.

46. Грин Р. Дж. Теория пластинности пористых тел. *Механика*, 1973. № 4. С. 109 - 120.

47. Мартынова И. Ф., Штерн М. Б. Уравнение пластичности пористых тел, учитывающие истинные деформации металла основы. *Порошковая металлургия*. 1978. № 1. С. 23-29.

48. Скороход В. В., Тучинский Л. И. К вопросу об энергозатратах на уплотнение пористых тел. *Порошковая металлургия*. 1978. № 9. С. 16-21.

49. Лаптев А. М. Критерии пластичности пористых металлов. *Порошковая металлургия*. 1982. № 7. С. 12–18.

50. Петросян Г. Л. О теории пластичности пористых тел. *Изв. Вузов. Сер. Машиностроение*. 1977. № 5. С. 10-14.

51. Ogane M., Kawakami T., Shima S. Plasticity theory for porous metals and application. *J. Jap. Soc. Powder and Powder Met.* 1973. Vol. 20. Vol. 5. P. 142.

52. Shima S., Oyane M. Plasticity theory for porous metals. *Jut. Y. Mech. Sciences*. 1976. V. 18. Vol. 6. P. 285-291.

53. Мидуков В. З. Исследование закономерностей пластического деформирования материалов с необратимой объемной сжимаемостью: автореферат дис. ... канд. техн. наук. : 01.02.03 / Том. политехн. ин-т им. С. М. Кирова. Томск, 1975. 21 с.

54. Михайлов О. В., Штерн М. Б. Учет разносопротивляемости растяжению и сжатию в теориях пластичности пористых тел. *Порошковая металлургия*. 1984. N 5. С. 11-17.

55. Gurson A.L. Continuum theory for ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1. Yield criteria and flow rules for porous media. *J. Eng. Mater. Technol.* 1977. Vol. 99. P. 2–15.

56. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 541 с.

57. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 318 с.

58. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
59. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 1976. 464 с.
60. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с.
61. Муйземнек А. Ю., Богач А. А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: Учебное пособие. Пенза: Информационно - издательский центр ПГУ, 2005. 106 с.
62. Бугало Н. Г. Численное решение задач МСС с подвижными границами раздела: дис. ... докт. физ.-мат. наук. : 01.02.04 / Институт проблем механики РАН. Москва, 2003. 222 с.
63. Rahman M.M., Ariffin A.K., Nora S.S.M. Development of a finite element model of metal powder compaction process at elevated temperature. *Applied Mathematical Modelling*. Volume 33, Issue 11. 2009. Pages 4031-4048.
64. Khoei A.R., Shamloo A., Azami A.R. Extended finite element method in plasticity forming of powder compaction with contact friction. *Int. J. Solids Struct.* 2006. Vol. 43, P. 5421-5448.
65. Khoei A.R., Azizi S. Numerical simulation of 3D powder compaction processes using cone-cap plasticity theory. *Mater. Des.* 2005. Vol. 26. P. 137-147.
66. Omed Gh. Abdullah, Fadhil Abd Rasin, and Tariq A. Al-Dhahir. Finite Element Simulation of Alumina Ceramic Powder Compaction. *International Journal of Pure and Applied Physics*. 2009. Volume 5, Number 1. P. 15–31.
67. Bai Q., Lin J., Jiang J., Dean T.A., Zou J., Tian G. A study of direct forging process for powder superalloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Volume 621. Pages 68-75.
68. Huang, C. C., Cheng, J. H. Forging simulation of sintered powder compacts under various frictional conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2002. Vol. 44, Issue 3. 489–507.

69. Баглюк Г. А., Шишкина Ю. А., Титов В. А., Кирилюк С. Ф. Влияние деформированного состояния горячештампованных заготовок из порошковых алюмоматричных композитов на их структуру и свойства. *Обработка материалов давлением*. 2018. № 2. С. 112-119.

70. Баглюк Г. А., Кирилюк С. Ф. Вплив форми вихідної поруватої заготовки на еволюцію деформованого стану та енергосилові параметри процесу її штампування в напівзакритому штампі. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2020. № 1 (88). Р. 49-57.

71. Baglyuk G. A., Maidanyuk A. P., & Shtern M. B. Simulation of the Equal-Channel Angular Extrusion of Porous Blanks using Different Deformation Patterns. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2013. Vol. 51, Issue 9-10. P. 503–508.

72. Kuz'mov A.V., Shtern M.B., Kirkova E.G. et al. Analysing the Twist Extrusion of Porous Blanks Using Modified Theories of Plasticity for Porous Bodies. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2016. Vol. 54. P. 631–640.

