

УДК 539.3:620.22: 621.762

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.15

А.В. Кузьмов^{1,2}, М.Б. Штерн^{1,2}

1- Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

2- Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗНАХОДЖЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ МЕТОДАМИ МІКРОМЕХАНІКИ РІЗНООПРНОЇ РЕОЛОГІЇ СПІКАННЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЯКІ МІСТЯТЬ ПЛОЩИННІ ДЕФЕКТИ

Робота присвячена вдосконаленню реологічної теорії спікання порошкових матеріалів. Запропоновано теоретичну методику визначення в'язких властивостей пористих матеріалів порошкового походження з розподіленими мікродефектами. Нелінійно-в'язка різноопрна (різна жорсткість на розтяг та стиск) поведінка такого матеріалу знаходиться шляхом мікромеханічного осереднення на представницькому осередку. Модулі в'язкості є функціями пористості й пошкодженості. Відповідно була обрахована ціла низка значень кожного з модулів в'язкості для певного дискретного діапазону густини та пошкодженості. Виявлено що ступінь знеміцнення матеріалу внаслідок площинних дефектів суттєво залежить не лише від знаку навантаження, але і від схеми деформування.

Ключові слова: пошкоджені пористі матеріали, мікромеханіка, нелінійна реологія спікання, різноопрність розтягу та стиску.

А.В. Кузьмов, М.Б. Штерн

НАХОЖДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ МИКРОМЕХАНИКИ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОЙ РЕОЛОГИИ СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПЛОСКИЕ ДЕФЕКТЫ

Работа посвящена усовершенствованию реологической теории спекания порошковых материалов. Предложена теоретическая методика определения вязких свойств пористых материалов порошкового происхождения с распределенными микродефектами. Нелинейно-вязкое разносопротивляемое (разная жесткость на растяжение и сжатие) поведение такого материала находится путем микромеханического осреднения на представительной ячейке. Модули вязкости являются функции пористости и поврежденности. Соответственно, был рассчитан целый ряд значений каждого из модулей вязкости для определенного дискретного диапазона плотности и поврежденности. Установлено, что степень разупрочнения материала вследствие плоских дефектов существенно зависит не только от знака нагрузки, но и от схемы деформирования.

Ключевые слова: поврежденные пористые материалы, микромеханика, нелинейная реология спекания, разносопротивляемость растяжению и сжатию.

A. Kuzmov, M. Shtern

FINDING BY COMPUTATIONAL METHODS OF MICROMECHANICS OF MULTI-RESPONSE RHEOLOGY OF SINTERING OF POWDER MATERIALS CONTAINING PLANAR DEFECTS

The work is devoted to the improvement of the rheological theory of sintering of powder materials. A theoretical method for determining the viscous properties of porous materials of powder origin with distributed microdefects is proposed. The nonlinear-viscous multi-response (different tensile and compressive stiffness) behavior of such material is found by micromechanical averaging on the unit cell. According to the mechanics of composites, the geometry of the cell represents the structure of a heterogeneous material and the boundary conditions on a unit cell make it possible to relate the stress-strain state at the macro- and meso-level. The averaging was carried out by computer simulation using the finite element method with an adaptive mesh, which was automatically condensed in places of a large gradient of the stress-strain state. The structure of the unit cell corresponds to the powder material with planar defects that significantly exceed the particle size of the powder. In the proposed model the rheological response of a porous damaged material is specified by three moduli, and the structure of such a material is described by two internal state parameters: porosity and defect concentration. That is, the rheological moduli are functions of porosity and damage. Accordingly, a number of values of each of the moduli were calculated for a certain discrete range of density and damage. It was found that the degree of the material softening due to planar defects significantly depends not only on the sign of the load, but also on the deformation scheme.

Keywords: powder damaged materials, micromechanics, nonlinear sintering rheology, multi-response rheology.

Вступ. Проблема, яка розглядається у представленій роботі полягає у вивченні впливу щілиноподібних дефектів, які виникають при отриманні порошкових матеріалів, а також їх вмісту на процеси, що супроводжують спікання пористих заготовок. Вивчення площинних дефектів притаманно усім розділам матеріалознавства, пов'язаним із виготовленням матеріалів на основі переробки дисперсних складових. Саме вони розглядаються як один з найбільш характерних

атрибутів порошкових матеріалів, що пов'язані як із технологіями їх отримання так і умовами експлуатації [1-6].

