



офіційного опонента
на дисертацію Дьомічева Костянтина Едуардовича
на тему «Метод дослідження елементів конструкцій з функціонально-неоднорідних матеріалів при великих деформаціях»,
яку подано на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дисертаційного дослідження

Дисертаційна робота присвячена дослідженню поведінки елементів конструкцій з функціонально-неоднорідних матеріалів при великих деформаціях. Функціонально-неоднорідні матеріали або інтелектуальні матеріали широко застосовуються в науці і техніці. Представниками матеріалів такого класу є матеріали із пам'яттю форми або матеріали з властивістю псевдо-пружно-пластичності. Їх фізичні або механічні властивості суттєво відрізняються від характеристик звичайних конструкційних, жароміцних або інструментальних матеріалів та полімерів. Механічна поведінка таких матеріалів в значній мірі залежить від зовнішніх умов (температура, тиск) і передісторії їх зміни.

Нерівномірний нагрів тіл у поєднанні з силовим навантаженням може призводити до появи великих деформацій матеріалу, які викликають нелінійний характер деформування елементів конструкцій.

Для моделювання поведінки елементів конструкцій з функціонально-неоднорідних матеріалів необхідно визначати нестационарний термомеханічний стан тіла не лише на пружній стадії деформування, а й за межею пружності.

Існуючі математичні моделі не враховують нелінійні геометричні співвідношення та не придатні для ефективного використання за наявності великих деформацій матеріалу конструкції в умовах нестационарного навантаження.

Наявні числові методи розв'язання нестационарних задач термомеханіки зводяться, як правило, до розв'язання систем алгебраїчних рівнянь великих розмірів, і тому не завжди є ефективними. Ці обставини суттєво ускладнюють моделювання поведінки конструкцій з функціонально-неоднорідних матеріалів, які працюють під дією нестационарного складного навантаження.

Дослідження останніх років свідчать про те, що перспективними методами для моделювання поведінки елементів конструкцій під дією нестационарного складного навантаження є методи розщеплення і сплайн-колокації, які дозволяють отримувати прийнятні розв'язки як за часом, так і по координатах.

Таким чином, *актуальною є наукова проблема* створення математичних моделей елементів конструкцій з функціонально-неоднорідних матеріалів,

розробка, вдосконалення та застосування методів і засобів комп'ютерного моделювання для дослідження поведінки термочутливих конструкцій з функціонально-неоднорідних матеріалів при великих деформаціях. Обраний підхід до вирішення цієї проблеми ґрунтується на розширенні класу математичних моделей, врахуванню особливостей процесів, що протікають при великих деформаціях, та розробці ефективного методу числового моделювання нестационарних термомеханічних процесів у функціонально-неоднорідних матеріалах.

Представлена дисертаційна робота відповідає переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок (згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 № 942 із змінами і доповненнями, внесеними Постановами КМУ від 24.10.2012 р. № 970, від 23.09.2015 р. № 741 та від 23.08.2016 р. № 556), а саме, пріоритетному тематичному напрямку – «Найважливіші фундаментальні проблеми фізико-математичних і технічних наук», а також відповідає постанові Президії НАНУ від 20.12.13 №179 «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019–2023 рр.», а саме – пп. 1.3.1.1. «Методи розрахунку та дослідження напружено-деформованого стану, у тому числі при наявності дефектів різного походження» та пп. 1.3.1.5. «Механіка взаємодії полів різного походження в матеріалах і елементах конструкцій».

Дисертаційне дослідження виконувалось відповідно до науково-дослідних тем «Створення чисельного методу дослідження міцності елементів конструкцій на основі урахування теплових та мікромеханічних ефектів» (номер державної реєстрації № 0110U002305) та «Методи дослідження міцності елементів конструкцій із функціонально-неоднорідних матеріалів, чутливих до виду термонапруженого стану» (номер державної реєстрації № 0113U000379) у Дніпровському державному технічному університеті.

Ступінь достовірності та обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість та достовірність результатів наведених у дисертації, забезпечується коректністю та строгістю математичних постановок задач у рамках механіки деформівного твердого тіла; застосуванням обґрунтованих числових методів розв'язання поставлених задач; узгодженістю та збігом одержаних розв'язків з відомими в літературі результатами, отриманими за допомогою інших методів; відповідністю результатів і висновків до фізичної суті задач та узгодженістю з експериментальними даними.

