

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-05>
УДК 621.762; 621.77

¹ Михайлов А. О.

PhD, м. н. с.

ORCID: 0000-0003-1442-0658

² Штефан Є. В.

д-р. техн. наук, професор

ORCID: 0000-0002-0697-7651

¹ Михайлов О. В.

д-р. техн. наук, ст. н. с.

ORCID: 0000-0001-6040-2376

^{1,2} Штерн М. Б.

*д-р. техн. наук, член-коресп. НАН
України*

ORCID: 0000-0002-7757-5721

¹ Інститут проблем

матеріалознавства ім. І.М.

Францевича НАН України /
Україна

² Київський політехнічний

інститут імені Ігоря Сікорського /
Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВИРОБІВ З ПОРШКОВИХ ТА ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація: розроблена математична модель процесів формоутворення структурно-неоднорідних пористих матеріалів, яка включає аналітичну, алгоритмічну та цифрову моделі. Використовуються співвідношення теорії пластичності пористого тіла, які, на відміну від існуючих, дозволяють описувати деформування як порошкових матеріалів, так і пористих заготовок. Моделювання виконано методом скінчених елементів. Розглянуто пластичну та пружно-пластичну поведінку матеріалу. Розв'язок задач деформування виконувався покроково, методом послідовних навантажень. На кожному з етапів необхідні параметри моделі визначалися в результаті ітераційного процесу. Алгоритмічні моделі були реалізовані у вигляді відповідних цифрових моделей. Цифрова модель пластичного деформування має наступні основні блоки: препроцесор, модуль моделювання та постпроцесор. Передбачена можливість використання існуючих програм геометричного моделювання, а також програм пре- і пост- процесорної обробки даних. Цифрова модель пружно-пластичного деформування була реалізована у вигляді підпрограм, які були імплементовані в програмні системи моделювання методом скінчених елементів. Для перевірки адекватності розроблених цифрових моделей проведено порівняння отриманих результатів з експериментальними даними та результатами моделювання інших авторів. Порівняння виконано для процесів двобічного пресування порошків та вільної осадки пористих циліндричних заготовок. Досліджені закономірності деформування пористих заготовок під час радіального ущільнення по внутрішньому діаметру. Деформування проводилося за два проходи. Встановлено, що деформація матеріалу відбувається локально. Показано вплив кількості проходів на еволюцію параметрів, що визначають властивості виробів.

Ключові слова: ресурсозберігаючі технології, порошкова металургія,

дисперсні системи, порошкові матеріали, пористі заготовки, пластичність, обробка тиском, моделювання, метод скінчених елементів.

ВСТУП

Успішний розвиток машинобудування можливий на основі впровадження ефективних ресурсозберігаючих технологій. До числа таких технологій відносяться методи 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.

Останні роки характеризуються значним розширенням застосування процесів деформування порошкових матеріалів та пористих заготовок. Застосування пористих заготовок дозволяє ущільнити їх і надати виробу задану форму з меншими зусиллями, скоротити число переходів та зменшити кількість потрібного штампового інструменту

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При проектуванні технологічних процесів порошкової металургії актуальним є дослідження впливу схем деформування на розподіл параметрів, що визначають характеристики виробів. Поряд із традиційними методами, в даний час при проектуванні виробництва все ширше застосовуються інформаційні технології, методи комп'ютерного моделювання. Розробка ефективних методів моделювання представляє собою важливу проблему.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Існують два основні підходи, які застосовують при моделюванні процесів деформування порошкових матеріалів та пористих заготовок: дискретний і континуальний.

Дискретний підхід розглядає взаємодію між окремими елементами (частинками) дисперсного середовища [1-3]. Він реалізований в методі дискретних елементів. 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. Метод дискретних елементів не має недоліків континуального підходу, пов'язаних з порушенням суцільності тіла, що деформується, він дозволяє моделювати поведінку багатокомпонентних середовищ. До недоліків дискретних методів можна віднести великі обчислювальні витрати, складність визначення необхідних для проектування технологічних процесів характеристик, обмеженість застосування. Тому основним підходом при моделюванні процесів деформаційної обробки порошкових матеріалів є континуальний підхід.