Причинами появи таких щілин в структурі матеріалу є зокрема фактори, що сприяють не тільки ущільненню і формуванню внутрішніх границь, але також і локальному розпущенню. Серед причин їх утворення можуть бути макроскопічні чинники, наприклад надмірне схоплювання зразка зі стінками печі або виникнення неузгодженості осаджування різних ділянок зразків, що значною мірою притаманне спіканню шаруватих матеріалів та виробів, обмежених зовнішнім шаром іншої природи. Також причини можуть полягати в мікро- та мезоскопічних чинниках, як наприклад нерівномірним розподілом пор за розміром, що може призводити до «зонального відособлення» при спіканні. Сюди ж слід віднести агломерацію дрібнодисперсних порошоків чи утворення в структурі матеріалу каркасу з частинок тугоплавкої фази. Також після пресування в структурі порошкових заготовок міжчастинкові контакти можуть бути розподілені нерівномірно і існують певні ділянки з відсутністю міжчастинкових контактів, що по суті є дефектами. Походження таких дефектів детально вивчалось М. Ю. Бальшиним [5] та його численими послідовниками. Саме у зв'язку із цим у порошковій металургії і було введено уявлення про роль ефективного контактного перерізу порошкових матеріалів, який, в першу чергу, є наслідком пресування, як першого етапу їх отримання. У багатьох випадках подальше спікання зменшує їх кількість, але певна частини щілиноподібних дефектів залишається і помітно впливає на механічні характеристики виробу. Зокрема, про це свідчать дані *рис. 1*, опубліковані у роботі [6]

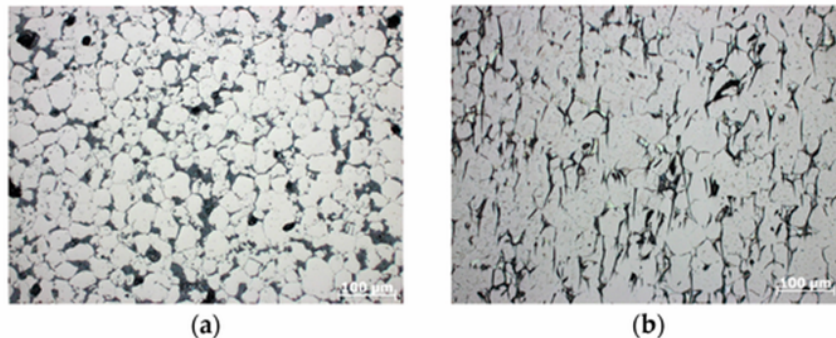


Рис. 1. Мікроструктура спеченого карбіду титану (TiC-50%), отриманого за температур спікання 1300 С (а) та 1350 С (б) [6].

Тож, не зважаючи на наявність спікання, у спеченому матеріалі може існувати залишкова пористість як у вигляді квазісферичних пор, так і у вигляді щілиноподібних дефектів. До цього варто додати, що сучасні процеси спікання супроводжуються наявністю зовнішнього навантаження, за наявності якого певні частини виробу можуть перебувати у стані розтягування.

Тому для забезпечення бажаних властивостей в порошкових матеріалах важливо розуміти вплив наведеного типу дефектів на консолідацію формовок в процесі спікання. Одним з найефективніших методів теоретичного опису процесу спікання порошкових заготовок є реологічна теорія спікання. Виходячи з цього вбачається доцільним врахувати в реологічній теорії спікання наявність площинних дефектів, а також описати осереднену міру дефектності структури матеріалу певним інтегральним параметром.

