

**КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ
СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ**

**COMPUTER ANALYSIS OF BEHAVIOR OF HETEROGENEOUS
MATERIALS**

**Тулашвілі Ю.Й., д.пед.н., професор, Кошелюк В.А., к.т.н.
(Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)**

**Tulashvili Y.Y., Doctor of Pedagogic, Professor, Koshelyuk V. A.,
Ph.D., (Lutsk National Technical University, Lutsk)**

У статті розглядаються особливості застосування методів комп'ютерної обробки експериментальних даних, використання методу моделювання поведінки структурно-неоднорідних матеріалів під дією навантаження та температурного впливу в межах задачі теплопровідності для ймовірнісної оцінки залишкового ресурсу при втомному руйнуванні конструкцій.

The article discusses the features of the application of methods of computer processing of experimental data, the use of a method for modeling the behavior of structurally inhomogeneous materials under the action of load and temperature exposure within the thermal conductivity problem for the probabilistic assessment of the residual life and fatigue failure of structures.

For solving the problems of thermoelasticity for structurally heterogeneous anisotropic elements modified quarter-point finite elements are developed on the basis of the variational relations of heat conductivity and thermoelasticity problems.

The main result of this work was the creation of a computer system for analyzing the behavior of structurally inhomogeneous materials, which is realized by processing experimental data on the mechanical properties of products made of powder materials. Based on mathematical modeling of their deformation processes in order to study the deformation and strength properties of structurally inhomogeneous materials, viscoelastic solids in the field of loads close to their operating conditions, based on mathematical modeling of deformation processes.

There are developed software for computer analysis and for finite-element analysis of the composite bodies with cracks, which allow producing fast and reliable analysis of strength of structural elements from composite materials, and allows development of mathematical models of real products, changing the design without experiments, perform simulation of investigated structural elements accounting for different physics processes and properties, their geometry, properties of materials, operational and other characteristics.

During the calculation are the major statistical indicators such as arithmetic mean, mean square, expectation, variance, relative measurement error and so on.

Ключові слова: комп'ютерний аналіз, розрахунок, деформації, напруження, структурно-неоднорідні матеріали.

Keywords: computer analysis, calculation, deformations, tension, heterogeneous materials.

Удосконалення методів розрахункового прогнозування напружено-деформованих станів структурно-неоднорідних матеріалів, що використовуються у різних галузях промисловості, розробка чисельних методів розрахунку деформаційних процесів і на їх основі створення комп'ютерних програм нерозривно пов'язано з вирішенням завдань із порівняльного аналізу властивостей матеріалів, дослідженнями взаємозв'язку властивостей зі структурою, прогнозуванням короткочасних і тривалих механічних навантажень.

Комп'ютерне моделювання невід'ємне при розробці ефективних підходів до математичного моделювання процесів, що виникають у структурно-неоднорідних матеріалах за умов випадкової структури. Як наслідок, побудова методів розв'язування відповідних контактнo-крайових задач теплопровідності для структурно-неоднорідних матеріалів та побудова алгоритмів для кількісного дослідження згаданих процесів є одним із актуальних питань математичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень

Математичне комп'ютерне моделювання стало головним засобом дослідження складних процесів і систем, на якому базуються сучасні підходи до проектування, оптимізації та управління в різних галузях науки і техніки [1].

У сучасних дослідженнях, присвячених особливостям застосування комп'ютерного моделювання при проектуванні конструкцій, машин і механізмів, наголошується на багатоступінчастості процесу математичного, чисельного і комп'ютерного моделювання у процесі створення прототипу, його комп'ютерного тестування щодо поведінки елементів конструкції в умовах експлуатації. Сучасне комп'ютерне моделювання дає змогу провести весь процес у віртуальному просторі без фізичної побудови відповідної механічної системи [2].

Метою роботи є побудова та реалізація структури програмного забезпечення для комп'ютерного аналізу поведінки структурно-неоднорідних матеріалів, що перебувають в умовах сумісної дії механічних та теплових навантажень.

Методика аналізу та розрахунків

Одним із напрямків оцінки впливу напружено-деформованого стану на поведінку структурно-неоднорідних матеріалів, якими є пористі порошкові матеріали, є застосування критерію пластичності, який запропонований рядом дослідників [3, 4] у вигляді еліпсоїду обертання.

