

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента 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

Актуальність теми дисертації.

Вивчення мікронеоднорідних матеріалів і метаматеріалів є надзвичайно актуальним завдяки їх унікальним властивостям та широким можливостям застосування в різних галузях науки і техніки. Мікронеоднорідні матеріали відрізняються складною внутрішньою структурою, що дозволяє їм демонструвати властивості, які неможливо знайти в однорідних матеріалах. Їх мікро- і макроструктура може включати різні фази, пори, частинки та інші неоднорідності, що впливають на їх фізичні, хімічні та механічні характеристики. Завдяки цьому такі матеріали можуть мати підвищену міцність, термостійкість, електропровідність тощо. Однією з основних галузей застосування гетерогенних матеріалів є авіаційна та космічна промисловість. Завдяки своїм унікальним властивостям, такі матеріали дозволяють значно зменшити вагу конструкцій, підвищити їх міцність та стійкість до екстремальних умов. Це сприяє створенню більш легких і економічних літаків та космічних апаратів, що мають підвищену ефективність та безпеку. У медичній галузі такі матеріали можуть застосовуватися для розробки нових типів протезів та імплантатів. У сфері енергетики мікронеоднорідні матеріали сприяють розвитку нових технологій для зберігання і перетворення енергії. Вони підвищують ефективність сонячних елементів і акумуляторів, що є ключовим фактором для розвитку відновлюваних джерел енергії та зменшення впливу на навколишнє середовище. В межах роботи згадується використання в оптиці для створення приладів, здатних маніпулювати світлом у нові способи. Наприклад, вдосконалені лінзи на основі таких матеріалів можуть перевершувати дифракційні обмеження, що значно покращує якість оптичних систем. У телекомунікаціях метаматеріали використовуються для створення нових антен та компонентів, на кшталт хвильових фільтрів, які покращують якість сигналу, зменшують розмір і вагу обладнання, а також підвищують його ефективність. Це особливо важливо в умовах сучасного світу, де потреба в швидкісних і надійних комунікаціях постійно зростає. Актуальність тематики дисертації також підтверджується використанням напрацювань 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.

Загальна характеристика роботи

Робота виконана на 165 сторінках, включає 42 ілюстрації, 19 таблиць та 112 посилань на джерела. Дисертація складається із 4 основних розділів – перші два розділи – теоретичні. Вони зосереджуються на фундаментальних питаннях механіки деформівного твердого тіла, існуючих аналітичних моделях і слугують основою для двох наступних. Розділ 3 описує постановку і обговорює результати обчислювального експерименту із оцінки механічної поведінки матеріалу зі структурою інверсного опалу. Четвертий розділ описує дослідження залежності коефіцієнта Пуассона від особливостей геометрії порового простору структури інверсного бджолиного стільника просторового типу.

У вступі автор обґрунтовує актуальність проблеми, формулює мету і завдання дослідження, наводить об'єкт і предмет дослідження, викладає стислий літературний огляд. Також у вступі автор аргументує використання методів мікромеханіки, методу скінченних елементів посилаючись на наявні дослідження. Вступ коротко описує основні результати і наукову новизну проведеного дослідження.

Перший розділ присвячено висвітленню питань пов'язаних з фізичними моделями деформування компактних матеріалів і з особливостями пружної та пластичної деформації пористих або гетерогенних матеріалів. Більш детально автор зупиняється на розгляді теорії пластичності пористих тіл і зокрема на відомих і запропонованих різними авторами поверхнях навантаження, або поверхнях текучості пористих і порошкових матеріалів, а також на визначенні швидкостей деформації зразка в результаті навантаження з урахуванням дії асоційованого закону. Крім того, він подає уявлення про фізичну інтерпретацію процесу деформування неоднорідного середовища. Окремо, П.О. Коробко наголошує на заздалегідь визначених обмеженнях, що накладаються на об'єкт і предмет дослідження, звертає увагу на припущення в рамках яких буде відбуватися подальше дослідження. Згадані у цьому розділі принципи відіграють

важливу роль у подальшій структурі дослідження і є опорними теоретичними засадами як для обчислювального аналізу процесів деформування структур, що досліджуються, так і подальшої аналітичної оцінки.

У висновку до першого розділу автор встановлює, що для аналітичного опису існуючих моделей пластичності мікронеоднорідного середовища використовуються як алгебраїчні вирази, так і геометрична інтерпретація величин напружень текучості за різних напружено-деформованих станах.

