

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
з галузі знань 13. Механічна інженерія
за спеціальністю 132. Матеріалознавство

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є вплив особливостей мезоструктури деяких типів метаматеріалів на їх локальні та макроскопічні властивості. У дисертації метаматеріали представлені двома спеціальними високопористими системами: інверсним опалом та інверсним бджолиним стільником.

Предмет дослідження полягає у визначенні пружних та пластичних характеристик, зокрема формулюванню критерію переходу метаматеріалів від стану пружної поведінки до пластичної, враховуючи особливості мезоструктури

Метою дослідження є знаходження залежностей між геометричними характеристиками мезоструктури та такими механічними властивостями матеріалів, як модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, поверхня навантаження.

Під терміном мезоструктура автор дисертації розуміє елементи геометрії тіла, масштаб яких займає проміжне становище між розмірами тіла в цілому і характерними розмірами того, що зазвичай асоціюють із терміном мікроструктура (зеренна структура, міжзеренні границі, вкраплення фаз інших матеріалів, тощо).

Стан проблеми та актуальність теми дисертації.

Перш за все слід зазначити, що матеріалознавство сприймається як сукупність різноманітних знань про матеріали, основу яких більшістю являють результати експериментальних досліджень. Намагання поєднати ці знання між собою або хоча би згрупувати для виділення у відносно самостійні розділи потребує використання інших фундаментальних наук, таких як фізика, хімія, математика та механіка. Тим не менше, таке групування відбувається і самостійно, завдяки чому вже у цей час можна казати про існування певних розділів, що набули відносної самостійності і стійкості. Серед них особливе значення відіграють багатокомпонентні системи, де особливе місце займають мікронеоднорідні матеріали. Зокрема, до таких матеріалів відноситься дуже широкий клас композиційних матеріалів.

Суттєву роль у сучасному матеріалознавстві ще донедавна відігравали порошкові матеріали, для яких вихідною сировиною є порошки металів, а найпоширенішою технологією є їх пресування. На їх основі вирішуються

багато проблем отримання міцних та зносостійких матеріалів. Це досягається завдяки технологіям, які продукують дуже маленьку залишкову пористість, а самі матеріали можуть бути віднесені до класу конструкційних.

Натомість у останні десятиріччя помітно зросла потреба суспільства у функціональних матеріалах. У першу чергу вони пов'язані із авіабудуванням та космічними програмами. Тобто, вони мають забезпечувати легку вагу, поєднану із міцністю, витривалістю та здатністю чинити опір динамічним навантаженням. Інший клас проблем пов'язаний із медициною, а саме виробленням імплантатів, які зазвичай, являють собою високопористе тіло. Не менш важливими є проблеми отримання фільтрів, де центральною проблемою є створення такої системи пор, яка б надавала гарантії існування і належного функціонування капілярів для безперешкодного просування біорідини. Ще одна важлива проблема пов'язана із створенням паливних комірок, електроди яких мають бути також регульовано проникливими. Подібні проблеми виникають і під час створення сучасних засобів радіолокації, що пов'язані із виготовленням магнетронів.

Вже сам наведений вище перелік задач сучасного матеріалознавства функціональних матеріалів свідчить про те, що отримання таких властивостей потребує наявності і стійкості складної внутрішньої структури. Слід підкреслити суттєву різницю між конструкційними та функціональними матеріалами розглянутими вище. Якщо, для перших важливою була лише залишкова пористість, то у випадку функціональних матеріалів розглянутого класу на перше місце виходить складна капілярно – пориста структура.

Серед інших причин саме ця обставина і виправдовує використання автором дисертації для назви таких матеріалів терміну метаматеріали. Зрозуміло, що створення таких матеріалів потребує і спеціальної методології обрахунку їх властивостей. Констатуючи певну наявність таких розрахункових схем для навіть простіших пружних та пластичних властивостей, автор звертає увагу на суперечливість, яка притаманна більшості методологій. Тому дисертаційна робота Коробко П. О. присвячена розробці методології розрахунку механічних властивостей метаматеріалів є актуальною

Структура та завдання дисертації

Робота виконана на 165 сторінках, включає 42 ілюстрації, 19 таблиць та 112 посилань на джерела. Дисертація складається із 4 основних розділів – перші два присвячені опису теоретичних засад, на яких ґрунтується дослідження, що описано у розділах 3 та 4. Розділ 3 присвячений проведенню обчислювального експерименту для оцінки механічної поведінки матеріалу зі структурою інверсного опалу. У 4 розділі проводиться дослідження залежності коефіцієнта Пуассона від внутрішньої геометрії високопористого матеріалу на прикладі просторової структури інверсного бджолиного стільника.

