

ВІДГУК

**офіційного опонента на дисертаційну роботу
у вигляді наукової доповіді за сукупністю статей, опублікованих у
журналах, віднесених до першого та другого квартилів (Q1 та Q2),
Старушенко Галини Аркадіївни
«Асимптотичні методи та моделі в механіці композитних матеріалів»,
подану на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка**

Актуальність теми дисертації

За сучасних умов науково-технічного прогресу композитні матеріали і конструкції широко використовуються в будівельній механіці, що пов'язано зі створенням нових матеріалів, «розумних» композитів із заданими властивостями та прогнозованою поведінкою в умовах експлуатації. Різноманітність структур композитних матеріалів, армувальних наповнювачів та матричних матеріалів, а також схем армування дозволяють цілеспрямовано регулювати у композитів фізичні і геометричні властивості, раціональне поєднання яких дозволяє отримувати оптимальні конструкції, які б відповідали технологічним критеріям та вимогам експлуатації.

Ефективність використання у виробництві композитних матеріалів і конструкцій із них з покращеними міцнісними, теплопровідними, електропровідними, оптичними, магнітними та іншими функціональними характеристиками, композитних структур на основі надтвердих матеріалів, зміцнених жароміцними сплавами, та надлегких алюмоматричних композитів визначається ступенем точності методів їх розрахунку та адекватністю моделей для опису їх макровластивостей.

У цьому зв'язку важливими є дослідження в галузі механіки композитів щодо побудови, математичного опису й фізичного обґрунтування асимптотичних методів і моделей композитів різноманітної структури: адже асимптотичні підходи ефективні в області граничних значень структурних і фізичних характеристик композитів та дозволяють виділити загальні

Вх. № 37-05/25
27.05.2024р.

закономірності в області критичних значень параметрів структури – якраз там, де застосування чисельних методів проблематично через труднощі обчислювального характеру.

Актуальність представленої дисертаційної роботи обумовлена саме побудовою асимптотичних моделей та розробкою математичних методів, що дозволяють коректно описувати композити різної структури та фізичні процеси, які в них відбуваються, обчислювати ефективні характеристики композитних матеріалів в області граничних значень їх фізичних та геометричних параметрів.

Структура та зміст докторської дисертації, аналіз унікальності тексту роботи

Наукова доповідь за сукупністю статей, опублікованих у журналах, віднесених до першого та другого квартилів (Q1 та Q2), складається з анотації, змісту, вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел (182 найменування) та 5 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 165 сторінок; робота містить 96 рисунків і 6 таблиць. Основний текст дисертації складає 96 сторінок та додатки на 27 сторінках.

В **анотації** стисло наведено зміст наукової доповіді, основні результати роботи та висновки за проведеним дослідженням.

У **вступі** подано сутність науково-прикладної проблеми, яка розглядається, обґрунтування вибору теми дослідження, мету й завдання роботи, об'єкт і предмет дослідження, використані методи дослідження. Розкрито зміст положень, що складають наукову новизну одержаних результатів, їх теоретичне і практичне значення, доведено достовірність результатів роботи, показано особистий внесок автора, публікації й апробацію матеріалів дисертаційного дослідження, надано структуру та обсяг роботи. Зміст всіх зазначених елементів докторської дисертації відповідає спеціальності 05.23.17 – будівельна механіка.

У **першому** розділі побудовані трифазні моделі композитів з

періодичними циліндричними включеннями круглого та квадратного поперечного перерізу, розташованими квадратною сіткою, та на основі теорії асимптотичної гомогенізації і методу збурення форми межі знайдені визначальні співвідношення для ефективної теплопровідності композитного матеріалу, що враховують форму включень.

У **другому** розділі розглянуто асимптотичні наближення трифазної моделі композиту щодо розширення області її застосування: використання апарату апроксимацій Паде та побудова модифікованої трифазної моделі композиту.

В **третьому** розділі на основі теорії змазки знайдені асимптотичні розв'язки для високопровідних щільно упакованих композитів. Побудовано моделі композитів із квадратною решіткою включень квадратного, круглого та криволінійного ромбічного профілів. Для гексагональної решітки розроблено розрахункову модель розв'язку задачі на комірці та знайдено двосторонні оцінки асимптотики ефективного параметра.