Треба зазначити що раніше одним з авторів була запропонована оцінка впливу дефектів на коефіцієнти об'ємної та зсувної в'язкості пористого матеріалу при розтягуючих середніх напруженнях на основі аналітичної поправки шляхом утримання першого члена розкладу в ряд по концентрації дефектів. За наявності ж стискаючих середніх напружень припускалося, що коефіцієнти в'язкості не залежать від дефектності. Проте якщо розглядати чотири різні модулі в'язкості, то питома дисипація для такого матеріалу буде розривною функцією швидкостей деформацій, що фізично не обґрунтовано. Тому в даній роботі здійснена спроба побудови на основі прямого комп'ютерного моделювання на представницькому осередку термодинамічно коректної моделі спікання пористих матеріалів з розподіленими дефектами. Крім того обчислювальне моделювання методом скінчених елементів дає змогу враховувати великі концентрації дефектів аж до граничних коли матеріал втрачає суцільність. Розглядається ситуація, коли розміри пор набагато менше розмірів тріщин, які, в свою чергу, істотно менше, за зразок в цілому. Припускається, що орієнтація тріщин має хаотичний характер і в ході деформування

матеріал не набуває анізотропію. Виходячи з цього двовимірні дефекти можна розглядати як деякі плоскі розрізи в пористому ізотропному континуумі. Припускалося, що поведінка цього континууму що оточує плоский дефект описується реологічною теорією спікання В. В. Скорохода [1].

Структура модельного матеріалу та представницький осередок. Моделювали матеріал, що містить періодично розташовані в пористій матриці хрестоподібно сполучені дефекти, які можна зокрема розглядати як відшарування в періодично розташованих прямокутних агломерованих гіперчастинках. Товщина відшарувань бралась дуже малою і тому їх наявність не впливає на густину матеріалу, яка обумовлюється лише густиною пористої матриці. Ефективні властивості вважали залежними від двох параметрів стану, що описують негомогенність матеріалу, а саме пористості матриці і міри площинних дефектів $0 \leq k < 1$, що задавалась як відношення сумарної довжини несущальності вздовж умовної пористої гіперчастинки до загальної її довжини $k = \frac{l}{L}$ (Рис.2). Таким чином методом скінчених елементів розв'язувалась низка задач по мікромеханічному усередненню властивостей відповідно до різних значень з двопараметричного діапазону (θ, k) .

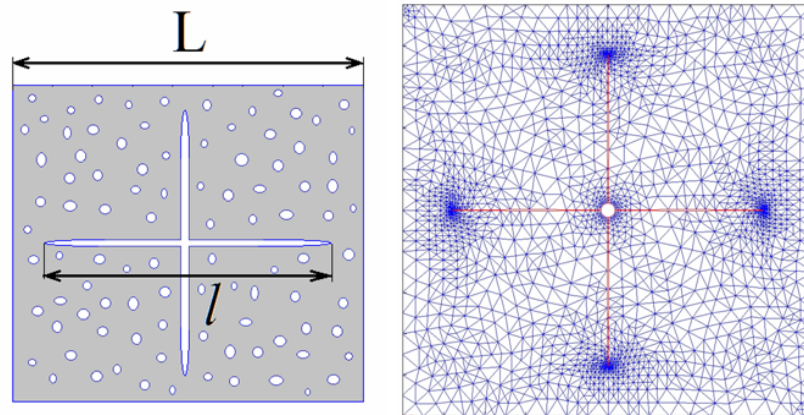


Рис. 2. Представницький осередок і сітка скінчених елементів

Вважали, що досліджувані матеріали задовольняють принципу еквівалентної гомогенності [7], згідно з яким якщо масштаб довжини усереднення є більшим за масштаб неоднорідності (агломерованої гіперчастинки), але малим у порівнянні з характерним розміром тіла, то задача про деформування може бути розв'язана з використанням усереднених властивостей. Для відшукання ефективних модулів в'язкості порошкового матеріалу, розглядали плоску задачу лінійної теорії в'язкості, вважаючи матеріал матриці лінійно в'язким та ізотропним відповідно до реологічної теорії спікання В. В. Скорохода. Відповідно течія матеріалу матриці описується визначальними співвідношеннями

$$\sigma_{ij} = 2\eta(\theta)(e_{ij} - \frac{1}{3}e\delta_{ij}) + \zeta(\theta)e\delta_{ij} + P_L(\theta)\delta_{ij} \quad (1)$$

$$\zeta(\theta) = \frac{4(1-\theta)^3}{3\theta}\eta_0; \quad \eta(\theta) = (1-\theta)^2\eta_0; \quad P_L(\theta) = \frac{3\sigma}{R}(1-\theta)^2;$$

де ζ і η - коефіцієнти об'ємної та зсувної в'язкості пористої матриці, η_0 - коефіцієнт зсувної в'язкості твердої фази, P_L - потенціал спікання або, що те ж саме, «макроскопічний Лапласівський тиск», σ - коефіцієнт поверхневого натягу на поверхні пор, R - розмір частинок порошку, δ_{ij} - символ Кронекера.