Основними завданнями дисертаційного дослідження є:

- знаходження пружних властивостей матеріалів;
- знаходження пластичних властивостей матеріалів;
- аналітичний опис залежностей механічних властивостей і геометричних характеристик структур;
- оптимізація геометрії структур, що характеризуються від'ємним коефіцієнтом Пуассона.

Зміст дисертації

У вступі автор подає загальну характеристику стану проблем, пов'язаних із моделюванням властивостей метаматеріалів. Зокрема, наводить аргументи щодо переваг використання методів механіки мікронеоднорідних матеріалів. Вводить до розгляду уявлення про особливості внутрішньої топології порового простору. Акцентує увагу на важливості урахування у моделях таких матеріалів проникності, підкреслюючи її вплив не тільки на механічні властивості. Детально зупиняється на важливості визначення ефективних механічних характеристик для матеріалів типу інверсного опалу та бджолиних стільників.

Перший розділ присвячено аналізу тих особливостей, які пов'язані із моделюванням мезоструктурних матеріалів у рамках континуальних підходів. Особливу увагу П. О. Коробко приділяє пружно – пластичному переходу. З цією метою він аналізує та оцінює ті підходи, що склалися у механіці незворотно стисливих матеріалів і пов'язані із формою та виглядом поверхонь навантаження. Також у дисертації він наводить узагальнення цих феноменологічних моделей на випадок проявів в'язкості та повзучості із урахуванням фізичної їх інтерпретації. Таким чином, він окреслює ті уявлення, які у подальших розділах будуть використані для формулювання обчислювальних моделей та їх застосуванню.

Зв'язок між структурою, властивою деяким класам метаматеріалів та особливостям їхньої поведінки на макроскопічному рівні встановлюється П. О. Коробком у **другому** розділі. З цією метою він приділяє увагу аналізу на елементарній комірці. Інтерпретація отриманих на комірці результатів проводиться на підставі фізично обґрунтованих процедур осереднення. Слід зазначити, що як геометричні параметри комірки, так і характер наступного осереднення обираються із урахуванням особливостей інверсних опалів і бджолиних стільників. У цьому ж розділі П. О. Коробко приділяє увагу детальному опису технологій отримання інверсних опалів, що включає методи електроосадження для утворення структури та нанесення покриттів. Саме ці процедури і гарантують отримання високопористого зразка.

Третій розділ присвячено обрахунку ефективних властивостей обох типів матеріалів, які розглядаються у дисертації. Мається на увазі визначення коефіцієнту Пуассона, модуля Юнга та поверхонь навантаження у термінах механіки континууму. Якщо закон Гука приймався у роботі у своїй канонічній

формі, для уточнення рівняння поверхні навантаження проводилися додаткові обчислювальні процедури на репрезентативній комірці. З цією метою у просторі напружень виділялися певні шляхи навантаження і для кожного з них фіксувався перехід від пружної деформації до пластичної. У результаті серії обчислювальних експериментів вдалося встановити, що поверхня, отримана поєднанням точок у просторі напружень, що відповідають цьому переходу близька до симетричного еліпсоїда, який притаманний моделям Шими, Гріна, Куна – Антеса та інших. Особливо близькою дана поверхня виявилася до тієї, яка була із інших міркувань запропонована Флеком та Дешпанде.

Четвертий розділ присвячений чутливості коефіцієнту Пуассона до пористості, зокрема, до з'ясування питання, за яких умов пористий матеріал набуває ауксетичних властивостей. Як і у попередніх дослідженнях джерелом для основних результатів був аналіз на репрезентативній комірці із застосуванням методу скінчених елементів. Варіюючи значення пористості в широкому діапазоні, було показано, що структурі інверсного бджолиного стільника властива ауксетична поведінка лише за відносно високих значень пористості.