Означені критерії у тій чи іншій формі визначають вплив на механічні характеристики першого I^I та другого I^{II} інваріантів тензора напружень. У загальному критерій пластичності має вигляд:

$$f = \sigma_i^2 + \alpha \sigma_0^2 - \beta \sigma_s = 0 \quad (1)$$

Аналогічно до теорії пружно-пластичних деформацій робиться припущення, що

$$\sigma_{екв} = f(\varepsilon_{екв}) \quad (2)$$

і не залежить від напруженого стану та пористості.

У технологічних процесах обробки тиском пористих матеріалів основними характеристиками є границя текучості σ_m , зміна пористості $\Delta\theta$ та максимальна відносна деформація матеріалу ε_p , яку за аналогією з компактними матеріалами можна визначити ресурсом пластичності ψ .

Важливою характеристикою є границя міцності структурно-неоднорідного матеріалу, тобто деформація руйнування ε_p .

Аналізуючи критерії (1-2), можна зауважити, що всі вони вміщують параметр, який визначає деформований стан металевої матриці пористого матеріалу у вигляді зміни еквівалентних деформацій.

Розрахунок еквівалентних деформацій пов'язаний із припущенням про єдину криву деформування і впливає з визначення зміцнення матеріалу основи за допомогою теорії пластичності, яка інтерпретує поверхню пластичності у вигляді еліпсоїду обертання.

Так, О. М. Лаптевим запропоновано розраховувати еквівалентні напруження і еквівалентні деформації в такий спосіб [4]:

$$\sigma_{екв} = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} + \alpha(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{екв} = \frac{1}{\sqrt{\beta} \cdot \rho} \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} + \frac{1}{9\alpha} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)^2 \quad (4)$$

Проведені дослідження полягали в експериментальному визначенні впливу статично прикладеного навантаження на деформаційні характеристики руйнування пористого порошкового матеріалу.

Внаслідок того, що модель еліпсоїду не достатньо точно описує процес зміцнення пористого матеріалу в умовах розвиненої пластичної деформації, можна зробити висновок, що критерій руйнування пористого матеріалу повинен враховувати не лише зміцнення металевої матриці значенням еквівалентних напружень та деформацій, а ще враховувати деформаційну характеристику, яка могла б оцінити накопичення внутрішніх пошкоджень у матеріалі-основі при різних умовах деформування.

Для цього пропонується застосувати принцип суперпозиції при врахуванні деформованого стану матеріалу. Ресурс пластичності

пористого матеріалу при холодному деформуванні з більшою точністю можна оцінити залежністю:

$$\psi = \int_0^{\varepsilon_{\text{оп}}} \int_0^{\varepsilon_v} \frac{d\varepsilon_{\text{екв}}}{\varepsilon_{\text{екв}}^p(\eta_0, \rho_0)} \frac{d\varepsilon_v}{\varepsilon_v^p(\eta_0, \rho_0)} \leq 1 \quad (5)$$

Критерій (5) першою складовою враховує вплив накопичення пошкоджень у металевій матриці, другою вплив зміни пористої структури на ресурс пластичності.

Для оцінки поведінки структурно-неоднорідних матеріалів під час експлуатації в елементах конструкцій застосовуються загальні числові підходи розв'язування задач теплопровідності й термопружності для пористих структурно-неоднорідних матеріалів, що мають дефекти у формі тріщини, з урахуванням співвідношень теплопровідності й термопружності, що дає можливість розрахунку основних параметрів механіки руйнування у представленнях варіаційних співвідношень скінчено-елементного аналізу [5].

Для визначення напружено-деформованого стану в околі вершини тріщини та розрахунку параметрів тріщиностійкості конструкційних структурно-неоднорідних матеріалів застосовується розрахунок сингулярних полів напружень. При побудові розв'язків задач механіки руйнування використано існуючі методи та моделі, серед яких особливу увагу було приділено моделі Грифітса, концепції Ірвіна – Орована, моделі Леонова – Панасюка – Дагдейла.