Вважали, що в процесі будь-якого однопроменевого (віднульового) навантаження конфігурація дефектів не змінюється і для кожного такого навантаження ефективні властивості можна обчислити усередненням лінійно-в'язких властивостей. При цьому для різних напружено-деформованих станів конфігурація відкритих та закритих тріщин є різною і це дає змогу врахувати різноспірність матеріалу. Зауважимо що за таких припущень, залежність між напруженнями та швидкостями деформацій для пористого дефектного матеріалу є однорідною

функцією першого порядку, хоча і нелінійною. Слід також зауважити, що оскільки розміри частинок та пор між ними набагато менше розмірів тріщин, то капілярні сили на поверхні дефектів не впливатимуть на реологію (проте можуть впливати на затягування дефектів) і ефективний потенціал спікання визначається співвідношенням

$$P_L^{eff}(\theta, k) = \frac{\zeta_{eff}^+(\theta, k)}{\zeta(\theta)} P_L(\theta) \quad (2)$$

де ζ_{eff}^+ – ефективний модуль об'ємної в'язкості дефектного пористого матеріалу з розімкненими дефектами. Зазначимо, що внаслідок однорідності залежності між напруженнями та швидкостями деформацій, та тим фактом, що всебічному деформуванню можуть відповідати тільки гідростатичні напруження можна говорити про такий модуль при всесторонньому розтягу.

Тому достатньо знайти лише ефективні в'язкі властивості пористого матеріалу з дефектами, а потенціал спікання визначиться за формулою (2). Тому подальший розгляд стосується лише ефективних властивостей в'язкості у випадку реології пористої матриці вигляду

$$\sigma_{ij} = 2\eta(\theta)(e_{ij} - \frac{1}{3}e\delta_{ij}) + \zeta(\theta)e\delta_{ij} \quad (3)$$

Граничні умови на представницькому осередку задавали в параметричному вигляді

$$\begin{aligned} V_x^{micro} &= e_{xx} \cdot x + e_{xy} \cdot y, \\ V_y^{micro} &= e_{xy} \cdot x + e_{yy} \cdot y, \end{aligned} \quad (4)$$

де V_x^{micro} , V_y^{micro} – компоненти швидкості на границі елементарного осередку; x , y – координати в масштабі осередку, e_{ij} – компоненти макроскопічного тензору швидкостей деформацій.

За таких граничних умов середні по осередку значення компонент тензору швидкостей деформацій становитимуть $\langle e_{ij}^{micro} \rangle = e_{ij}$. Відповідно до (1) поле швидкості в об'ємі осередку буде параметрично залежати від e_{ij} . Тому дисипативний потенціал ефективного мікронеоднорідного середовища $W = W(e_{ij})$ може бути обчислена шляхом усереднення за об'ємом осередку параметрично залежного від e_{ij} поля дисипативного потенціалу мікродеформацій.

Нелінійна різнопірна реологія матеріалів з площинними дефектами. Питому дисипацію вважали залежною лише від двох інваріантів: першого інваріанта тензору швидкостей деформацій (швидкості зміни об'єму) $\langle e_{ii} \rangle = e_0$ і другого інваріанта девіатора тензора швидкостей деформацій (інтенсивності зсувних деформацій) $\gamma_0 = \sqrt{\left(e_{ij} - \frac{1}{3}e\delta_{ij}\right) \cdot \left(e_{ij} - \frac{1}{3}e\delta_{ij}\right)}$, де δ_{ij} – символ Кронекера.