У другому розділі автор розглядає особливості структури і структурних характеристик типових представників метаматеріалів таких, як інверсний опал та інверсний бджолиний стільник, і спираючись на використання методів механіки гетерогенного середовища пов'язує механічну поведінку твердої фази на мікрорівні з поведінкою матеріалу на макрорівні. П.О. Коробко у межах другого розділу працює в двох масштабах періодичного середовища: локальний масштаб є достатньо малим для того, щоб можна було окремо ідентифікувати неоднорідності і загальний масштаб досить великий щоб неоднорідності були "розмиті". Оцінка переходу з одного масштабу в інший і подається автором, як визначення ефективних властивостей середовища. Другий розділ описує параметри, що визначають періодичне середовище, а також мотивує вибір форми елементарної комірки.

Окремо виділяється технологія виготовлення матеріалів, що досліджуються, а також розкриваються характеристики внутрішньої будови і геометрії та їхній вплив на похідні характеристики матеріалу, такі як пористість.

Автор встановлює, що внаслідок того, що в метаматеріалах, на відміну від більшості матеріалів, мезоструктура є строго періодичною, відкривається можливість знаходити ефективні властивості такого мікронеоднорідного матеріалу осереднюючи фізичні поля в масштабі неоднорідності мезоструктури, який суттєво менший масштабу довжини осереднення.

Третій розділ присвячений теоретичному прогнозуванню пружних та пластичних властивостей матеріалу. Пружні характеристики обчислюються шляхом накладання наперед визначених умов на представницьку комірку – гідростатичного стиску та чистого зсуву. Обидві схеми призводять до накопичення внутрішньої енергії деформування об'ємом матеріалу. Питома енергія в подальшому виражає об'ємний і зсувні модулі пружності, які використовуються у аналітичних залежностях, для визначення модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона. Розділ детально описує граничні умови, що накладаються на репрезентативну комірку, базуючись на матеріалах, що були викладені у другому розділі. Обчисливши величини пружних констант для різної геометрії структури, автор наводить залежності цих характеристик від величини пористості шляхом регресійного аналізу. Отримані залежності пружних констант структури від пористості дозволяють розв'язувати як пряму так і зворотну задачу із

знаходження оптимальної величини пористості для забезпечення необхідної величини жорсткості. Автор відмічає, що коефіцієнт Пуассона для матеріалу зі структурою інверсного опалу проходить через мінімум при значенні пористості 0,316, що приблизно відповідає значенню відносної товщини покриття 0,17. Для визначення пластичних характеристик П.О. Коробко використовує ітераційний підхід, для визначення величини повної деформації, що викликала б залишкову деформацію на рівні розповсюдженого критерію $\sigma_{0,2}$. Автор звертає увагу на відмінності між пружною і пружно-пластичною постановкою чисельного експерименту і використовує подібний підхід для аналізу всього діапазону схем напружено-деформованого стану для побудови поверхні навантаження. Отримані результати порівнюються із феноменологічною моделлю Дешпанде-Флека. У висновку П.О. Коробко звертає увагу на потенційну практичну значущість отриманих результатів, а також особливості деформування через кінетику зміни структури.

Четвертий розділ в основному присвячений дослідженню впливу геометрії просторової структури інверсного бджолиного стільника на властиву їй ауксетичну поведінку. Дослідження проводиться в контексті узагальненої формули Скорохода, пропонуючи введення додаткового параметру, який якраз і міг би позначати вплив геометрії, що досліджується. Наслідуючи принципи із розділу 3, результати моделювання на елементарному об'ємі використовуються для регресійного аналізу і побудови залежності геометричних характеристик і коефіцієнта Пуассона. Автор приділяє увагу статистичній значущості коефіцієнтів і вказує на взаємний вплив окремих компонентів структури при оцінці механічних характеристик. Отримані залежності коефіцієнта Пуассона від геометрії структури показали асимптотичний характер, новий параметр, що був запропонований в межах цього розділу, набув певного фізичного змісту демонструючи зміну механізму деформування структури.

Висновки до роботи описують наукову новизну отриманих результатів, потенційні області їхнього застосування, а також можливі напрямки продовження дослідження.