Наукова новизна підтверджена пріоритетними вітчизняними та зарубіжними публікаціями.

Наукова новизна одержаних результатів

Розглянуту дисертацію виконано на високому науковому рівні. До найбільш важливих результатів, що визначають наукову новизну роботи та виносяться на захист, варто віднести наступне:

- Розроблено *новий* ефективний метод розв'язання нестационарних просторових задач теорії пластичності у випадку деформування функціонально-неоднорідного матеріалу при великих деформаціях;

- *Вперше запропоновано* й експериментально обґрунтовано нову нелінійну феноменологічну модель поведінки псевдо-пружно-пластичних матеріалів з пам'яттю форми, в якій враховується тепло, що виділяється в процесі фазових переходів у матеріальних точках тіла;

- *Вперше запропоновано* на ділянці діаграми матеріалу близької до ідеальної пластичності застосовувати феноменологічну теорію пластичної течії для матеріалів з майданчиком плинності;

- *Узагальнено* співвідношення теорії пластичності та теорії течії з кінематичним і трансляційним зміцненням на випадок деформування термо-псевдо-пружно-пластичного матеріалу;

- *Запропоновано* (на основі теорії напружених сплайн-функцій) *нові* експериментально підтвержені інтерполяційні формули для описання ділянок діаграми матеріалу при розвантаженні з довільної точки;

- *Поставлено і розв'язано новий* клас задач про нестационарне деформування просторових тіл зі сплавів, що мають властивості пам'яті форми, термо-псевдо-пружно-пластичності при значних деформаціях;

- *Виявлено нові* механічні ефекти, пов'язані з урахуванням локального тепловиділення в процесі фазових перетворень у тілах з псевдо-пружно-пластичних матеріалів;

- *Доведено* збіжність уточненої ітераційної процедури розв'язання нестационарних просторових задач теорії пластичності у випадку деформування функціонально-неоднорідного пластичного матеріалу при великих деформаціях;

- *Вперше* в рамках запропонованого методу врахована можливість зміни форми й розмірів тіла при великих деформаціях.

Отже, всі результати дисертаційної роботи Дьомічева Костянтина Едуардовича «Метод дослідження елементів конструкцій з функціонально-неоднорідних матеріалів при великих деформаціях», що виносяться на захист, є новими і обґрунтованими.

Практична вагомість одержаних результатів полягає в розробці методу числового моделювання процесів деформування в нелінійних просторових тілах з функціонально-неоднорідних матеріалів (зокрема, матеріалів з пам'яттю форми та

псевдо-пружно-пластичних матеріалів) при великих деформаціях в умовах нестационарного навантаження.

Використаний при цьому апроксимаційний апарат двовимірних сплайн-функцій дозволяє з більшою точністю враховувати складні залежності властивостей матеріалів від термо-механічних процесів, які в них відбуваються, а також створювати нові різницеві схеми підвищеної точності.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Дніпровського державного технічного університету при викладанні навчальної дисципліни «Математичне моделювання технологічних процесів», Національного авіаційного університету при викладанні дисциплін «Сучасні комп'ютерні технології в фізиці» та «Методи математичної фізики». Також результати досліджень використані й впроваджені в діяльність ТОВ «LAB01».

Повнота викладення здобувачем результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях

Основні наукові результати дисертації опубліковано у 44 працях, серед яких 2 монографії, 18 статей у наукових фахових виданнях України та зарубіжних наукових періодичних виданнях, що віднесені до інших (відмінних від Web of Science) міжнародних наукометричних баз даних (з яких 3 – одноосібні та 2 статті у періодичних виданнях, що включені до наукометричної бази Scopus), 24 наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дослідження на наукових конференціях, симпозіумах, конгресах. Серед них стаття у науковому журналі «Східно-Європейський журнал передових технологій», індексована у світових наукометричних базах даних і системах, зокрема, у міжнародній наукометричній базі Scopus, Q2 квартал; стаття у науковому журналі «Металофізика та новітні технології» Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, який індексується у міжнародній науко-метричній базі Scopus, Q3 квартал, дві монографії, одинадцять статей у закордонних англомовних фахових виданнях, п'ять статей у наукових фахових виданнях України та 24 тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій. Із представлених публікацій 3 є одноосібними науковими працями дисертанта.