Для опису в'язкої поведінки порошкових матеріалів скористаємось кусково-лінійним наближенням різноопорної теорії в'язкості ізотропних матеріалів, аналогічним до такого в теорії пружності різнопірних матеріалів [8-10]. Подамо дисипативний потенціал у вигляді несиметричного еліпсоїда в координатах (e, γ)

$$W = \begin{cases} \frac{\zeta_{eff}^+}{2} \cdot e^2 + \eta_{eff} \gamma^2; & e > 0 \\ \frac{\zeta_{eff}^-}{2} \cdot e^2 + \eta_{eff} \gamma^2; & e < 0 \end{cases}, \quad (5)$$

вважаючи, що в кожній з півплощин $e > 0$ і $e < 0$ поведінка матеріалу описується класичною лінійною теорією в'язкості, але модулі об'ємної в'язкості ζ_{eff}^+ та ζ_{eff}^- є різними, при тому, що модуль зсувної в'язкості η_{eff} , внаслідок неперервності двох зімкнених поверхонь, є однаковим (рис.3).

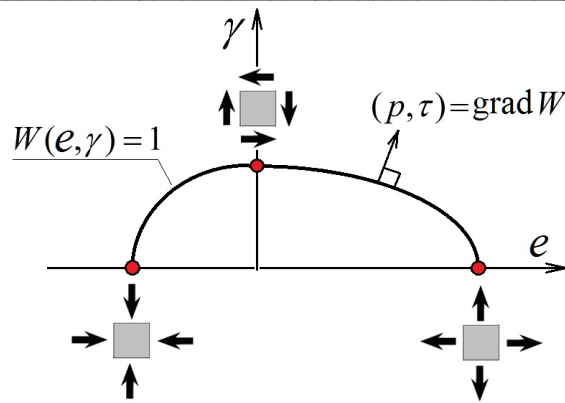


Рис.3. Контур рівних значень макроскопічного дисипативного потенціалу та промені напружено-деформованих станів, за якими здійснюється усереднення

За таких припущень визначальні співвідношення різноопірної в'язкої поведінки є трипараметричними: як випливає з (5) для знаходження дисипативного потенціалу достатньо взяти три різні макроскопічні однопроменеві деформації. В якості такого набору деформацій брались: чистий зсув, всебічний розтяг та всебічний стиск; (Рис.3). Конфігурація дефектів типу щілин за різних умов деформування та відповідні граничні умови показані на Рис.4. Вважали, що під дією деформації всебічного розтягу та чистого зсуву дефекти були розімкненими, а за всебічного стиску були повністю зімкненими тобто на модельній коміріці вони були відсутніми.

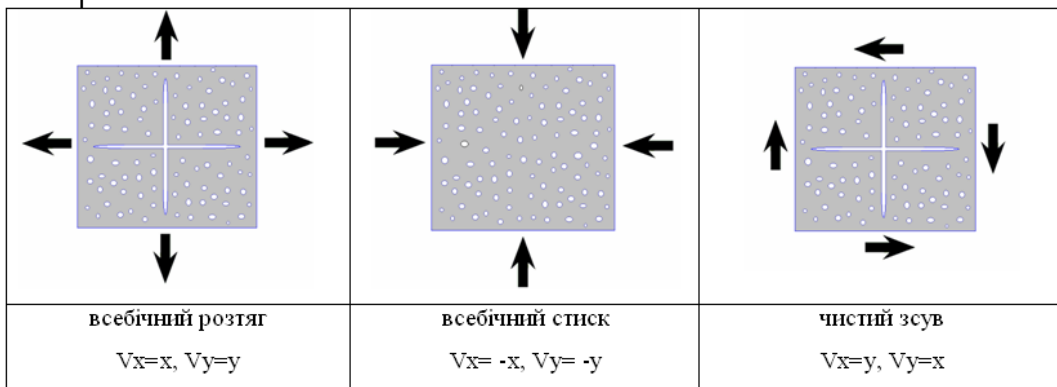


Рис. 4. Конфігурація дефектів типу щілин відповідно до різних схем деформування.

За таких припущень реакція матеріалу з дефектами на всебічний стиск не відрізнятиметься від реакції пористої матриці тобто $\zeta_{eff}^- = \zeta(\theta) = \frac{4(1-\theta)^3}{3\theta} \eta_0$. Таким чином запропоновану нелінійну різноопірну модель спікання можна виразити лише через два параметри $\zeta_{eff}^+(\theta, k)$ та $\eta_{eff}(\theta, k)$ залежні від вмісту дефектів k .