Вводячи континуальні уявлення, виходять з того факту, що поведінка окремої частинки порошку не представляє поведінку усієї порошкової маси [4]. 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 усїєї порошкової маси, називають репрезентативним елементом. Його об'єм, як правило, на декілька порядків менший за об'єм усїєї 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.

Моделі пластичної течії порошоків [5-7] і пористих тіл [8-10] відрізняються і відображають той факт, що пористі тіла 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 ряді універсальних програмних систем. В сучасні програми імплементовані моделі порошкових і пористих тіл, що дає можливість моделювати процеси деформування дисперсних середовищ. Однак для порошоків 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.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є розробка методу моделювання, що дозволяє дослідити закономірності процесів деформаційної обробки як порошкових матеріалів, так і пористих заготовок.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблено метод дослідження закономірностей процесів формоутворення деталей з порошкових та пористих матеріалів. Використовуються співвідношення теорії пластичності пористого тіла запропоновані у роботі [11] та метод скінчених елементів.

Розробка математичної моделі процесу деформування порошкових матеріалів та пористих заготовок включає низку послідовних етапів. Ці етапи визначають наступну структуру математичної моделі: аналітична, алгоритмічна та цифрова моделі.

1. Аналітична модель

1.1. Співвідношення теорії пластичності пористого тіла

Рівняння контури поверхні навантаження в р-т площині (рис. 1) має вигляд:

$$F = \frac{(p - p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} - \tau_s^2 = 0, \quad (1)$$

де p – величина гідростатичного тиску,
 τ – інтенсивність дотичних напружень,

φ і ψ – матеріальні функції, залежні від пористості,
 τ_s – границя текучості матеріалу порошку або твердої фази пористого тіла,
 p_0 – значення гідростатичної компоненти напруженого стану, за якої об'єм пористого матеріалу не змінюється.

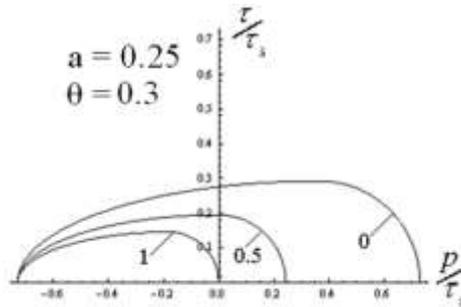


Рисунок 1 – Вигляд контуру поверхні навантаження в р-т площині при різних значеннях параметру m

Вирази для матеріальних функцій визначаються наступним чином:

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

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

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

$$\psi_2 = 4(1-\theta)\psi_0 \cdot \frac{a^2}{(1+m)^2}. \quad (5)$$

$$p_0 = \tau_s \sqrt{1-\theta} \sqrt{\psi_0} \cdot \left(\frac{1-m-2 \cdot a}{1+m} \right). \quad (6)$$

$$\psi = \frac{1}{2} (1 - \text{Sign}(p - p_0)) \psi_1 + \frac{1}{2} (1 + \text{Sign}(p - p_0)) \psi_2. \quad (7)$$

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

$$\sigma_{ij} = \frac{\tau_s \cdot \varphi}{w} \left[e_{ij} + \left(\frac{\psi}{\varphi} - \frac{1}{3} \right) \cdot e \cdot \delta_{ij} \right] + p_0 \cdot \delta_{ij}. \quad (8)$$

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. Деформаційне зміцнення твердої фази можна враховувати за допомогою рівняння (9):

$$w = \frac{\sqrt{Y^2\varphi + e^2\psi}}{\sqrt{1-\theta}} + \frac{p_0}{\tau_s} \cdot \frac{e}{1-\theta}. \quad (9)$$

Прийнята реологічна модель матеріалу дозволяє описувати деформування як порошкових, так і пористих заготовок. Вона враховує різний опір цих матеріалів при розтягуванні та при стисканні.

