

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.

Сучасне матеріалознавство вийшло далеко за межі однорідних (гомогенних) або, як їх ще називають, компактних матеріалів. Поєднуючи у собі досягнення металургії, хімії та фізики твердого тіла, вчені та інженери створюють матеріали та їх поєднання для задоволення вимог міцності, стійкості, довговічності, а також функціональних особливостей – теплопровідності, світлопроникності, радіопрозорості та ін. Одним із векторів розвитку матеріалознавства є мікронеоднорідні матеріали. Зазвичай їхні властивості носять унікальний характер. Структура і матеріали, що утворюють цю структуру, закладаються під конкретні умови експлуатації, а також під індивідуальні вимоги щодо утилізації, переробки та впливу на навколишнє середовище.

Мікронеоднорідні матеріали існують не лише як штучно створені матеріали, але і як природні органічні та неорганічні структури. Визначеною наноструктурою серед органічних об'єктів характеризуються кігті, кістки, бавовна, корали. Відомим представником неорганічної групи природних мікронеоднорідних матеріалів є опал – аморфний мінерал класу силікатів, утворений з аморфізованої суміші двооксиду кремнію та молекулярної води. Є природним фотонним кристалом – тобто матеріалом структура якого характеризується періодичною зміною показника заломлення у просторових напрямках.

Недоліком вищезгаданих матеріалів є їхня хаотична внутрішня будова. Саме тому у дисертації автор звертається до вивчення структур, що характеризуються впорядкованою, симетричною будовою, що в подальшому називаються метаматеріалами.

Що стосується механічних властивостей метаматеріалів, то ця область до сьогодні залишається досить невивченою. По-перше впорядкована структура у просторі може простягатися в одному вимірі (1D композити), у двох напрямках (2D композити), та у тривимірному просторі. По-друге доводити ефективність тої чи іншої структури метаматеріалу доводиться досить тривалими дослідженнями. По-третє – підібравши оптимальну структуру під поставлену задачу для неї потрібно визначити ефективне застосування матеріалу твердої фази та технологію виготовлення виробів із отриманого метаматеріалу.

Очевидно, що не останнє місце у цьому циклі розробок займає економічна доцільність цих досліджень. Автор розкриває питання актуальності шляхом посилань на численні дослідження пов'язані з механічними і функціональними властивостями метаматеріалів. 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 для досягнення поставлених цілей, представляє об'єкт і предмет дослідження, характеризує поточний стан речей у науковій спільноті. Окремо в межах вступу наводиться аргументація на користь використання методів мікромеханіки, методу скінченних елементів тощо. Вступ коротко окреслює основні результати і наукову новизну дисертаційного дослідження.

Перший розділ присвячено підходам до опису поведінки неоднорідного середовища. У цьому розділі наводяться основні поняття, що надалі використовуються в межах дослідження, розкривається їхній фізичний і геометричний зміст. Підрозділ 1.1 присвячений фізичним моделям деформування. Автор у стислій формі надає загальний перелік фундаментальних принципів, що характеризують фізичну суть поняття деформація, що є одним із центральних в межах роботи. Цей підрозділ окреслює певні обмеження умов, що накладаються на подальше дослідження – так, автор звертає увагу, що надалі

матеріали, що мають металічну природу належать до матеріалів типу Мізеса і задовольняють принципам локальності і склерономності, що визначає існування взаємозв'язку між напруженнями і відповідними їм швидкостям деформацій. Підрозділ 1.2 присвячений обговоренню теорії пластичності неоднорідних матеріалів. Підрозділ звертає увагу на відмінності у процесах деформації для компактних і неоднорідних матеріалів, розвиток теорій пластичності пористих, порошкових і композиційних матеріалів, взаємодію складових тензора напружень, що характеризує зміну співвідношення фаз неоднорідного середовища (пор або включень і каркасу). Логічне закінчення, щодо геометричної інтерпретації результатів перетікає у підрозділ 1.3, що присвячений питанню поверхні навантаження. Автор описує декілька способів побудови поверхні навантаження і наводить приклади існуючих відомих моделей, їхніх недоліків та підходів до опису поверхонь за допомогою аналітичних функцій, завершуючи обговорення підходів до опису поведінки неоднорідного середовища питанням асоційованого закону у підрозділі 1.4. із допущенням про те, що поверхня навантаження виступає потенціалом для тензора швидкостей. У висновку до першого розділу підкреслюється особлива роль форми поверхні текучості, аналіз якої може бути джерелом для якісних міркувань щодо відповідності тих чи інших поверхонь властивостям матеріалу.

У другому розділі П.О. Коробко розглядає зв'язок між структурою, що властива деяким класам матеріалів та особливостям їхньої поведінки на макроскопічному рівні. Перехід до ефективних властивостей проводиться та підставі фізично обґрунтованих процедур осереднення. До уваги беруться як пружні складові метаматеріалів, так і ті, що супроводжуються незворотними ефектами. Автор вводить поняття граничних і періодичних умов, поняття представницького осередку (комірки) які використовуються у наступних розділах для постановки чисельних експериментів. У другому розділі узагальнюються підходи до математичного опису постановки задач деформування структур, що досліджуються, методом скінченних елементів, а також опису процедур, що покладені у обчислювальний код прикладних пакетів.

Окремо піднімаються питання технології отримання структур, що досліджуються, а також наводиться детальний опис їхніх геометричних характеристик.