Четвертий розділ присвячено прикладенню апарату асимптотично еквівалентних функцій до дослідження граничних станів композитних структур. Для асимптотичного аналізу композитів із включеннями різної форми при наявності тонкого інтерфейсу на межі розділу фаз розроблено математичний апарат негладкого перетворення аргументу та асимптотично еквівалентних функцій, застосування якого дозволило врахувати локальні ефекти при контакті фаз композиту.

В **п'ятому** розділі проведено аналіз умов контакту «матриця – включення» в композитних структурах. Обґрунтовано асимптотичні наближення в моделях двофазних волокнистих композитів та поняття фізичної еквівалентності структур. Проведено класифікацію композитів різної структури й надано асимптотичні представлення їх ефективних параметрів.

Шостий розділ присвячений побудові вищих наближень формули Максвелла. Розроблено двофазну модель композиту, на основі якої за методом Шварца знайдені вищі наближення формули Максвелла для композитів з

волокнами квадратного та круглого профілів. Із застосуванням техніки Паде-апроксимацій уточнено формулу Максвелла для композитів із циліндричними включеннями, круглими в перерізі.

У **сьомому** розділі розроблено математичний апарат прикладення техніки негладкого пилкоподібного перетворення аргументу до розв'язку задач механіки періодичної структури. В загальному вигляді знайдено розв'язок періодичної задачі теорії пружності для шаруватого композитного масиву.

У **восьмому** розділі досліджуються моделі неперервної апроксимації дискретних систем. Проведено чисельне дослідження моделей континуальної апроксимації одновимірних лінійних хвильових процесів. Доведено наявність хаосу в континуальній моделі дискретного рівняння Ферхюльста, побудованій з використанням апроксимацій Паде.

У **висновках** узагальнено результати роботи, окреслено основні методи механіки композитів, визначено місце асимптотичних методів та моделей серед інших напрямів досліджень механіки композитів, висвітлені фундаментальні наукові досягнення в дослідженні композитних матеріалів представників української школи механіків.

Додатки містять список публікацій здобувача за темою дисертації, відомості про апробацію роботи та інформацію щодо впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Результат перевірки унікальності тексту наукової доповіді інструментом UNICHECK (ID файлу: 1015962768) показав 9,2 % схожості по тексту (90,8 % унікальності власного тексту). Аналіз в звіті UNICHECK посилян з найбільшим відсотком схожості показав, що це – публікації автора за темою дисертації, тобто самоцитування, що є необхідною умовою апробації докторської дисертації. Отже, **текст дисертації не містить плагіату.**

Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації представлені такі ключові нові наукові результати:

Вперше:

- узагальнено трифазну модель композиту з волокнами круглого і квадратного профілю та отримані співвідношення для ефективного коефіцієнта теплопровідності з урахуванням форми включень;

- для розширення області застосування трифазної моделі розроблено математичний апарат на основі апроксимацій Паде та побудовано модифіковану трифазну модель композиту, яка показує коректні результати при всіх значеннях фізико-геометричних характеристик композита, включаючи асимптотичні співвідношення в граничних випадках;

- для композитних структур з гексагональним масивом круглих включень: досліджені власні коливання мембрани і в аналітичному вигляді визначено умови, за яких буде отримана ненульова перша поправка власної частоти; для високопровідних щільно упакованих композитів визначені двосторонні оцінки ефективного параметра з більш вузькою «вилкою», ніж межі Хашина – Штрікмана;

- розроблено й обґрунтовано математичний апарат методу пилкоподібного перетворення аргументу й асимптотично еквівалентних функцій для опису моделей композитів з тонким інтерфейсом на межі розділу фаз та наведено класифікацію асимптотичних виразів ефективних параметрів композитів різної структури за умовами контакту «матриця – включення»;

- побудовано двофазну модель композиту, на основі якої для волокнистих композитів із круглими і квадратними включеннями знайдені вищі наближення формули Максвелла та проведено її асимптотичний аналіз;

- обґрунтовано математичний апарат прикладення техніки негладкого пилкоподібного перетворення аргументу до розв'язку періодичних задач теорії пружності для шаруватих композитів;

- для дискретного рівняння Ферхюльста розроблено процедуру континуалізації, засновану на перебудові диференціального оператора в діагональну апроксимацію Паде, та чисельно й аналітично доведено наявність хаосу в неперервній моделі.