Для класу задач розрахунку моделі круглої пластинки зі структурно-неоднорідного матеріалу, де параметр структурної неоднорідності є змінним по товщині h , застосовуємо розрахунок коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН) із використанням J – інтегралу. Для точного розрахунку J – інтегралу використовуємо віддалені контури. Типова оцінка контурних інтегралів у розрахунках є достатньо громіздкою. Тому вибір контуру здійснюємо крізь точки Гауса, де очікувані напруження будуть найбільш точними. Для усунення цього недоліку скористаємося представленням лінійно – інтегральної форми J – інтегралу у вигляді інтегралу по області. Гладка скалярна функція q в обмеженій області $S_c = S_0 + S_+ + S_- - S$ належить до контуру S та перетворюється на нуль при S_0 . Тоді залежність для розрахунку J – інтегралу набуває вигляду:

$$J = \int_A \left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - W \delta_{ii} \right) \frac{\partial q}{\partial x_i} dA - \int_{S_+ + S_-} \sigma_{2j} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} m_2 q dS, \quad (6)$$

При виготовленні елементів конструкцій зі структурно-неоднорідних матеріалів важливим моментом є аналіз параметрів, які впливають на їх тріщиностійкість. Чисельний розрахунок параметрів виробів із пористих порошкових матеріалів при різних значеннях величини поширення тріщини дозволяє виявити значення максимально доступних КІН.

Залежність (6) застосовується для розрахунку КІН крайової тріщини структурно-неоднорідної ізолюючої втулки для установки системи вентиляції тягового двигуна електромеханічного обладнання тролейбусів при ймовірнісній оцінці його залишкового ресурсу при втомному руйнуванні.

Реалізація комп'ютерної системи

Програмну реалізацію комп'ютерної системи аналізу поведінки структурно-неоднорідних матеріалів побудовано за модульним принципом (рис.1).

Процес обрахунку статистичних характеристик уведених експериментальних даних для обрахунку здійснюється в модулі «Статистичної обробки даних». У процесі обрахунку знаходяться основні статистичні показники такі, як: середнє арифметичне, середнє квадратичне, математичне очікування, дисперсія, середньоарифметичне значення середньоквадратичного відхилення, відносна похибка вимірювань тощо (рис. 2). На цьому етапі також здійснюється перевірка за критерієм грубих помилок, якщо при цьому знаходяться значення, які виходять за розрахункові межі, то користувачеві видається повідомлення про це і пропонується видалити цей запис або продовжувати розрахунок далі.



Рис. 1. Структура комп'ютерної системи аналізу поведінки структурно-неоднорідних матеріалів

Розрахунок критерію напружено-деформованого стану структурно-неоднорідного матеріалу здійснюється за три кроки (рис. 3):

Крок 1: Розраховуються приріст радіальної і осьової пластичної деформації $\varepsilon_r, \varepsilon_z$; напруження матеріалу зразка σ_z ; залежно від напрямку деформування розраховуються осеві напруження та деформації $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$; об'ємна деформація матеріалу ε_v ; нормальна та дотична складова напружень σ_0, τ .

Крок 2: Проводимо екстраполяцію значень напруження матеріалу зразка, в результаті чого знаходимо значення зміцнення матеріалу з пористістю $\theta = 0$, визначаємо значення функцій α та β .

Крок 3: Маючи значення функцій α та β , розраховуємо еквівалентні напруження та еквівалентні деформації.

Крім того, в процесі розрахунків будуємо графічні залежності, видимістю яких ми можемо маніпулювати натисканням на відповідні кнопки.

Сторінка "Результати розрахунків". На цій сторінці розташована таблиця, до якої заносяться дані, що розраховувались у системі (рис.4).

Модуль "Розподіл нормальних напружень" реалізує розрахунок КІН крайової тріщини ізольуючої втулки для установки системи вентиляції тягового двигуна електромеханічного обладнання тролейбусів при ймовірнісній оцінці його залишкового ресурсу при втомному руйнуванні.