1.2. Співвідношення методу скінчених елементів

Розглянуто пластичну та пружно-пластичну поведінку матеріалу, що деформується.

Модель пластичного 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 (10).

$$\int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV = \int_S p_i v_i dS. \quad (10)$$

Рівняння (10) 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.

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

$$J = \int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV - \int_S p_i v_i dS. \quad (11)$$

З урахуванням визначальних співвідношень пластичної течії порошкових і пористих тіл рівняння (11) прийме вигляд:

$$J = \int_V \tau_s \left(\frac{\sqrt{Y^2\varphi + e^2\psi}}{\sqrt{1-\theta}} + \frac{p_0}{\tau_s} \cdot \frac{e}{1-\theta} \right) dV - \int_S p_i \cdot v_i dS, \quad (12)$$

де p_i – навантаження, прикладені на поверхні тіла, що деформується,

V – об'єм тіла;

S – поверхня тіла.

v_i – швидкості переміщення точок тіла, що деформується під дією навантажень p_i .

Отримана в результаті знаходження екстремуму функціоналу (12) система диференціальних рівнянь замінюється дискретною скінчено-елементною моделлю, яка являє собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь:

$$[K] \cdot \{\dot{X}\} = \{P\} - \{P_0\}, \quad (13)$$

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

N_e – кількість скінченних елементів;

V – об'єм елемента;

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

$\{P\}$ – стовпець вузлових зусиль;

$\{P_0\} = [B]_{(e)}^T \{P_0\}_{(e)} dV$ – 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 (8).

Система рівнянь (13) 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:

$$\{X\}_{m+1} = \{X\}_m + \int_{t_m}^{t_{m+1}} \{ [K]^{-1} (\{P\} - \{P_0\}) \} dt. \quad (14)$$

При двошаровій апроксимації отримаємо:

$$\Delta \{X\}_{m+1} = (1 - \alpha) \cdot \Delta t \cdot [K]_m^{-1} (\{P\} - \{P_0\})_m + \alpha \cdot \Delta t \cdot [K]_m^{-1} (\{P\} - \{P_0\})_{m+1}, \quad (15)$$

де $0 \leq \alpha \leq 1$, при обчисленнях вважали $\alpha = 0,5$.

Модель пружно-пластичного 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 (16). Пружні деформації зворотні, а пластичні – незворотні.

$$d\xi_{ij} = d\xi_{ij}^e + d\xi_{ij}^{pl}. \quad (16)$$

Прирошення пружних деформацій визначаються згідно із законом Гука (17).

$$d\xi_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{kk}) \sigma_{ij}. \quad (17)$$

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

$$d\xi_{ij}^{pl} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}; \quad \lambda > 0. \quad (18)$$

Відповідно, збільшення об'ємної деформації і деформації зсуву визначається виразами (19) та (20).

$$de^{pl} = \lambda \frac{\partial F}{\partial p} = \frac{2(p-p_0)}{\psi}, \quad (19)$$

$$d\gamma^{pl} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \tau} = \frac{2\tau}{\varphi}. \quad (20)$$

Варіаційний функціонал і система рівнянь методу скінченних елементів для моделі пружно-пластичного деформування приймають вигляд (21) і (22):

$$J = \int_V \tau_s \left(\frac{\sqrt{Y^2 \varphi + e^2 \psi}}{\sqrt{1-\theta}} + \frac{\dot{p}_0}{\tau_s} \cdot \frac{e}{1-\theta} \right) dV - \int_S \dot{p}_i \cdot v_i dS, \quad (21)$$

$$[K] \cdot \{\dot{X}\} = \{\dot{P}\} - \{\dot{P}_0\} \quad (22)$$

3. Алгоритмічна модель

Рішення задач пластичного 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 рисунку 2.

