

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу у вигляді наукової доповіді  
за сукупністю статей, опублікованих у журналах,  
віднесених до першого та другого кuartилів (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 дисертаційної роботи**

Сучасний розвиток всіх галузей техніки актуалізує проблему створення нових конструкційних матеріалів – композитів, які в залежності від потреб виробництва повинні поєднувати легкість із високою міцністю, мати покращені теплофізичні, електропровідні та інші функціональні властивості, забезпечувати довговічність та хімічну стійкість конструкцій, сприяти зниженню собівартості матеріалів.

Об'єднання в композитних матеріалах різних за механічними характеристиками компонентів призводить до отримання матеріалу з новими властивостями, відмінними від властивостей їх вихідних складових. З появою такого роду матеріалів виникла можливість цілеспрямованого вибору фізичних параметрів композитів, необхідних для потреб кожної конкретної сфери застосування.

Якісні зміни відбуваються наразі у використанні композитних матеріалів у будівельній індустрії: повсюдно використовуються матеріали з армуючими волокнами, міцнісні та пружні властивості яких виявляються значно вищими, ніж у металів; теплопровідні полімери дешевші за алюміній і стійкі до агресивного зовнішнього середовища; дизайнерські конструкції забезпечують економію ваги, здешевлення будівництва та прискорення його швидкості за рахунок спрощення виготовлення та монтажу виробів.

Ефективність використання у будівництві композитних матеріалів і конструкцій із них, оптимізація технологічних процесів виготовлення

Вх. № 37-05/27  
27.05.2024р.

композитів із визначеними характеристиками залежать від точності методів розрахунку та адекватності моделей для опису їх макровластивостей.

Саме тому представлене в дисертаційній роботі дослідження щодо побудови асимптотичних моделей в області граничних значень фізичних і геометричних параметрів композитів та розробки аналітичних методів, які дозволяють коректно описувати структурні особливості композитних матеріалів і зумовлені гетерогенністю фізичні процеси, які в них відбуваються, є актуальною науково-прикладною проблемою, що потребує всебічного теоретичного обґрунтування та строгого математичного розв'язку.

### **Структура, зміст та оформлення докторської дисертації**

Наукова доповідь за сукупністю статей, опублікованих у журналах, віднесених до першого та другого кuartилів (Q1 та Q2), складається з анотації, змісту, вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

В анотації стисло представлені основні результати проведеного дослідження.

У вступі сформульовані положення відповідно до кваліфікаційних вимог до докторської дисертації: сутність науково-прикладної проблеми, що розглядається; обґрунтування вибору теми дослідження; зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами; мета і завдання дослідження; об'єкт і предмет дослідження; методи дослідження; наукова новизна одержаних результатів; теоретичне і практичне значення роботи; достовірність отриманих результатів; особистий внесок здобувача; апробація результатів дослідження та публікації автора; структура й обсяг роботи.

У першому розділі, присвяченому узагальненням трифазної моделі композиту з урахуванням форми включення, побудовані трифазні моделі композитів з періодичними циліндричними включеннями круглого та квадратного поперечного перерізу та знайдені аналітичні вирази ефективних

коефіцієнтів теплопровідності в двочленному наближенні методу збурення форми межі.

В другому розділі розглянуті асимптотичні наближення трифазної моделі композиту: використано техніку Паде-апроксимацій для розширення області застосування трифазної моделі композиту; побудовано модифіковану трифазну модель композиту.

У третьому розділі на основі теорії змазки представлені асимптотичні розв'язки для високопровідних щільно упакованих композитів різної структури: з включеннями квадратного, круглого та криволінійного ромбічного профілів, для гексагональної решітки круглих включень.

У четвертому розділі розроблено техніку застосування апарату асимптотично еквівалентних функцій до дослідження граничних станів композитних структур. Розроблено математичний апарат негладкого перетворення аргументу, застосування якого дозволило врахувати локальні ефекти на контакті фаз композиту та здійснити асимптотичний аналіз композитів із включеннями різної форми з тонким інтерфейсом.

У п'ятому розділі здійснено аналіз умов контакту «матриця – включення» в композитних структурах. Обґрунтовано поняття фізичної еквівалентності композитних матеріалів, надано класифікацію композитів за умовами контакту фаз та представлені асимптотичні вирази їх ефективних параметрів.

У шостому розділі для композитів із волокнами квадратного та круглого профілів побудовані вищі наближення формули Максвелла на основі розробленої двофазної моделі композиту та математичного апарату методу Шварца. Для композитів із круглими циліндричними включеннями уточнено формулу Максвелла із застосуванням техніки апроксимацій Паде.

Сьомий розділ присвячений застосуванню техніки несиметричного пилкоподібного перетворення аргументу до розв'язку задач механіки періодичної структури. Надано поняття  $\tau$ -перетворення, його основні властивості та застосування до розв'язку періодичних задач теорії пружності для шаруватих композитів.