Найважливіші наукові результати

- Для широкого діапазону структури інверсного опалу було вперше знайдено ефективні модулі пружності. Ці дані є необхідними для розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій, що містять елементи з інверсно-опалового матеріалу, як для статичних навантажень так і для поширення пружних хвиль.
- Було показано, що у випадку середньої пористості структури інверсного опалу, прогнозована за результатами експерименту на одновісне

навантаження величина напруження текучості на всебічний стиск матиме похибку на рівні 30%.

- Для зручності прикладного використання отриманих результатів, автор наблизив отримані значення розповсюдженою у комерційних пакетах феноменологічною моделлю, продемонструвавши, коректність такого наближення.
- В результаті дослідження було показано, що ефективне значення коефіцієнта Пуассона для просторових стрижнево-шарнірних структур інверсного бджолиного стільника в першу чергу залежить від характеру з'єднання стрижнів. При невеликій зміні величини пористості, значна зміна у значенні коефіцієнта Пуассона досягається завдяки переходу згинального механізму деформування до пластичного осаджування.

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 і побажання по роботі

1. В першому розділі в параграфі «1.1. Фізичні моделі деформування» приводяться формули для визначення величини деформації матеріалу в залежності від різних параметрів, які пов'язані з кристалічною ґраткою, коефіцієнтами дифузії та іншими характеристиками тонкої структури. Але в цих формулах деякі символи, наприклад, μ , V , σ_i , C не визначені. Крім того, декілька формул не відзначені номерами.
2. Не зовсім зрозумілим є вираз на с. 27 «...Відомо, що в теоріях пластичності компактних матеріалів об'ємна деформація може відбуватися тільки завдяки пружному ефекту, а зміна форми відбувається тільки завдяки дії компонент девіатора напружень. » А що, при зміні форми не має пружного ефекту? Тобто в одному випадку мова йде про вид деформації, а в другому – про вид напружень. Більш точно можна було б сказати, що об'ємна деформація в компактних матеріалах відбувається за рахунок гідростатичного тиску, проявом якого є тільки пружна деформація.

3. При розгляді у другому розділі питань, пов'язаних з лінійною пружністю композиту і встановленні співвідношень між напруженням і відносною деформацією використовують в якості коефіцієнта пропорційності термін «жорсткість», а не термін «модуль пружності». (стор. 51). Як правило параметр «жорсткість» використовують при співвідношенні абсолютних значень сили і деформації, і розмірність жорсткості визначається як Н/мм.
4. Не зовсім логічною є необхідність розглядати у другому розділі особливості деформації матеріалів при високих температурах.
5. На стор. 92 автор стверджує, що границя (точніше форма) об'єму елементарної комірки інверсного опалу є паралелепіпед, хоча в дійсності це форма куба.
6. Описка у формулі (3.10) на стор. 96. Мова йде про коефіцієнт Пуасона, а у другій та третій строках формули записані символи модуля Юнга.
7. Важливо було б порівняти встановлені залежності модуля Юнга і коефіцієнта Пуасона від пористості для інверсного опалу з відомими залежностями цих параметрів від пористості для звичайних пористих матеріалів.
8. Чому така велика границя текучості для нікелю, 1980 МПа, стор. 101, в той час коли звичайний холоднооброблений нікель має границю текучості 247 МПа.
9. Чи можна пояснити причину того, що асоційований закон не працює при середніх значеннях пористості в моделі інверсного опалу?
10. Для підтвердження теоретичних результатів роботи велике значення має експеримент по випробуванню та визначенню деформації в результаті навантаження реальних металевих зразків зі структурою інверсного опалу та інверсного бджолиного стільника. Тому є побажання автору знайти можливість провести такий експеримент в майбутньому.

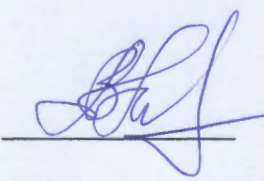
Загальні висновки стосовно дисертаційної роботи

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 сучасного 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.

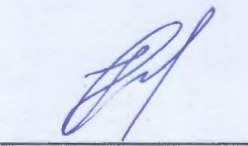
Офіційний рецензент,
Провідний науковий співробітник
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України
д.т.н, с.н.с



Анатолій ЛАПТЄВ

Підпис д.т.н. Лаптева А.В. засвідчую:

Т.в.о. Ученого секретаря
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України
к.т.н.,



Євгенія КИРИЛЮК