Для процесу пружно-пластичного деформування моделювання 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. Алгоритмічна модель має вигляд:

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

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

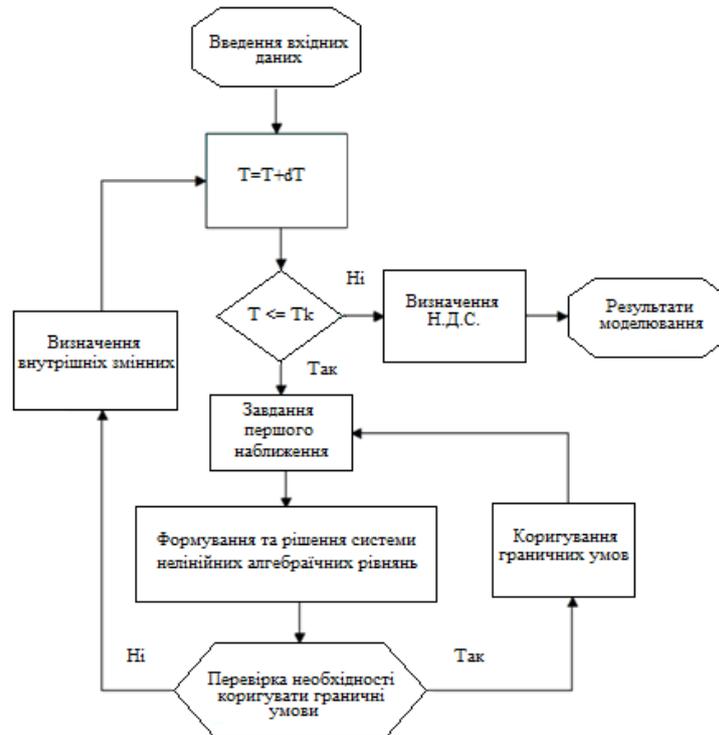


Рисунок 2 – Схема алгоритмічної моделі пластичного деформування

2. Визначення наближених значень прирощень напружень:

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

3. Визначення наближених напружень:

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

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

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

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

– коригуємо збільшення пружних деформацій:

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

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

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

– обчислюємо:

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

4. Цифрова модель

Алгоритмічні моделі були реалізовані у вигляді відповідних цифрових моделей. Схема цифрової моделі пластичного деформування наведена на рисунку 3.

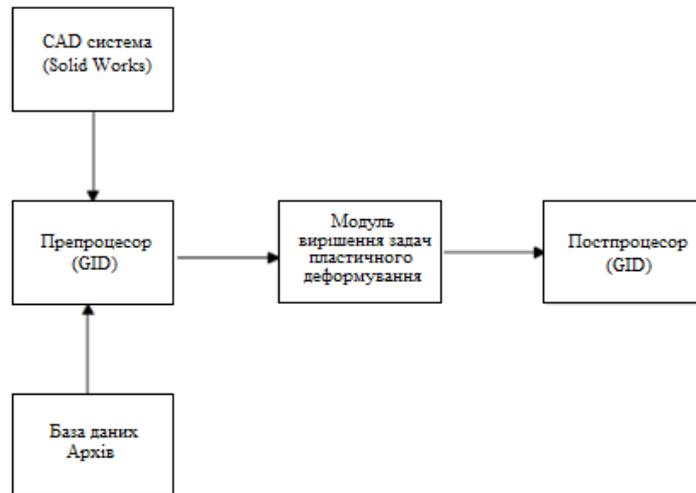


Рисунок 3 – Схема цифрової моделі пластичного деформування

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 [12].

Модуль вирішення задач пластичного деформування реалізований на алгоритмічній мові програмування С. При проведенні обчислювальних експериментів геометричну модель створювали в програмі SolidWorks [13].

Цифрова модель пружно-пластичного деформування була реалізована у вигляді підпрограм VUMAT і UMAT, які були імплементовані відповідно в програмні системи ABAQUS [14] та LS-DYNA [15].

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 рисунку 4.