Наведений перелік публікацій та їх зміст відповідають темі дисертації, в повному обсязі відображають її основні положення, наукові результати та висновки, свідчать про їх новизну. Зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертації. В ньому достатньо повно відображені основні положення і висновки дисертації. У дисертації та авторефераті визначено особистий внесок дисертанта для тих друкованих праць, які опубліковано у співавторстві.

Дисертація є завершеною науковою роботою, яку виконано на актуальну тему. Мова дисертації чітка і зрозуміла, наукова термінологія вжита коректно,

матеріал викладено послідовно та логічно. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації становить 346 сторінок машинописного тексту, з них 268 сторінок основного тексту, 26 рисунків, список використаних джерел з 262 найменувань та додатки.

Метою дисертаційної роботи є створення, вдосконалення та подальший розвиток математичних моделей, методів та засобів комп'ютерного моделювання для дослідження поведінки термочутливих елементів конструкцій з функціонально неоднорідних матеріалів при великих деформаціях в умовах нестационарного навантаження з урахуванням нелінійних геометричних співвідношень на основі використання апарату сплайн-функцій, який суттєво підвищує точність обчислень без ускладнення процедури числової реалізації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків.

У *вступі* представлена загальна характеристика роботи і проведено аналіз досліджень зазначеної наукової проблеми; обґрунтована актуальність дисертаційної роботи та її зв'язок із науковими програмами; сформульована мета й завдання дослідження; окреслено новизну отриманих результатів та їх практичне значення; наведено дані про апробацію результатів роботи та публікації її основного змісту, а також особистий внесок здобувача в публікаціях у співавторстві; зроблено короткий опис структури дисертації.

У *першому розділі* проведено аналіз сучасного стану проблеми математичного моделювання поведінки функціонально-неоднорідних матеріалів. Зроблено огляд літературних джерел за темою дисертаційного дослідження. Проведено аналіз існуючих моделей фазових перетворень, які можуть мати місце у функціонально-неоднорідних матеріалах. Проаналізовано критерії, за якими можна класифікувати фазові перетворення в матеріалах.

Розглянуто методи числового розв'язання задач для тіл з псевдо-пружно-пластичних матеріалів. Сформульовано задачі дисертаційного дослідження.

У *другому розділі* наведено повну систему рівнянь та розроблено метод визначення пружно-пластичного нестационарного напружено-деформованого стану трьохвимірних тіл з функціонально-неоднорідних матеріалів при великих деформаціях. Зроблена математична постановка задачі дослідження.

У *третьому розділі* досліджується та розв'язується новий клас задач термомеханіки для функціонально-неоднорідних матеріалів. Розв'язано ряд задач для тіл з псевдо-пружно-пластичного матеріалу при нестационарному навантаженні. Виконано порівняння з відомими результатами. Перший параграф присвячено обробці відомих експериментальних результатів і описанню діаграм напруження – деформація для функціонально-неоднорідних матеріалів як при

активному навантаженні, так і при розвантаженні. У другому параграфі в геометрично нелінійній постановці розглянуто задачу про розповсюдження хвилі фазового переходу в одновимірному стрижні при його розтягуванні.

У *четвертому розділі* проведено розв'язання та ґрунтовний аналіз низки задач нового класу, за результатами розв'язання яких досліджено поведінку елементів конструкцій з функціонально-неоднорідних матеріалів при великих деформаціях (задача про вигин пластини скінченних розмірів за наявності великих пластичних деформацій, задача про локальний вигин тривимірного стрижня прямокутного перерізу за наявності великих пластичних деформацій, задача про поведінку пластини з бічним розрізом при локальному розтягуванні).

У *п'ятому розділі* наведено оцінку точності обчислень та досліджено ефективність розробленого нового методу розв'язання задач термомеханіки елементів конструкцій при значних пластичних деформаціях. Сформульовано та доведено відповідну теорему.

Висновки достатньо повно відображають зміст дисертаційної роботи.

У *додатках* наведені допоміжні результати (апроксимації діаграми матеріалу, деякі експериментальні результати, інше), акти про впровадження результатів у навчальний процес закладів освіти.