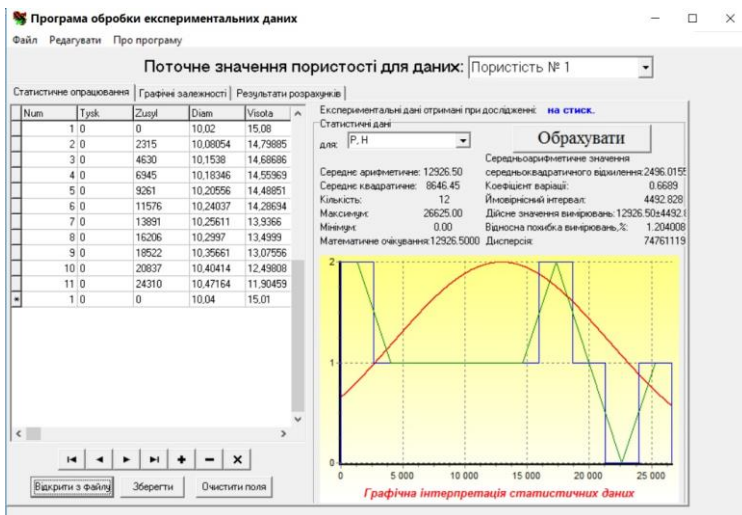


Рис. 2. Сторінка модуля статистичної обробки вхідних даних

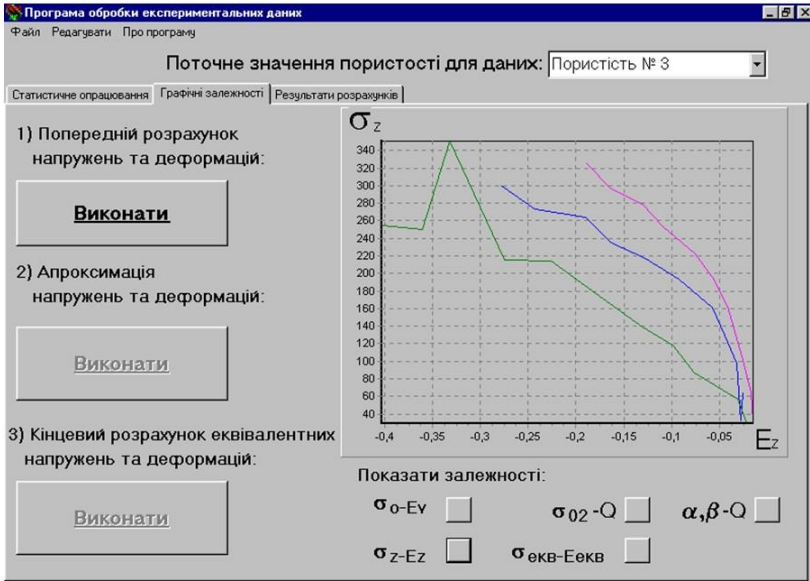


Рис. 3. Сторінка модуля обчислення за критерієм напружено-деформованого стану

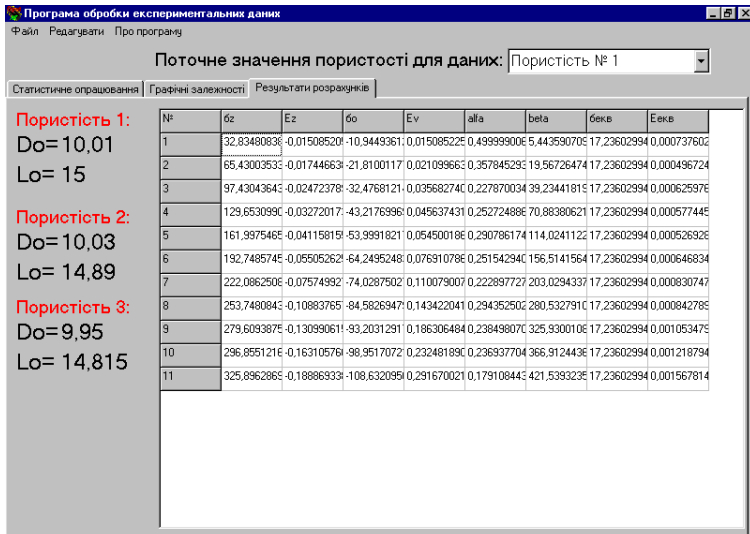


Рис. 4. Сторінка "Результати розрахунків"