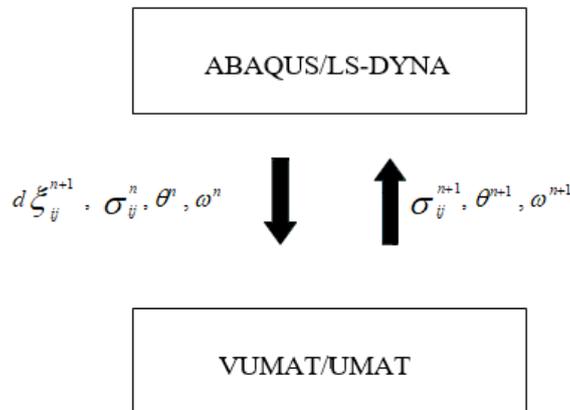


Рисунок 4 – Схема взаємодії між підпрограмами VUMAT і UMAT та програмними системами ABAQUS та LS-DYNA

5. Аналіз адекватності методики моделювання

Проведено перевірку адекватності запропонованої методики моделювання на основі порівняння отриманих результатів з експериментальними даними та результатами моделювання інших авторів.

В роботі [16] наведені експериментальні дані щодо розподілу щільності при пресуванні порошків нержавіючої сталі, проведено моделювання цих процесів методом скінчених елементів. Необхідні дані для обчислювального експерименту були взяті з цієї роботи.

Результати обчислень наведені на рисунку 5. 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. Доцільно відзначити, що при двосторонньому пресуванні величина пористості розподілена більш рівномірно, ніж за одностороннього пресування. Результати обчислювального експерименту відповідають даним, що отримані в роботі [16].

Також досліджували процес вільної осадки пористих циліндричних заготовок. Відношення початкової висоти заготовки до її діаметру

дорівнювало одиниці. Величина початкової пористості по всьому об'єму заготовки була однаковою і дорівнювала 0,2.

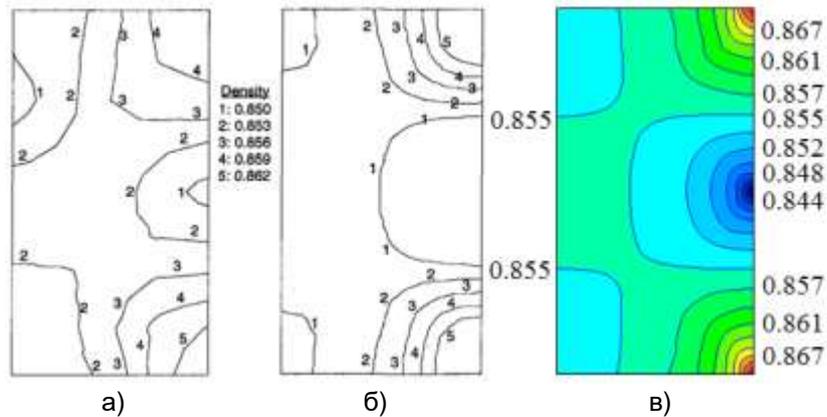


Рисунок 5 – Розподіл відносної щільності при двосторонньому пресуванні: експериментальні дані (а) і результати моделювання (б) [16] та результати обчислювального експерименту (в)

На рисунку 6, а 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 торців близько бічної поверхні. В області опуклості бічної поверхні пористість максимальна. У торців заготовки в безпосередній близькості від осі симетрії знаходиться зона утрудненої деформації. У цій зоні також пористість максимальна.

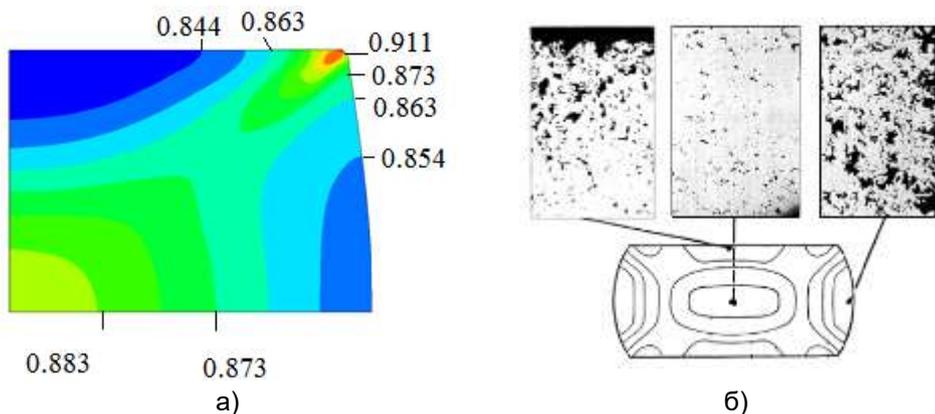


Рисунок 6 – Розподіл відносної щільності (а) та мікроструктура в перерізі заготовки [17] (б)