Третій розділ описує постановку чисельних експериментів із визначення пружних властивостей структури, таких як модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона; пластичних властивостей, границі текучості та обговорення отриманих результатів. Пружні властивості метаматеріалу визначаються за рахунок перерахунку питомої енергії через закон Гука для ізотропного пружного тіла. Пластична задача розв'язується шляхом ітераційної постановки для пошуку величини повної деформації. Схожим методом знаходяться точки, що відповідають різним схемам напружено-деформованого стану, для побудови

поверхні навантаження. У цьому розділ також досліджується питання критичного значення набутої деформації, а також проблема втрати стійкості деформування. Отримані результати необхідні для розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій, що містять елементи з інверсно-опалового матеріалу, а також для прогнозування збереження оптичних і функціональних властивостей.

У четвертому розділі особлива увага звертається на коефіцієнт Пуассона. Враховуючи природу обмежень до діапазону значень, що може набувати ця характеристика матеріалу, автор фокусується саме на нетиповій для більшості матеріалів, ауксетичній поведінці, взявши за об'єкт свого дослідження складну просторову стрижневу структуру інверсного бджолиного стільника. Подібно до третього розділу, моделювання відбувається на представницькому осередку, але результати обчислень використовуються для визначення і оцінки впливу геометрії структури на величину коефіцієнта Пуассона. Вперше формула В.В. Скорохода була використана для вивчення подібної структури. Для врахування особливостей геометрії мезоструктури, автор пропонує модифікацію вищезгаданої формули для того, щоб пояснити фізичний зміст безрозмірної характеристики жорсткості шарніру стрижневої структури. Результати дослідження показали, що введення сферичних вузлів із подальшим збільшенням їхнього відносного діаметра призводить до зміни механізму деформації структури інверсного бджолиного стільника.

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

Найважливіші наукові результати

- Вперше було знайдено граничні значення напружень пружного деформування для інверсно-опалового пористого матеріалу з металевою матрицею для всього діапазону схем навантаження.
- На прикладі складної просторової стрижневої структури була досліджена ауксетична поведінка метаматеріалів, що є важливим для прогнозування механічних властивостей матеріалу і оптимізації їхньої внутрішньої будови.
- Було змодельовано процес незворотного пластичного стиснення пористого матеріалу з інверсно-опаловою структурою аж до моменту, коли структура пор стає закритою. Що є важливим для прогнозування збереження адсорбційних та хімічно-каталітичних функціональних властивостей інверсно-опалових матеріалів при експлуатації та обробці тиском.

- Було показано, що ідентифікація пластичної поведінки інверсного опалу невідомої структури за допомогою простого експерименту на одновісне навантаження є коректною тільки у висопористому випадку.

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 достатньому обсязі. Матеріали, опубліковані в наукових працях, в повній мірі відповідають змісту дисертаційної роботи.

Зауваження і побажання по роботі

1. Стор. 34: Використання терміну «аналітична функція» не є вдалим. Схоже, що автор мав на увазі запис рівняння поверхні або контуру навантаження за допомогою функцій, заданих аналітично (елементарних функцій).
2. Стор. 41: Було б бажано навести хоча б деякі з виразів для функцій φ та ψ , або послатися на роботу, де формулюються загальні обмеження, щодо вигляду цих параметрів.
3. Підрозділ 2.4: Опис технології отримання метаматеріалів на основі інверсних опалів виграв би і був би більш зрозумілим для потенційного використання за наявності додаткових ілюстрацій, де була б відображена послідовність дій.
4. Оскільки у розділі 3 мова йде про високопористі матеріали не зайвим би був хоча б стислий огляд ефективних властивостей таких матеріалів, поданий у формі короткого літературного огляду. Саме з цього огляду і могло б впливати, що не тільки, а може й не стільки пористість впливає на міцність і стійкість таких матеріалів, але ще й товщина проміжку між порами, його форма і здатність опиратися згину.
5. Стор.118. Під час вибору моделі високопористого матеріалу дисертант зупинив свій вибір на моделі Дешпанде – Флека. В той же час слід зазначити, що така модель може бути віднесена до найпростіших «еліпсоїдальних» моделей. На жаль поза увагою дисертанта залишились моделі з несиметричною поверхнею навантаження (Cam – Clay model) і також найбільш розповсюджена у комерційних пакетах модель Герсона.

Загальні висновки стосовно дисертаційної роботи

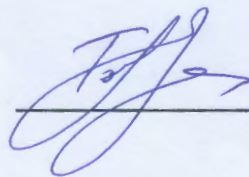
Зроблені зауваження не змінюють загального позитивного враження від дисертаційної роботи. Вважаю, що дисертаційна робота Коробка П. О. «Вплив особливостей мезоструктури на ефективні властивості метаматеріалів типу інверсного опалу та інверсного бджолиного стільника» є завершеною науковою

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.

Офіційний рецензент,

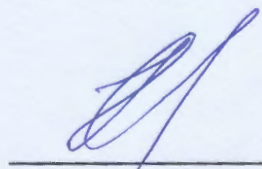
Провідний науковий співробітник
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України
к.т.н, с.н.с



Олександр ТОЛОЧИН

Підпис к.т.н. Толочина О.І. засвідчую:

Т. в. о. ученого секретаря
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України
К. Т. Н.



Євгенія КИРИЛЮК