У восьмому розділі досліджено моделі континуальної апроксимації дискретних систем. Для дискретного рівняння Ферхюльста розроблено процедуру континуалізації, засновану на перебудові диференціального оператора в апроксимацію Паде, і чисельним аналізом доведено наявність хаосу в неперервній моделі.

У висновках узагальнені результати роботи, визначені основні напрями сучасних досліджень механіки композитів, місце серед них і призначення асимптотичних підходів, висвітлені досягнення вітчизняних науковців у галузі механіки композитів.

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

Докторська дисертація оформлена відповідно до вимог Стандарту Придніпровської державної академії будівництва та архітектури ПРЗД-02-22 «Положення про порядок розгляду і захисту дисертацій здобувачів наукових ступенів у спеціалізованих вчених радах з присудження наукового ступеня доктора наук».

За результатами перевірки унікальності тексту дисертації інструментом UNICHECK (ID файлу: 1015962768; 9,2 % схожості тексту, 90,8 % унікальності тексту) текст докторської дисертації не містить плагіату.

Докторська дисертація не містить результатів, отриманих здобувачем у його кандидатській дисертації.

Реферат повною мірою відображає зміст дисертаційної роботи. Оформлення дисертації та реферату відповідає загальноприйнятим вимогам.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами**

Дисертаційне дослідження виконувалося:

– згідно з чинним законодавством України в галузі архітектури та містобудування, нормативною базою будівництва, стратегією регіонального розвитку України (Закон України № 687-XIV у редакції від 31 березня 2023 р.

«Про архітектурну діяльність») та пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки (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»);

– за дослідницьким проектом Національного Наукового Центру Польщі (Research grant OPUS 14 N. 2017/27/B/ST8/01330, Lodz University of Technology, Department of Automation, Biomechanics and Mechatronics), співвиконавець;

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

### **Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у докторській дисертації**

Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, обґрунтовані:

– використанням аналітичних методів розрахунків на основі строгого математичного апарату;

– чисельним моделюванням за допомогою обчислювальних можливостей професійних математичних пакетів;

– всебічним чисельним та асимптотичним аналізом знайдених розв’язків;

– аналізом граничних станів структури та відповідних їм асимптотичних розкладень.

Достовірність отриманих у докторській дисертації результатів підтверджується:

– порівнянням в окремих випадках з результатами інших авторів –

асимптотичними розв'язками, чисельними розрахунками та експериментальними даними;

- порівнянням з наближеними аналітичними розв'язками, знайденими за спрощеними фізичними моделями або інженерними схемами;
- використанням для оцінки розв'язків меж Хашина – Штрікмана або більш вузьких меж, що враховують форму включення;
- оцінкою області застосування побудованих моделей та асимптотичних методів їх опису;
- аналізом фізичної інтерпретації розв'язків і чіткою відповідністю отриманих результатів фізичному змісту задач.

### **Наукова новизна результатів дисертаційної роботи**

В дисертації вперше одержано такі нові наукові результати:

- отримані визначальні співвідношення для ефективної теплопровідності композитного матеріалу, армованого волокнами круглого та квадратного профілю, з урахуванням форми включень; розроблені методи розширення області застосування трифазної моделі: на основі апроксимацій Паде та за модифікованою трифазною моделлю композиту;
- в загальному вигляді знайдено аналітичний розв'язок задачі про власні коливання мембрани гексагональної структури; у випадку високопровідних щільно упакованих композитів визначені двосторонні оцінки ефективного параметра з більш вузькою «вилкою», ніж межі Хашина – Штрікмана, при будь-яких значеннях розміру включень;
- розроблено математичний апарат на основі методів несиметричного  $\tau$ -перетворення аргументу й асимптотично еквівалентних функцій для опису моделей композитів з тонким інтерфейсом, що дало можливість урахувати локальні ефекти на межі розділу фаз композиту; здійснено класифікацію асимптотичних виразів ефективних параметрів композитів різної структури за умовами контакту «матриця – включення»;

- побудовано двофазну модель композита, на основі якої знайдені вищі наближення формули Максвелла для волокнистих композитів із круглими та квадратними включеннями;
- розроблено техніку негладкого пилкоподібного перетворення аргументу у прикладенні до розв'язку періодичних задач теорії пружності для шаруватих композитів;
- розроблено процедуру континуалізації з використанням апроксимації Паде для дискретного рівняння Ферхюльста; чисельно й аналітично доведено наявність хаосу в неперервній моделі.

Дістали подальший розвиток дослідження:

- ефективної теплопровідності композитного матеріалу з циліндричними квадратними включеннями на основі теорії змазки;
- нестационарного теплообміну в композитній мембрані гексагональної структури з круглими включеннями;
- асимптотичного осереднення вищого порядку для динамічних задач системи з неперервними і кусково-неперервними параметрами, дискретної системи, неперервної системи з дискретними елементами;
- моделей континуальної апроксимації одновимірних лінійних хвильових процесів чисельними методами.