В роботі [17] були проведені металографічні дослідження поверхні осьових перерізів деформованих заготовок (рис.6, б). 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 результати моделювання відповідають наведеним експериментальним даним.

6. Закономірності деформування пористої заготовки при радіальному ущільненні

Досліджені закономірності деформування пористих заготовок при радіальному ущільненні [18]. Схема процесу наведена на рисунку 7. Ущільнення заготовки здійснюється за рахунок її обтиснення по внутрішній поверхні.

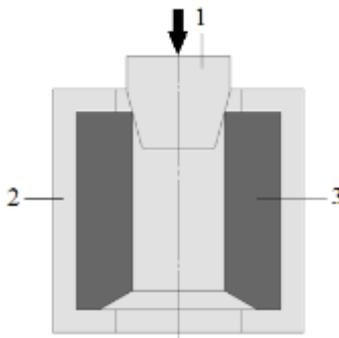


Рисунок 7 – Розрахункова схема радіального ущільнення
1 – пуансон; 2 – матриця; 3 – заготовка

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 рисунку 8 та 9 наведені результати моделювання.

Ущільнення матеріалу відбувається локально (рис. 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.

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.

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.

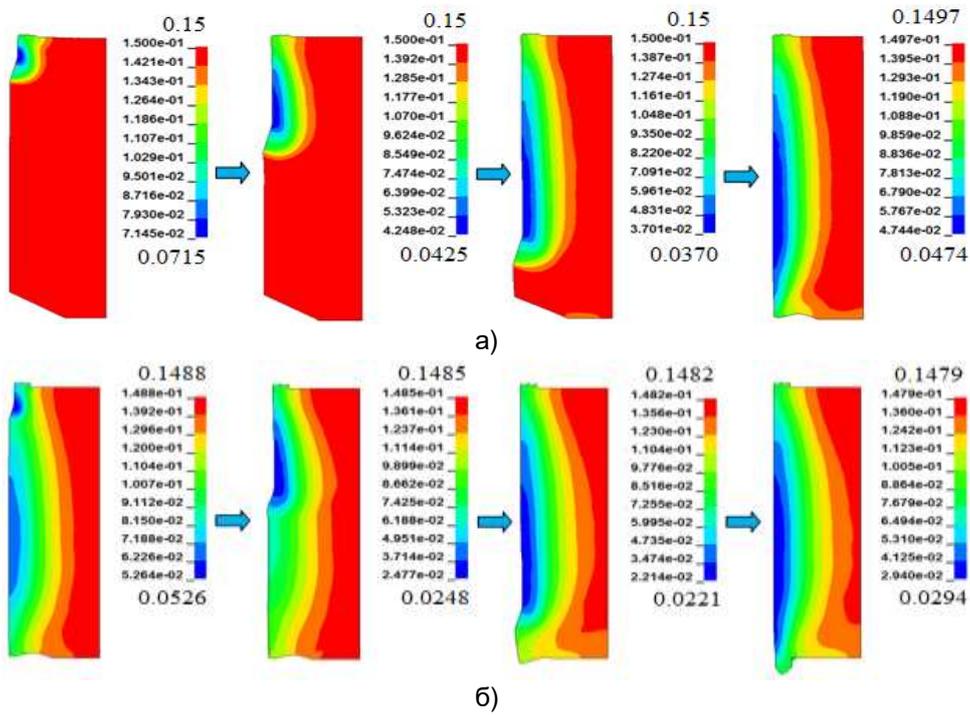


Рисунок 8 – Аналіз еволюції полів пористості при першому (а) і другому (б) проходах