73. Rossi R., Alves M.K., Al-Qureshi H.A. A model for the simulation of powder compaction processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 182, P. 286 – 296.

74. Khoei A. R., Samimi M., Azami A. R. Reproducing Kernel Particle Method in Plasticity of Pressure-Sensitive Material with Reference to Powder Forming Process. *Computational Mechanics*. 2006. Vol. 39, Issue 3. P. 247–270.

75. Khoei A.R., Azizi S. Numerical simulation of 3D powder compaction processes using cone - cap plasticity theory. *Mater. Des.* 2005. Vol. 26. P. 137-147.

76. Brandt J., Nilsson L. A constitutive model for compaction of granular media, with account for deformation induced anisotropy. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*. 1999. Vol.4. P. 391–418.

77. LS-DYNA Keyword User's Manual. LSTC, Livermore, California, USA, 2014. Vol.2. 1207 p.

78. Lame O., Bellet D., Michiel M. D., Bouvard D. Bulk observation of metal powder sintering by X-ray synchrotron microtomography. *Acta Materialia*. 2004. Vol. 52, Issue 4. P. 977–984.

79. Korosteleva E., Korzhova V., Krinitcyn M. Sintering behavior and microstructure of TiC–Me composite powder prepared by SHS. *Metals*. 2017. Vol. 7, Issue 8. P. 290–300.

80. Штерн М. Б., Михайлов О. В. Модифицированные модели деформирования порошковых материалов на основе пластичных и труднодеформируемых порошков. *Вісн. національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*. Сер. Машинобудування. 2011. № 62. С. 13–19.

81. Штерн М. Б. Развитие теории прессования порошков и механики деформирования пористых тел. *Порошковая металлургия*. 1992. № 9. С. 15–29.

82. Рыбин Ю. И., Рудской А. И., Золотов А. М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб.: СПбГПУ, 2004. 642 с.

83. Михайлов О. В., Штерн М. Б. Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы прессования на распределение плотности. II. Методика моделирования и анализ схем формования. *Порошковая металлургия*. 2003. N 3/4. С.7-16.

84. Цыбенко А. С. Обобщенные методы и решения технологических задач механики деформируемого твердого тела : дис... докт. техн. наук: 01.02.04. / НАН Украины, Институт проблем прочности. К., 1986. 600 с.

85. Zang Z. L. and Niemi E. A class of generalized mid-point algorithms for the Gurson - Tvergaard material model. *Int. j. numer. methods eng.* 1995. Vol. 38. P. 2033-2053.

86. Chtourou Heedi, Gakwaya Augustin, Guillot Michel. Modeling of the metal powder compaction process using the cap model. Part II: Numerical implementation and practical applications. *International Journal of Solids and Structures*. 2002. Vol. 39. P. 1077 -1096.

87. GID. The personal pre and post processor developed by the International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE, Barcelona, Spain). - [Электронный ресурс]. Доступно: <https://www.gidhome.com/>

88. Михайлов О.В. Интегрированная система компьютерного моделирования процессов обработки давлением порошковых изделий. *Порошковая металлургия*. 1995. № 9/10. с. 99 -104.

89. SolidWorks. (Dassault Systèmes, Vélizy -Villacoublay, France). - [Электронный ресурс]. Доступно: <https://www.3ds.com/products-services/solidworks/>

90. Abaqus. Unified FEA. (Dassault Systèmes, Vélizy -Villacoublay, France). - [Электронный ресурс].

Доступно: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>

91. LS-DYNA. Livermore Software Technology (LST, Livermore, USA). - [Электронный ресурс]. Доступно: <https://www.lstc.com/>

92. Kwon Y. S., Lee H. T., Kim K. T. Analysis for Cold Die Compaction of Stainless -Steel Powder. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1997. Vol. 119, Issue 4. P. 366 - 373.

93. Березин И. М., Залазинский А. Г., Нестеренко А. В., Быкова Т. М. Моделирование процесса двухстороннего прессования металлического порошка в пресс-форме с плавающей матрицей. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2019. No 3. С. 5 - 16.

94. Kobayashi Shiro, Oh Soo-Ik, Altan Taylan. Metal Forming and the Finite-Element Method. Oxford University Press, 1989. 402 p.

95. Fischmeister H. F., Arén B., Easterling K. E. Deformation and densification of porous preforms in hot forging. *Powder metallurgy*. 1971. Vol. 14, Issue 27. P. 144-163.

96. Патент № 29502 Україна, МПК В 22 F 3/02. Штамп для гарячої штамповки порошкових заготовок. опубл. 15.11.2000; Бюл. No 6. 5 с.