Дістали подальший розвиток:

- дослідження нестационарного теплообміну в композитній мембрані з гексагональним масивом круглих включень за методом асимптотичної гомогенізації і з використанням перетворення Лапласа;
- асимптотичне осереднення вищого порядку для динамічних задач; зокрема, для системи з неперервними і кусково-неперервними параметрами, дискретної системи, неперервної системи з дискретними елементами;
- чисельне дослідження моделей континуальної апроксимації 1D лінійних хвильових процесів з використанням техніки апроксимацій Паде.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи

Обґрунтованість та достовірність поданих в дисертації наукових положень, висновків і рекомендації підтверджується:

- використанням строго обґрунтованого математичного апарату, побудовою на його основі коректних аналітичних розв'язків та їх всебічним асимптотичним і чисельним аналізом;
- порівнянням результатів в окремих випадках з асимптотичними розв'язками, чисельними розрахунками та експериментальними даними інших авторів;
- чисельним моделюванням за допомогою обчислювальних можливостей сучасних математичних пакетів;
- аналізом фізичної суті побудованих моделей та відповідністю отриманих результатів фізичному змісту задач.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи

та їх в'язок з науковими програмами, планами, темами, грантами

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до чинного законодавства України в галузі архітектури і містобудування, стратегією регіонального

розвитку України та пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки (Закон України № 687-XIV у редакції від 31 березня 2023 р. «Про архітектурну діяльність», Закон України № 2623-III у редакції від 13 січня 2024 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», Постанова Кабінету Міністрів України № 980 у редакції від 22 грудня 2023 р. «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2023 рік»).

Результати роботи були також одержані:

- за участі в якості співвиконавця в дослідницькому проєкті Національного Наукового Центру Польщі (Research grant OPUS 14 N. 2017/27/B/ST8/01330, Lodz University of Technology, Department of Automation, Biomechanics and Mechatronics);

- за Грантом Фонду Саймонса, США (Award ID 1160642, Project Title “Simons Foundation Support to Researchers in Ukraine”, Program “Presidential Discretionary Ukraine Support Grants”) як головний дослідник.

Побудовані в дисертаційній роботі асимптотичні моделі композитів різної структури та отримані на їх основі результати були впроваджені в Науково-дослідному інституті гірничих проблем Академії Інженерних Наук України при розробці ряду тематик (АД-464, АД-465, АД-475, АД-476) щодо вирішення актуальних питань енергоефективності України.

Отримані у роботі в замкнутій формі аналітичні співвідношення й асимптотичні формули, а також чисельні оцінки доцільно використовувати в інженерній практиці будівельної механіки при розрахунках ефективних параметрів композитів різної структури – за різних конструкційних вимог та технологічних умов виробництва.

Розроблений у загальному вигляді математичний апарат може бути узагальнений і застосовуваний при розрахунках використовуваних у будівництві композитів іншої структури.

Знайдені асимптотичні вирази ефективних параметрів композитів із включеннями різної форми та умовами контакту фаз доречно застосовувати у

фундаментальних і прикладних дослідженнях механіки композитів для оцінки чисельних розв'язків в області граничних значень фізичних і геометричних характеристик композитів.

Моделі континуальної апроксимації є доцільними при використанні в дослідженнях, пов'язаних із проектуванням сейсмічно стійких будівельних конструкцій і споруд.

Асимптотичні моделі і розроблені методи їх математичного опису, побудовані в рамках теплопровідності, застосовні також для задач теорії пружності, електропровідності, електро- і магнітостатики, дифузії що значно розширює сферу їх практичних прикладень.