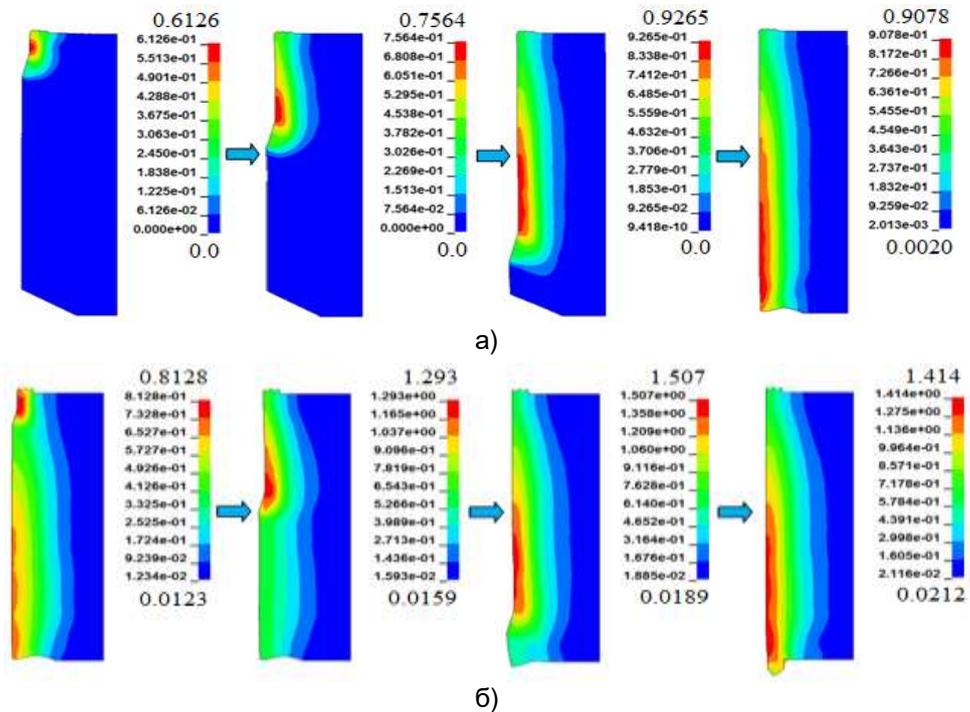


Рисунок 9 – Аналіз еволюції полів величини накопиченої пластичної деформації при першому (а) і другому (б) проходах

Еволюція величини накопиченої пластичної деформації аналогічна зміні величини відносної щільності (рис. 9). Максимальна накопичена деформація у внутрішній поверхні заготовки, а мінімальна величина у її зовнішній поверхні.

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель процесів деформування порошкових та пористих матеріалів, що включає як структурні складові аналітичну, алгоритмічну та цифрову моделі. Співвідношення теорії пластичності, що використовуються, дозволяють описувати деформування як порошкових, так і пористих заготовок. Розглянуто пластичну та пружно-пластичну поведінку матеріалу, що деформується. Результати обчислювального експерименту відповідають даним, які були отримані іншими авторами.

Досліджені закономірності деформування пористих заготовок при радіальному ущільненні по внутрішньому діаметру. Встановлено, що деформація матеріалу відбувається локально. Зі збільшенням радіуса величина пористості по перерізу виробу зростає. Збільшення кількості обтискань дозволяє зменшити нерівномірність розподілу залишкової пористості та її величину. Проте нерівномірність розподілу по радіусу залишається.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Феноменологические теории прессования порошков / М. Б. Штерн, Г. Г. Сердюк, Л. А. Максименко и др. Киев: Наукова думка, 1982. 140 с.
- [5] Roscoe K.H., Schofield A.N., Wroth C.P. On the yielding of soils. *Géotechnique.* 1958. Vol. 8, Issue 1. P. 22–53.
- [6] Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Q. Appl. Math.* 1952. Vol. 10. P. 157–165.
- [7] DiMaggio F.L., Sandler I.S. Material model for granular soils. *J. Eng. Mech. Div., ASCE,* 1971. Vol. 97, Issue 3. P. 935–950.
- [8] Грин Р. Дж. Теория пластичности пористых тел. *Механика,* 1973. № 4. С. 109 - 120.
- [9] Мартынова И. Ф., Штерн М. Б. Уравнение пластичности пористых тел, учитывающие истинные деформации металла основы. *Порошковая металлургия.* 1978. № 1. С. 23-29.
- [10] Shima S., Oyane M. Plasticity theory for porous metals. *Jut. Y. Mech. Sciences.* 1976. V. 18. Vol. 6. P. 285-291.
- [11] М. В. Штерн, О. В. Михайлов, А. О. Михайлов, Theory and technology of forming process generalized continuum model of plasticity of powder and