97. Баглюк Г. А. Повышение эффективности уплотнения пористых заготовок за счет интенсификации сдвиговых деформаций. Реологія, структура, властивості порошкових та композиційних матеріалів: збірник наукових праць. Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2004. с. 35 - 48.

98. Алиева Л. И., Мартынов С. В. Штампы для радиального выдавливания деталей с внутренним фланцем из трубчатой заготовки. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2013. Т. 2. № 2(16). С. 17-19.

99. Алиева Л. И., Мартынов С. В., Жбанков Я. Г., Гончарук К. В. Силовой режим радиального выдавливания внутреннего фланца. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні*. 2013. № 1. С. 88-98.

100. Петросян Г. Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. М.: Metallurgy, 1988. 152 с.

101. Рябичева Л. А., Усатюк Д. А., Любич К. В. Моделирование оптимальной формы и определение размеров пористой заготовки при прямом выдавливании. *Наукові нотатки*. 2011. Вип. 32. С. 357-362.

102. Горохов В. М., Дорошкевич Е. А., Ефимов А. М., Звонарев Е. В. Объемная штамповка порошковых материалов. Минск: «Навука і техника», 1993. 272 с.

103. Рябичева Л. А., Любич К. В. Анализ напряженно-деформированного состояния при радиально - прямом выдавливании порошковых заготовок. *Сб. науч. тр. "Вестник НТУ "ХПИ": Новые решения в современных технологиях*. Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. № 43. С. 56 - 63.

104. Пористые проницаемые материалы: справочник / ред. Белов С. В., Витязь П. А., Шелег В. К. и др.. М.: Metallurgy, 1987. 332 с.

105. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.

106. Витязь П. А., Капцевич В. М., Шелег В. К. Пористые порошковые материалы и изделия из них. Минск: Высшэйшая школа, 1987. 161 с.

107. Технології, структура, властивості пористих проникних матеріалів : Монографія. / В. Д. Рудь, О. Ю. Повстяной, О. В. Заболотний, Л. С. Богінський. Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2016. 200 с.

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

109. Повстяной О. Ю. Удосконалення технології виготовлення пористих порошкових матеріалів з використанням відходів промислового виробництва : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Луц. держ. техн. ун-т. Луцьк, 2007. 170 с.

110. Мазюк В. В., Пилиневич Л. П., Рак А. Л. Влияние фактора формы частиц исходных порошков на регулярность пористой структуры ППМ. *Порошковая металлургия*. Мн.: ИММС НАНБ, 1997. Вып. 20. С. 46-48.

111. Порошковые материалы с анизотропной поровой структурой [Електронний ресурс]. Доступно: <https://pminstitute.by/produce/poristye/42/>

112. Повстяной О. Ю., Богінський Л. С. Оптимізація форми для виготовлення пористих проникливих матеріалів. *Наукові нотатки*. 2011. Вип. 31. С. 258-264.

113. Povstyanyo Oleksandr, Zabolotnyi Oleg, Rud Victor. Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. *Adv. Design, Simulation Manufacturing, DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2019. P. 456–465.

114. Повстяной О. Ю., Рудь В. Д. Визначення розподілу густини пористого проникного циліндра за радіусом при радіально-ізостатичному пресуванні. *Наукові нотатки*. 2016. Вип. 54. С. 246 - 252.

ДОДАТКИ

Додаток А. Акти впровадження результатів роботи у виробництво



АКТ

впровадження 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 є:

- 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 використання одношарових фільтруючих матеріалів із порошку сталі ШХ15, які отримані методом радіально-ізостатичного пресування, підвищує рівномірність поророзподілу фільтруючих матеріалів на 20-30% і збільшує проникливість на 15-20% у порівнянні з аналогічними 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 «Укрспирт»



П.С. Денисевич

Старший механік
Луцького МПД ДП «Укрспирт»



В.А. Горпинюк

Науковий консультант,
д.т.н., професор



В.Д. Рудь

Завідувач кафедри
прикладної механіки Луцького НТУ
к.т.н., доцент



Д.О. Сомов

Доцент кафедри
прикладної механіки Луцького НТУ
к.т.н.



О.Ю. Повстяной

Аспірант кафедри
машинобудування, стандартизації та
сертифікації обладнання НУХТ



А.О. Михайлов

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Генеральний директор ТОВ «ГРАНТЕХ-ІНЖИНІРІНГ»

Лисенко О.В.

26 січня 2021 р.

