

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Коробка Павла Олександровича
«Вплив особливостей мезоструктури на ефективні властивості метаматеріалів
типу інверсного опалу та інверсного бджолиного стільника»,
представленої на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 13 – Механічна інженерія
за спеціальністю 132 Матеріалознавство

Актуальність обраної теми дисертації

Автор дисертації Коробко Павло Олександрович обрав тему дослідження, пов'язану із новою проблематикою сучасного матеріалознавства, а саме з метаматеріалами, під якими розуміють структурно-неоднорідні матеріали з певною впорядкованістю і симетрією мікроструктури. Стрімкий розвиток так званих "адитивних" технологій відкрив можливість створення матеріалів з контрольованою внутрішньою будовою і, як наслідок, з вельми незвичайними властивостями. Численні приклади успішного використання метаматеріалів різного функціонального призначення пов'язані із аерокосмічною промисловістю, виробництвом паливних комірок, фільтрів для очищення та створення легких захисних протиударних панелей. Для ефективного застосування метаматеріалів в реальних умовах експлуатації також важливими є їхні механічні властивості, а саме пружність, пластичність та міцність за різних умов деформування та навантаження.

З огляду на специфічну структуру метаматеріалів, застосовність до них традиційних методів мікромеханіки є вкрай обмеженою. Це обумовлює актуальність проблеми розвитку сучасних підходів до прогнозування фізико-механічних, функціональних та експлуатаційних властивостей метаматеріалів. Ймовірно, найбільш перспективним є метод обчислювальної мікромеханіки, який робить можливим вичерпне дослідження взаємозв'язку "структура-властивості" і вибір оптимальної мікроструктури під певне застосування. Саме до цього наукового напрямку належить дисертаційна робота Коробка Павла Олександровича «Вплив особливостей мезоструктури на ефективні властивості метаматеріалів типу інверсного опалу та інверсного бджолиного стільника». Автор приймав безпосередню участь у розробці питань, що знайшли відображення у його дисертації у межах наукових програм Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України: III-22-17(Ц) «Оптимізація процесів отримання мікронеоднорідних матеріалів з тривалим терміном експлуатації шляхом деформування та консолідації дисперсних систем із одночасним контролем зародження та еволюції дефектів із метою запобігання їх розвитку», замовник: Національна академія наук України; термін виконання: 01.2017 р. – 12.2021 р.; науковий керівник: д.т.н., чл.-кор. НАНУ

Штерн М. Б. та III-3-20 «Фундаментальні особливості поведінки гранульованих матеріалів в технологіях 3d прінтингу та консолідації високодисперсних порошків в умовах іскроплазмового спікання та традиційного ізотермічного спікання»; замовник: Національна академія наук України; термін виконання: 01.2020 р. – 12.2022 р.; науковий керівник: д.т.н., чл.-кор. НАНУ Штерн М. Б.

Наведене вище дає всі підстави стверджувати, що обрана тема дисертації є актуальною.

Загальна характеристика дисертації та огляд її змісту

Робота складається з 4 основних розділів і містить 165 сторінок тексту, 42 ілюстрації, 19 таблиць та 112 посилань на літературні джерела. Перший розділ присвячено аналізу та інтерпретації загальноновживаних у матеріалознавстві понять, уявлень і термінів стосовно метаматеріалів. Обґрунтуванню та формулюванню обчислювальних схем, які використовуються для оцінки напруженого стану і їх ефективної реакції метаматеріалів присвячено другий розділ. В розділі 3 проведено аналіз результатів комп'ютерного моделювання поведінки матеріалу зі структурою інверсного опалу. В присвяченому ауксетикам розділі 4 досліджено еволюцію геометричних параметрів інверсного бджолиного стільника просторового типу в процесі навантаження та визначено інтервали його ауксетичності.

У **Вступі** автором проведено аналіз наявних літературних джерел і класифікацію метаматеріалів розглянутого типу. На підставі ретельного аналізу сучасних уявлень про особливості поведінки метаматеріалів на різних структурних рівнях сформульовано мету, об'єкт, предмет і метод дослідження та визначає новизну роботи.

Перший розділ містить основні положення континуальних методів опису поведінки метаматеріалів. При цьому автор акцентує увагу на узгодженні специфічних властивостей цих матеріалів з основними принципами фізики, зокрема, термодинаміки і механіки. Для ілюстрації узгодження використано узагальнений закон Гука. Особливу увагу приділено питанням, пов'язаним із незворотною деформацією метаматеріалів, зокрема визначальним співвідношенням та узгодженням із ними граничним характеристикам. З цією метою П. О. Коробко підкреслює існування зв'язку між виглядом поверхні навантаження на макроскопічному рівні і особливостями макроскопічної поведінки. Подальший аналіз автор проводить, спираючись на припущення про справедливості асоційованого закону пластичної течії.