Результати обчислювального моделювання та висновки. При чисельному обчисленні методом скінчених елементів ζ_{eff}^+ та η_{eff} вміст дефектів k брався в діапазоні $[0, 0.95]$, тобто аж до величин дуже дефектного матеріалу близького до повного руйнування, а величина пористості θ до 0.5 тому що за більших значень реологічні співвідношення для пористої матриці стають менш коректними.

Як видно з Рис.5 наявність дефектів дуже суттєво, більш ніж на порядок, зменщує матеріал на всебічний розтяг. Причому спочатку при рості дефектності зменшення більш швидке, а при дефектності близькій до гранично допустимої суттєво сповільнюється.

Між тим, рис.6 показує, що зменшення внаслідок дефектів при чистому зсуві набагато менше ніж при всебічному розтягу. Крім того, на відміну від всебічного розтягу, матеріал практично рівномірно зменщується з ростом дефектів. При інших схемах розтягуючих

деформацій величина знеміцнення варіюватиметься в залежності від близькості типу деформування до чистого зсуву чи до всебічного стиску, тобто від відношення $\frac{e}{\gamma}$.

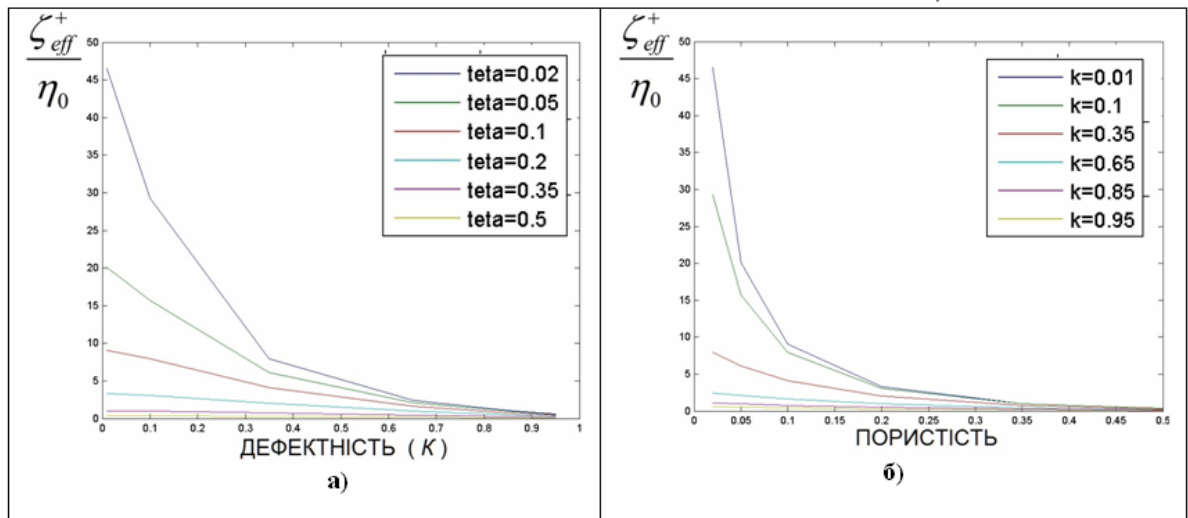


Рис. 5. Залежності для $\zeta_{eff}^+(\theta, k)$ нормовані зсувною в'язкістю твердої фази а) від дефектності для різних значень пористості. б) від пористості для різних значень дефектності