### **Практичне значення результатів дослідження**

Результати, висновки і рекомендації дисертаційного дослідження стосовно розроблених асимптотичних моделей композитів та моделей континуальної апроксимації були впроваджені в Науково-дослідному інституті гірничих проблем Академії Інженерних Наук України при розробці низки тематик (АД-464, АД-465, АД-475, АД-476) щодо вирішення актуальних питань енергоефективності України.

Знайдені у роботі розв'язки задач будівельної механіки представлені у вигляді простих аналітичних співвідношень і є доцільними для використання в

інженерній практиці при розрахунках ефективних параметрів широкого класу композитів з різною геометричною структурою та фізичними характеристиками.

Отримані в роботі чисельні оцінки й розрахункові дані доречно використовувати при аналізі достовірності спрощених фізичних моделей та інженерних схем.

Розроблений у загальному вигляді для опису асимптотичних моделей математичний апарат допускає узагальнення і може бути застосований при розрахунках композитів іншої структури.

Асимптотичні вирази ефективних параметрів композитів із включеннями різної форми та умовами контакту фаз стануть у нагоді у фундаментальних і прикладних дослідженнях механіки композитів для оцінки чисельних розв'язків в області граничних значень фізичних і геометричних параметрів композитів.

Моделі континуальної апроксимації варто застосовувати при практичному дослідженні одновимірних лінійних хвильових процесів, зокрема, при проектуванні сейсмічно стійких будівельних конструкцій і споруд.

Побудовані асимптотичні моделі композитів та розроблений для їх опису математичний апарат 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 опубліковані в повному обсязі в українських та зарубіжних наукових виданнях. Основні наукові результати дослідження опубліковані в 36 наукових працях; 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).

Робота пройшла апробацію на 43 українських та міжнародних наукових конференціях, семінарах і конгресах.

За результатами дисертаційного дослідження було зроблено наукову доповідь на онлайн-семінарі «Materialica+ Research Group» (м. Краків, Польща, 20 грудня 2023 р.).

У повному обсязі дисертація доповідалася:

- на засіданні фахового семінару кафедри будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури (м. Дніпро, 29 грудня 2023 р.);
- на міжкафедральному науковому семінарі «Математичне моделювання та оптимізація складних систем» (Український державний хіміко-технологічний університет, м. Дніпро, 29 лютого 2024 р.).

### **Зауваження за змістом дисертаційної роботи**

1) При застосуванні теорії змазки до розв'язання локальної задачі для композитів із круглими циліндричними включеннями (п. 3.2) вираз ефективного параметра знайдено при визначеній умові, що пов'язує

геометричну і фізичну характеристики композиту. Вважаю, що слід було б пояснити математичний і фізичний зміст цієї умови. Чи можливі узагальнення отриманого співвідношення на інші випадки зв'язку розміру включень та їх провідності?

2) При знаходженні двосторонніх оцінок асимптотики ефективного параметра для композита гексагональної структури (п. 3.5) не пояснено, з яких міркувань, і чому саме так, обирається вираз, який перетворюється на Паде-апроксимацію. Вважаю, що доцільним було б також навести остаточний вираз перебудованого співвідношення для ефективного параметра.

3) Вважаю, що при здійсненні аналізу меж застосування розв'язку за  $N$ -ітераційною процедурою методу Шварца та асимптотичній оцінці поправки формули Максвелла (п. 6.5) варто було б на основі чисельних оцінок показати, при яких значеннях фізичних і геометричних параметрів композита  $N$ -ітераційну поправку слід урахувувати в розрахунках, тобто коли її вклад в ефективну провідність структури є суттєвим у порівнянні з формулою Максвелла.

### **Загальний висновок про дисертацію 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 кuartилів ( $Q1$  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 актуальну тему, на високому науковому рівні.

В дисертації досліджено важливу науково-прикладну проблему, що полягає в побудові, математичному описі та обґрунтуванні на фізичному рівні асимптотичних моделей, які ефективно працюють в області граничних значень структурних і фізичних параметрів композитів. Використання строгого математичного апарату дало можливість виконати ґрунтовний аналіз

макроскопічних властивостей композитних матеріалів, зумовлених їхньою гетерогенністю, та знайти аналітичні розв'язки задач будівельної механіки, які мають теоретичне значення і широку сферу практичних застосувань.

За актуальністю теми дослідження, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, науковою новизною результатів, практичним значенням, повнотою викладу матеріалу дисертації в наукових публікаціях, структурою, змістом 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 фізико-математичних наук, професор,  
завідувач кафедри теоретичної  
та комп'ютерної механіки  
Дніпровського національного  
університету імені Олеся Гончара

Володимир ЛОБОДА

*Вчений секретар*



*Тетяна Кудачен*