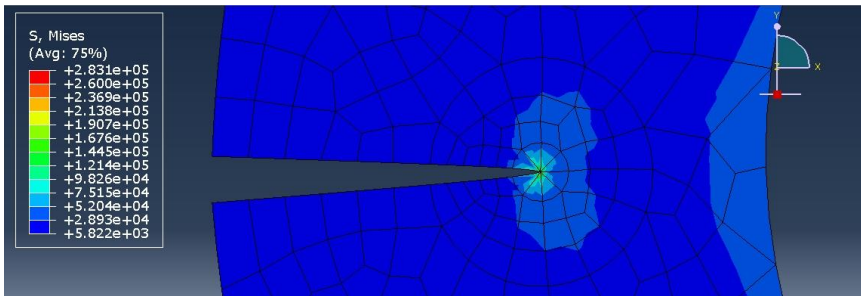


Рис 5. Результат розрахунку розподілу нормальних напружень ізолюючої втулки в умовах змішаного навантаження

Висновки

Головним результатом проведеної роботи було створення комп'ютерної системи аналізу поведінки структурно-неоднорідних матеріалів, що реалізується шляхом обробки дослідних даних механічних властивостей виробів із пористих порошкових матеріалів. На основі математичного моделювання їх деформаційних процесів з метою вивчення деформаційних та міцнісних властивостей структурно-неоднорідних матеріалів, в'язкопружних твердих тіл в області дії навантажень, близьких до умов їх експлуатації, на основі математичного моделювання процесів деформації.

Для створення комп'ютерної системи аналізу поведінки структурно-неоднорідних матеріалів було запропоновано методика числового вивчення термонапруженого стану структурно-неоднорідних тіл на основі побудованих нових схем скінченно-елементного аналізу термомеханічних полів; розроблено алгоритм розв'язування задач термопружності композитних пластин та циліндрів на основі варіаційних принципів та модифікованих скінченних елементів; розроблено модифіковані спеціальні скінченні елементи для високоточного обчислення параметрів руйнування структурно-неоднорідних матеріалів із тріщинами.

Проведено комп'ютерне моделювання та прогнозування поведінки матеріалів на програмному забезпеченні.

References

1. Kvietnyi R. N., Bohach I. V., Boiko O. R. ta in. Kompiuterne modeliuвання system ta protsesiv. Metody obchyslen. Chastyna 1: navchalnyi posibnyk / za zah. red. R.N. Kvietnoho. Vynnytsia: VNTU, 2012. 193 s.
2. Drobenco B., Kushnir R. Mekhanichna povedinka til skladnoi formy za umov termosyloвого navantazhennia. Teoriia ta praktyka ratsionalnoho proektuvannia, vyhotovlennia i ekspluatatsii mashynobudivnykh konstruksii: Materialy 6-yi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. Lviv: KINPATRI LTD. 2018. S. 13-15.
3. Hryhorev A.K., Rudskoi A.Y., Kolesnykov A.V. Varyant vzaymosviazy kharakterystyk napriazhenno-deformirovannoho sostoiannia porystoho materyala y eho osnovy. Poroshkovaia metallurhiya, # 8. 1992. S. 49-53.
4. Laptev A.M. K metodyke yssledovannia predelnogo sostoiannia porystykh materyalov. Zavodskaiia laboratoriya, # 10. 1991. S. 40-42.
5. Tulashvili Y.Y., Koshelyuk V.A. Usage of special finite elements for solution of fracture mechanics problems. Вісник ТНТУ. Т.: ТНТУ, 2016. Том 82. № 2. С. 23-31.

Список використаних джерел

1. Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р. та ін. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1: навчальний посібник / за заг. ред. Р.Н. Кветного. Вінниця: ВНТУ, 2012. 193 с.
2. Дробенко Б., Кушнір Р. Механічна поведінка тіл складної форми за умов термосилового навантаження. Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції. Львів: КІНПАТРІ ЛТД. 2018. С. 13-15.
3. Григорьев А.К., Рудской А.И., Колесников А.В. Вариант взаимосвязи характеристик напряжённо-деформированного состояния пористого материала и его основы. Порошковая металлургия, № 8. 1992. С. 49-53.
4. Лаптев А.М. К методике исследования предельного состояния пористых материалов. Заводская лаборатория, № 10. 1991. С. 40-42.
5. Tulashvili Y.Y., Koshelyuk V.A. Usage of special finite elements for solution of fracture mechanics problems. Вісник ТНТУ. Т.: ТНТУ, 2016. Том 82. № 2. С. 23-31.