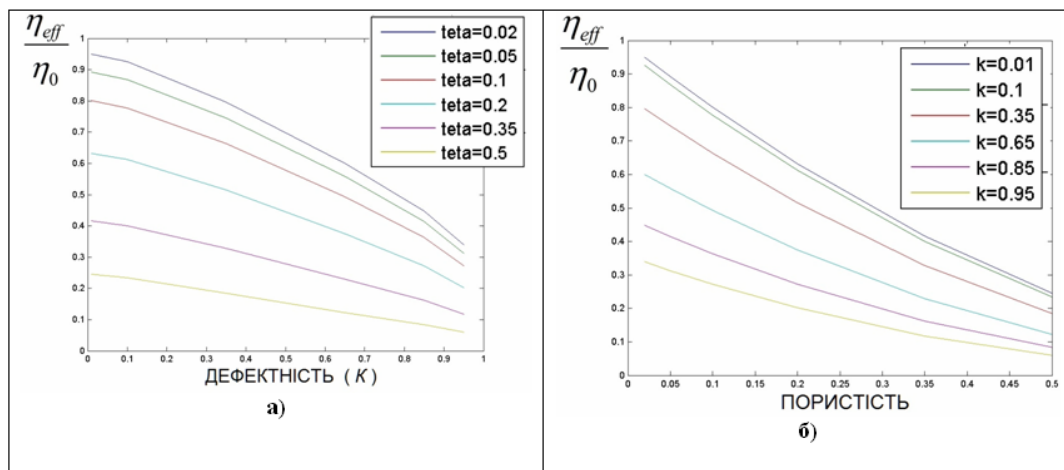


Рис.6. Залежності для $\eta_{eff}(\theta, k)$ нормовані зсувною в'язкістю твердої фази а) від дефектності для різних значень пористості. б) від пористості для різних значень дефектності

Між тим, Рис.6 показує, що знеміцнення внаслідок дефектів при чистому зсуві набагато менше ніж при всебічному розтягу. Крім того, на відміну від всебічного розтягу, матеріал практично рівномірно знеміцнюється з ростом дефектів. При інших схемах розтягуючих деформацій величина знеміцнення варіюватиметься в залежності від близькості типу деформування до чистого зсуву чи до всебічного стиску, тобто від відношення $\frac{e}{\gamma}$. При

стискаючих схемах деформування знеміцнення внаслідок дефектності теж залежатиме від $\frac{e}{\gamma}$, але завжди буде ще менш помітне ніж при чистому зсуві, аж до повної нечутливості до дефектів при всебічному стиску.

Таким чином вдалося за допомогою моделювання обчислювальними методами мікромеханіки розповсюдити реологічну модель спікання В.В.Скорохода на випадок пористих матеріалів з двовимірними дефектами. Хоча модель нелінійна та різноспірна до розтягу та стиску вона залежить лише від трьох модулів в'язкості, причому один береться з вихідної лінійної теорії і

лише два залежать як від пористості так і від дефектності. Потенціал спікання теж виражається через константи вихідної лінійної теорії спікання та один з двох вищезгаданих чисельно обрахованих модулів для нелінійної теорії.

Список використаних джерел.

1. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания, К., Наукова думка, 1972, -149с.
2. V.V. Skorokhod, M. V. Shtern, E.A. Olevsky, Continuum theory for sintering of porous bodies: model and application/ //Science of Sintering. – 1991. – 23, №2 – P. 79 – 91
3. Салганик Р.Л. Механика сред с большим числом трещин, *Механика твердого тела*, Известия АН СССР, 1974, №4
4. Скороход В.В. Реологические задачи в теории спекания металлических порошков // Сб. докладов IV Международной конференции по порошковой металлургии. – ЧССР, 1974,- Т.1- С.19 -30
5. Бальшин М. Ю., Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокон, М.: Изд-во «Металлургия», 1972. - 336 с.
6. E. Korosteleva, V. Korzhova, M. Krinitcyn, Sintering Behavior and Microstructure of TiC-Me Composite Powder Prepared by SHS, *Metals* 2017, 7(8), pp. 290 – 300
7. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М: Мир. – 1982. – 396 с.
8. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. – М.: Наука, 1982. - 320 с.
9. Kuzmov, A., Vdovychenko, O., Shtern, M. et al. Modeling of Multimodulus Elastic Behavior of Damaged Powder Materials Using Computational Micromechanics. *Powder Metall Met Ceram* 59, 491–498 (2021).
10. О.В. Вдовиченко, А.В. Кузьмов, О.Г. Кіркова, М.Б. Штерн Моделювання пружної поведінки пористих порошкових матеріалів за різних схем деформування // *Современные проблемы физического материаловедения* – Киев: ИПМ им. И.Н.Францевича НАН Украины. – 2017. – Вып. № 25. – С. 85-90.