- porous materials, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 60, Nos. 1-2, May, 2021 (Russian Original Vol. 60, Nos. 1-2, Jan.-Feb., 2021. – pp. 27-44). - pp.20-36 DOI: 10.1007/s11106-021-00211-7
- [12] GID. The personal pre and post processor developed by the International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE, Barcelona, Spain). URL: <https://www.gidsimulation.com/> (дата звернення 01.07.2024).
- [13] SolidWorks. (Dassault Systèmes, France). URL: <https://www.3ds.com/products-services/solidworks/> (дата звернення 01.07.2024).
- [14] Abaqus. Unified FEA. (Dassault Systèmes, France). URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/> (дата звернення 01.07.2024).
- [15] LS-DYNA. (LST, USA). URL: <https://www.lstc.com/> (дата звернення 28.06.2024).
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Михайлов А.О., Штефан Є.В., Михайлов О.В. Моделювання процесів виготовлення тонкостінних втулок з поруватих заготовок з використанням прямого видавлювання та радіального ущільнення. Успіхи матеріалознавства. Київ: ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2023. № 7. С.19 - 26. DOI: 10.15407/materials2023.07.002

SIMULATION OF PRODUCT MOLDING PROCESSES FROM POWDER AND POROUS MATERIALS

¹*Mikhailov, A. PhD, Junior Researcher.*

²*Shtefan, Ye. DThSc., Full Prof.*

¹*Mikhailov, O. DThSc., Leading Researcher.*

^{1,2}*Shtern, M. DThSc., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine*

¹*Institut for Problems of Material Sciences National Academy of Sciences of Ukraine / Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" / Ukraine*

Abstract. A mathematical model of the formation processes of structurally inhomogeneous porous materials has been developed. The model includes analytical, algorithmic and digital models. The relations of the theory of plasticity of a porous body are used. The theory of plasticity equations are allow to describe the deformation of both powder and porous blanks. Modeling was performed using the finite element method. Two cases of behaviour were considered: the plastic and

elasto-plastic ones. Deformation problems were solved step by step, using the sequential loading method. At each of the stages, the necessary parameters of the model were determined as a result of the iterative procedures. Algorithmic models were implemented in the form of corresponding digital models. In turn The digital model of plastic deformation has the following main blocks: a preprocessor, simulation module, and postprocessor. It is possible to use existing geometric modeling programs, as well as pre- and post-processing data processing programs. The digital model of elastic-plastic deformation was implemented in the form of subroutines, which were implemented in the finite element modeling software systems. To check the adequacy of the developed digital models, the obtained results were compared with experimental data and simulation results obtained by other authors. Double side pressing as well as the free uniaxial straining have been examined in our model to compare it with same pressing paths, obtained by another authors. The patterns of deformation of porous blanks during radial compaction along the inner diameter were studied. Deformation was carried out in two passes. It was established that the deformation of the material occurs locally. The influence of the number of passes on the evolution of the parameters that determine the properties of the products is shown.

Keywords: resource-saving technologies, powder metallurgy, dispersed systems, powder materials, porous blanks, plasticity, pressure treatment, modelling, finite element method.

Дата першого надходження
статті до видання
29.09.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування
14.10.2025 р.

Дата
оприлюднення
23.12.2025 р.