Дисертаційна робота відповідає наступним встановленим вимогам:

- Зміст дисертаційної роботи, ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів свідчать, що дисертаційне дослідження К. Е. Дьомічева є завершеною науковою працею, у якій розроблено методологію дослідження поведінки термочутливих елементів конструкцій з функціонально неоднорідних матеріалів при великих деформаціях в умовах нестационарного навантаження з урахуванням нелінійних геометричних співвідношень;

- Дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук щодо актуальності теми дослідження, одержаних нових наукових та практичних результатів, кількості публікацій у наукових фахових вітчизняних та міжнародних виданнях, зазначених у «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України.

- Дисертаційна робота К.Е. Дьомічева відповідає паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

- Результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковано в наукових фахових виданнях та апробовано на міжнародних наукових конференціях, семінарах, симпозіумах.

- Зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертації.

- Структура дисертації, її обсяг і оформлення повністю відповідають всім вимогам Міністерства освіти і науки України та вимогам, зазначеним у «Порядку

присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України.

Зауваження щодо змісту та оформлення дисертаційної роботи:

Мова дисертації чітка і зрозуміла, наукова термінологія вжита коректно, матеріали досліджень, наукові положення, висновки і рекомендації викладено послідовно та логічно, що забезпечує легкість та доступність їх сприйняття. Оформлення дисертації відповідає вимогам встановленим законодавством України.

Поряд з вказаними позитивними рисами дисертаційна робота має ряд недоліків:

1. У другому розділі дисертації при описі моделі матеріалу не наведено опис залежностей термо-пружних характеристик матеріалу від температури у вигляді функцій, не обговорюється, які саме параметри мають таку залежність.
2. З тексту автореферату не зовсім зрозумілим є поняття «метод оцінки меж застосування запропонованих ітераційних методик і розрахункових схем».
3. В розділі 4 дисертації розв'язано ряд нових практичних задач, але не наведено аргументів, як ці задачі обиралися.
4. Потребує уточнення термін «великі пластичні деформації».
5. Незрозуміло чи при застосуванні пакету прикладних програм ABAQUS використовувались стандартні моделі матеріалів, які знаходяться у бібліотеках програмного продукту, чи власноруч створювалась спеціалізована процедура для опису моделі матеріалу.
6. Потребує уточнення формулювання «задача розв'язана за допомогою програми». Не вказано метод, який застосовується – класична інтерполяція чи сплайни, та яке програмне забезпечення використовується.
7. У роботі недостатньо уваги приділено питанню, якими є межі застосування запропонованих у роботі моделей та методів.
8. У тексті роботи наявні стилістичні, орфографічні та друкарські помилки.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Зазначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки представленої роботи, вважаю, що дисертаційна робота Дьомічева Костянтина Едуардовича «Метод дослідження елементів конструкцій з функціонально-неоднорідних матеріалів при великих деформаціях» є логічним, завершеним науковим дослідженням на актуальну тему. Дисертацію виконано на професійному рівні. Вона містить нові науково обґрунтовані результати у галузі сучасного

нелінійного математичного моделювання які в сукупності вирішують важливу науково-прикладну проблему дослідження поведінки термочутливих елементів конструкцій з функціонально неоднорідних матеріалів при великих деформаціях в умовах нестационарного навантаження.

Основні положення і результати дисертації знайшли своє відображення у відкритому друці, пройшли апробацію на міжнародних конференціях, семінарах, симпозиумах. Основний зміст роботи достатньо повно відображено у опублікованих працях. Автореферат та анотація містять основні наукові результати та відповідають всім вимогам МОН України.

Отже, за обсягом проведених наукових досліджень, їх актуальністю, новизною, дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 зі змінами і доповненнями, внесеними Постановою КМУ від 19.08.2015 р. № 656 та від 30.12.2015 р. № 1159, а її автор Дьомічев Костянтин Едуардович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувачка кафедри комп'ютерних технологій
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара

Наталія ГУК

Підпис Гук Н.А. засвідчую

Учений секретар Дніпровського
національного університету імені Олеся Гончара,
кандидат фізико-математичних наук, доцент



Тетяна ХОДАНЕН