Подані в роботі асимптотичні моделі композитів та аналітичні методи їх представлення доцільно використовувати в навчальному процесі при викладанні навчальних дисциплін «Моделювання та аналітичні розв'язання задач механіки композитів», «Асимптотичні методи в інженерних задачах будівельної механіки» за освітньо-науковою програмою «Промислове та цивільне будівництво» при підготовці фахівців ступеня магістра і ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Повнота викладу наукових положень дисертаційного дослідження в наукових публікаціях, зарахованих за темою докторської дисертації

Наукові положення докторській дисертації у повному обсязі опубліковані в українських і зарубіжних наукових виданнях. Наукових праць, в яких опубліковані основні наукові результати за темою дисертації – 36. Усього за результатами дослідження опубліковано 104 наукові праці, у тому числі:

- 1 монографія, реферована в наукометричній базі даних Scopus;
- 1 одноосібна монографія, опублікована в Німеччині;
- 72 статті, з яких 38 статей реферовано в Scopus та/або Web of Science Core Collection (у тому числі 21 стаття – в журналах першого Q1 та другого Q2 кuartилів, 3 статті – в журналах третього Q3 і четвертого Q4 кuartилів); 2 статті – в збірнику наукових праць, що входить до переліку фахових видань

МОН України; 32 статті – в наукових періодичних виданнях, продовжуваних виданнях та виданнях матеріалів конференцій (із яких 21 статтю опубліковано в зарубіжних видавництвах);

– 30 публікацій – тези доповідей на конференціях (із яких 17 видані в зарубіжних видавництвах).

Дисертаційна робота пройшла апробацію на 43 українських та міжнародних наукових конференціях, семінарах і конгресах. За результатами дослідження було зроблено наукові доповіді:

– на онлайн-семінарі «Materialica+ Research Group» (м. Краків, Польща, 20 грудня 2023 р.);

– на засіданні фахового семінару кафедри будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів (м. Дніпро, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, 29 грудня 2023 р.);

– на міжкафедральному науковому семінарі «Математичне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпро, Український державний хіміко-технологічний університет, 29 лютого 2024 р.).

Зауваження за змістом дисертації

1) У підрозділі 2 розділу 2 при побудові модифікованої трифазної моделі композиту потрібно було б пояснити, яким чином при визначення ефективної теплопровідності ураховується геометрична та фізична характеристики еквівалентного гомогенного середовища з невідомим приведеним коефіцієнтом.

2) У підрозділі 5 розділу 3 знайдені двосторонні оцінки асимптотики ефективного параметра для композита гексагональної структури. Вважаю, що мало б сенс надати кількісну оцінку знайденим співвідношенням, порівнявши їх із межами Хашина – Штрікмана.

3) У підрозділі 2 розділу 7 застосовується техніка несиметричного пилкоподібного перетворення аргументу до періодичних задач теорії пружності

для шаруватих композитів. Вважаю, що слід було б пояснити, яким чином описуються граничні випадки жорсткісних і геометричних характеристик композиту в термінах τ -перетворення, та представити відповідні співвідношення.

Загальний висновок про дисертацію в цілому та її відповідність чинним вимогам

У цілому дисертаційна робота Старушенко Галини Аркадіївни у вигляді наукової доповіді за сукупністю статей, опублікованих у журналах, віднесених до першого та другого квартилів (Q1 та Q2), «Асимптотичні методи та моделі в механіці композитних матеріалів», подана на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка, являє собою завершену наукову працю, виконану автором самостійно, на високому науково-дослідницькому рівні. В дисертації вирішено важливу науково-прикладну проблему, що полягає в побудові та фізичному обґрунтуванні асимптотичних моделей для аналізу макроскопічних властивостей композитів різної структури в області граничних значень фізичних і геометричних параметрів, розробці строгого математичного апарату їх опису, розв'язку задач будівельної механіки, які мають широкий спектр практичних прикладань.

За актуальністю, обґрунтованістю наукових положень, науковою новизною, практичним значенням, повнотою викладу матеріалу дисертації в наукових публікаціях, структурою та оформленням дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» МОН України, а її автор Старушенко Галина Аркадіївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка.

Доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри
опору матеріалів та машинознавства
Національного транспортного університету



Вчений секретар Національного
Транспортного Університету
проф. Мельниченко О.І.

Олександр МАРЧУК