АКТ

про впровадження результатів науково-дослідної роботи у виробництво

Ми, що нижче підписалися, представники Національного університету харчових технологій (НУХТ): професор кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв (МАХФВ) Штефан Є.В., аспірант кафедри МАХФВ Михайлов А.О. та представники ТОВ «ГРАНТЕХ-ІНЖИНІРІНГ»: генеральний директор Лисенко О.В., директор з виробництва Даценко В.М. склали цей акт в тому, що у межах творчої співпраці НУХТ та ТОВ «ГРАНТЕХ-ІНЖИНІРІНГ» в проектувальну практику вищеназваного підприємства було впроваджено науково-дослідну роботу спрямовану на розроблення ресурсозберігаючих технологічних процесів виготовлення деталей грануляційного обладнання.

Отримані результати дозволять розробити високопродуктивні технології виготовлення з порошкових матеріалів запасних частин для окремих вузлів прес-гранулятора. Очікується, що відповідні деталі будуть мати суттєво меншу собівартість у зрівнянні з аналогами, що виготовляються шляхом механічного оброблення заготовок з компактних матеріалів, що забезпечить отримання економічного ефекту.

Представники НУХТ

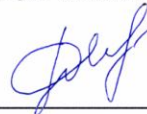
Керівник науково-дослідної роботи



Штефан Є.В.

Представники

ТОВ «ГРАНТЕХ-ІНЖИНІРІНГ»



Даценко В.М.

Виконавець



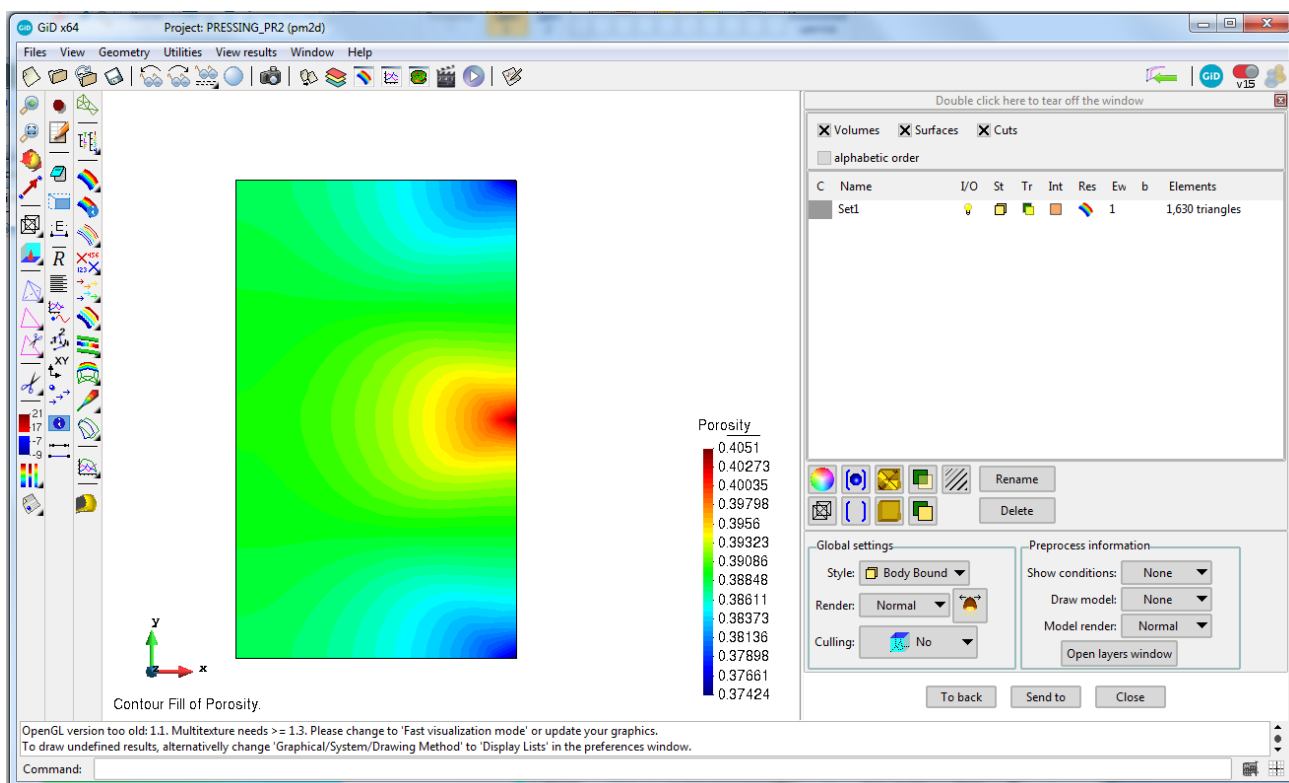
Михайлов А.О.