Другий розділ присвячено формулюванням процедур переходу від поведінки окремих складових мікроструктури до опису поведінки матеріалу у цілому. Суттєву увагу приділено визначенню елементарної комірки, її

конфігурації та розмірів, сформульовано умови взаємного розташування та взаємодії комірок. Основні викладки представлені у векторно-матричному вигляді, узгодженому із загальноприйнятою формою у методі скінчених елементів. Автором встановлено можливість визначення ефективних властивостей мікронеоднорідного матеріалу з періодичною мезоструктурою шляхом осереднення фізичних полів в масштабі неоднорідності. В реалізації процедур осереднення суттєво використано лему Р. Хілла, що дало можливість знаходити ефективні пружні і пластичні характеристики у більш зручній формі.

У **третьому розділі** автор застосовує розвинуті ним обчислювальні схеми для оцінки пружно-пластичної поведінки і ефективних властивостей інверсного опалу. При цьому до розгляду залучено технологічні аспекти отримання цього матеріалу, зокрема наявність нанесеного шару проміжної фази у вигляді нікелевої плівки. Виходячи із прийнятої гіпотези про макроізотропність розглянутого метаматеріалу, дисертант обмежує пошук двома реперними шляхами навантаження: гідростатичним навантаженням та чистим зсувом. Для ізотропного матеріалу саме вони і мають забезпечити реперні напрями поверхні навантаження. Варто зазначити, що наведені схеми навантаження відповідають своїм назвам лише на макрорівні, тобто лише коли представницька комірка відповідає точці макроконтинууму. Навантаження комірки у вказаний вище спосіб дає основні точки на поверхні навантаження для фіксованої пористості. Подальші кроки дослідження фактично імітують серію променевих навантажень, доповнених регресійним аналізом по діапазону пористості, яку автор залучає до розгляду. За даними обчислювальних експериментів зі знаходження величини повної пружної енергії накопиченої у представницькому об'ємі за гідростатичного стиску та чистого зсуву та з використанням аналітичних залежностей закону Гука для ізотропного пружного тіла автор визначив модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона матеріалу зі структурою інверсного опалу. Розрахунки показали, що пружні модулі суттєво залежать від пористості структури інверсного опалу.

Для побудови поверхні текучості шляхом обчислювального моделювання на представницькій комірці П. О. Коробко знаходив величини граничних напружень текучості інверсного опалу для різних віднульових однопроменевих шляхів навантаження. Кожен з них дає точку кривої текучості в (p, τ) -площині, апроксимація цих точок дає шукану криву текучості. Задля спрощення її запису у аналітичній формі автор наблизив отриманий обчислювальним шляхом вираз однією з моделей, наявним в досяжних програмах скінченно-елементного моделювання.

Четвертий розділ присвячено вивченню поведінки матеріалів, схильних до проявів ауксетичної поведінки. Аналізуючи відомі коректні моделі

поведінки композиційних матеріалів, дисертант приходить до висновку, що наявність від'ємного коефіцієнту Пуассона не суперечить основним загальним вимогам термодинаміки та механіки. Більшість формул для коефіцієнта Пуассона пористого тіла мають форму, яка передбачає ауксетичність, але не містять інших констант, окрім пружних модулів і пористості. Вивчаючи зв'язок між цими параметрами для випадку інверсного бджолиного стільника, автор знайшов, що залежність, про яку йде мова у даному розділі, є вельми чутливою до важливого складового елемента цього стільника. Ним виявилось відношення товщини стрижня до його довжини. Додавання у цей стільник додаткових елементів, зокрема закруглень на перетині стрижнів, також є важливим елементом для прояву ауксетичних властивостей. Саме у такий спосіб виявилось можливим додати до теорії «середньоквадратичних» деформацій спеціальний безрозмірний параметр, який фігурує разом із пористістю у співвідношеннях реологічної теорії пористих матеріалів В. В. Скорохода.

Найважливіші результати автора

- Найвагомим результатом автора є побудована їм модель пористого матеріалу, який разом із порами містить шарнірно стрижневий каркас, що в залежності від співвідношення геометрично – кінематичних його характеристик здатний перетворювати звичайний пористий матеріал у ауксетик.
- Запропонована автором модель разом із розробленими ним методами її обчислювальної реалізації дозволили розв'язати одну із найважливіших проблем матеріалознавства проникливих матеріалів: визначення умов деформування, які дозволяють переходити від капілярної до закритої пористості.
- Побудовано модель поведінки метаматеріалів типу інверсного опалу та інверсного бджолиного стільника за умов їх пружної та пластичної деформації.
- Визначені ефективні модулі пружності та знайдено вираз поверхні навантаження метаматеріалів типу інверсного опалу та інверсного бджолиного стільника.
- Встановлено, що внаслідок наявності строго періодичної структури, відкривається можливість знаходити ефективні властивості такого мікронеоднорідного метаматеріалу осереднюючи фізичні поля в масштабі неоднорідності мезоструктури, суттєво меншому за масштаб довжини осереднення.
- Запропонований П. О. Коробком алгоритм осереднення дозволив послідовно встановити взаємозв'язок між макроскопічним та

мезорівневим напружено-деформованим станом і зробив можливим визначення ефективних властивостей мета матеріалів, що розглядаються в роботі.