Граничним значенням пористості за якого відбувається перехід від додатного до від'ємного значення коефіцієнта Пуассона є величина близько 75%. Детальний аналіз поведінки структури із пористістю понад 80% показав, що основним фактором впливу на ступінь ауксетичності структури є відношення діаметра стрижня до його довжини. Збільшення жорсткості вузлів перетину стрижнів за рахунок введення до геометрії сферичних вузлів призводить до зміни механізму деформування із переважно згинального, до схеми вільного осадження стрижнів, що паралельні напрямку деформування. У межах розділу було наведено ряд регресійних моделей для опису залежностей від геометрії структури і прогнозування механічних властивостей матеріалу. Окремо варто зазначити, що функції відгуку для пластичного коефіцієнта Пуассона та для додаткового параметру, що міститься у узагальненому рівнянні для нього хоч і демонструють сильну кореляцію із отриманими результатами, все ж мають асимптотичний характер і не забезпечують достатньої точності при екстраполяції за межі діапазону значень, що досліджувалися.

Найважливіші наукові результати

- Створено новий алгоритм визначення ефективних властивостей метаматеріалів, що базується на узагальнених уявленнях про репрезентативну комірку та методи усереднення.
- На підставі наведеного алгоритму визначені ефективні пружні властивості мета матеріалів, а для матеріалів типу інверсного опалу визначена також форма поверхні навантаження, яка узагальнює відомий варіант теорії пластичності пористих тіл Дешпанде – Флека.

- На прикладі складної просторової стрижневої структури була досліджена ауксетична поведінка метаматеріалів, що є важливим для прогнозування механічних властивостей матеріалу і оптимізації їхньої внутрішньої структури при використанні у елементах захисних конструкцій.
- Було показано, що коефіцієнт Пуассона набуває від’ємних значень за відносно високих значень пористості структури інверсного бджолиного стільника – понад 75% і переважно визначається геометрією структури. Результати дослідження показали, що значення коефіцієнта Пуассона структури інверсного бджолиного стільника можуть варіюватися у широкому діапазоні при відносно малій зміні величини пористості (3%) за рахунок введення у геометрію структури додаткових сферичних вузлів у місцях перетину стрижнів.

Повнота викладу основних результатів в опублікованих працях

За матеріалами дисертації опубліковано 4 друковані праці, 3 у періодичних українських виданнях, що відносяться до категорії «Б» та 1 у міжнародному журналі, що індексується у наукометричних базах Web of Science та Scopus. Результати дисертації пройшли успішну апробацію на міжнародній конференції. Вимоги до повноти публікацій та апробації результатів дисертації Коробка П.О. виконані в повному обсязі. Матеріали, опубліковані в наукових працях, в повній мірі відповідають змісту дисертаційної роботи.

Зауваження по роботі

1. Під час побудови нової моделі пластичної поведінки матеріалів зазвичай не обмежуються визначенням поверхні навантаження та перевіркою асоційованого закону пластичної течії. Необхідно також вказати умови досягнення граничного стану. Зокрема, більшість фахівців віддають перевагу критерію Огороднікова – Деля. На жаль, у роботі відсутні навіть згадування про даний критерій пластичного руйнування.
2. Хоча у роботі розглядаються матеріали, мезоструктура яких неоднорідна, використання терміну композиційні матеріали у даному випадку недоречно. Краще було б використовувати термін мікронеоднорідні матеріали.
3. Підрозділ 2.2.1 містить занадто велику кількість формул, а також явно зайві жонглювання індексами, що навряд чи сприяє покращенню сприйняття викладеного у цій частині матеріалу.
4. Підрозділ 2.2.3 містить дані, які не використовуються в дисертації
5. У підрозділі 3.2.3 розглянуто цікавий випадок, коли за осьової деформації під час її великих значень можливо закриття пори. Тобто, спостерігається перехід від відкритої пористості до закритої. На жаль

обговорення цього моменту, який дуже важливий для порошкового матеріалознавства є вельми важливим, відсутнє.

Загальні висновки стосовно дисертаційної роботи

Зроблені 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 вирішенню завдання створення нових метаматеріалів, яким останнім часом приділяється велика увага.

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.

Професор кафедри Технології виробництва
літальних апаратів Національного Технічного
Університету України
«КПІ ім. Ігоря Сікорського»
доктор технічних наук, професор

Вячеслав ТИТОВ