Додаток Б. Сертифікат учасника міжнародної конференції

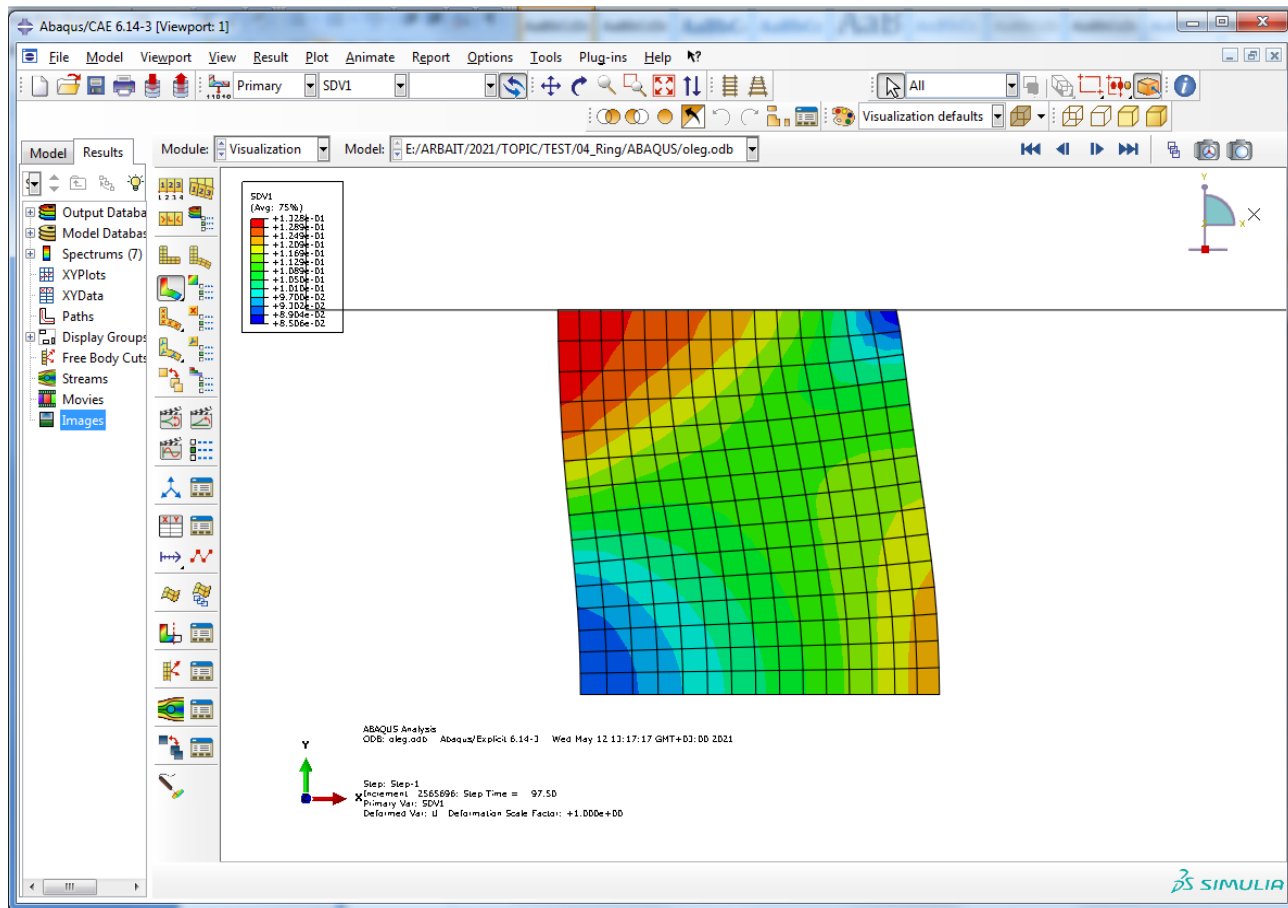


Додаток В. Реалізація реологічних моделей деформування порошкових і пористих матеріалів

1. Модель пластичного деформування. В якості пре- і постпроцесора використовується програмний пакет GID. Розподіл пористості при двосторонньому пресуванні (в силу симетрії розглядається половина осьового перерізу).



2. Модель пружно-пластичного деформування. Система ABAQUS, підпрограма VUMAT. Розподіл величини пористості (змінна користувача SDV1) при вільній осадці пористої заготовки, що має форму кільця (в силу симетрії розглядається чверть осового перерізу).



3. Модель пружно-пластичного деформування. Система LS-DYNA, підпрограма UMAT. Розподіл величини пористості (змінна користувача History Variable # 1) при прямому видавлюванні (в силу симетрії розглядається половина осового перерізу).