Зауваження по роботі

1. Назва роботи не відображає специфіки розглянутого класу матеріалів, а саме наявності стрижнево-шарнірного каркасу та його зв'язку із ауксетиками. Замість "*особливостей мезоструктури*" краще говорити про "*параметри мезоструктури*", а також слід конкретизувати, що предметом дослідження є ефективні *пружно-пластичні* властивості.
2. Наведене на стор. 49 визначення середнього значення поля шляхом об'ємного усереднення по представницькій комірці не є коректним для пористих і тріщинуватих середовищ, а також композитних матеріалів з недосконалим контактом фаз. Універсальний підхід до проблеми гомогенізації структурно-нероднорідних матеріалів використовує визначення макроскопічних параметрів усередненням відповідних локальних полів по поверхні представницького об'єму, див. наприклад *Hori M., Nemat-Nasser S. On two micromechanics theories for determining micro-macro relations in heterogeneous solids. Mech. Mater. 31 (1999) 667–682.*
3. На стор. 94 вказано, що "отримані значення об'ємного модуля K і модуля зсуву G повністю описують ізотропну пружну поведінку структури інверсного опалу під навантаженням". Насправді ж розглянута в підрозділі 3.1 структура має кубічну симетрію і тому є макроскопічно анізотропною з трьома незалежними ефективними пружними модулями C_{1111} , C_{1122} і C_{1212} . Формула (3.4), а також інші наведені в даному та наступних підрозділах результати мають бути модифіковані з урахуванням кубічної анізотропії.
4. Вирази для пружних модулів пористого тіла (в т.ч. формулу (4.7)) отримано В. В. Скороходом з моделі типу Ешелбі, тобто простору з однією ізольованою порою. Застосовність таких формул обмежена матеріалами з малою ($p \ll 1$) пористістю, тому вказаний автором на стор. 142 "факт, що для значень пористості, які перевищують $2/3$, коефіцієнт Пуассона є від'ємним" не має наукового підґрунтя.
5. Поза увагою автора залишився ряд фундаментальних теоретичних робіт, присвячених структурно-неоднорідним матеріалам з від'ємним коефіцієнтом Пуассона, зокрема публікації Г. В. Мілтона і його колег, див. наприклад *Milton G. W. Composite materials with Poisson's ratios close to -1 . J*

Mech. Phys. Solids 40(1992) 1105–1137.

6. Текст дисертації переобтяжений формулами, було би доцільно проміжні обчислення винести в додаток. Наявні окремі невдалі вирази, наприклад "низько пористий матеріал", "пориста пластичність", "низьке напруження", "місцеве поле напружень" та деякі інші. Також є незначні відхилення від вимог до оформлення переліку посилань.

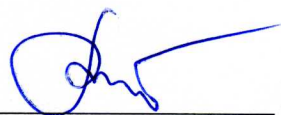
Загальні висновки стосовно дисертаційної роботи

Вказані зауваження не змінюють загального позитивного враження від дисертаційної роботи. Вважаю, що дисертаційна робота Коробка П. О. «Вплив особливостей мезоструктури на ефективні властивості метаматеріалів типу інверсного опалу та інверсного бджолиного стільника» є завершеною науковою працею, містить одержані автором нові наукові результати в галузі матеріалознавства, які в сукупності ефективно сприяють прогресу в створенні нових метаматеріалів.

За обсягом виконаних досліджень, новизною та науковою значимістю отриманих результатів, їх рівнем дисертаційна робота повністю відповідає вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та вимогам, передбаченими пунктом 25 «Про внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України з питань підготовки та атестації здобувачів наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 19 травня 2023 року №502, а її автор Коробко Павло Олександрович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – матеріалознавство.

Офіційний опонент,

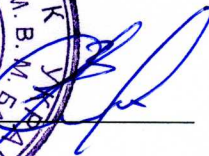
Провідний науковий співробітник
Інституту надтвердих матеріалів
ім. Бакуля НАН України
д.ф-м.н., професор



Володимир КУЩ

Підпис д.т.н. Куща В. І. засвідчую:

Вчений секретар
Інституту надтвердих матеріалів
ім. Бакуля НАН України
к.т.н.

Володимир СМОКВИНА