



«Затверджую»

Директор Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, академік НАН України, доктор фізико-математичних наук

Роман КУШНІР

«24» червня 2025 р.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Бардин Тетяни Петрівни на тему:

"Оцінювання міцності контактних біметалевих термоперетворювачів засобами математичного і комп'ютерного моделювання",

поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань «11 – Математика та статистика»

за спеціальністю 113 – прикладна математика

Робота заслухана на засіданні розширеного семінару відділу теорії фізико-механічних полів Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України (протокол № 6 від 24 червня 2025 р.), на якому доповідачка виклала основні положення та результати дисертаційної роботи.

ПРИСУТНІ: 14 співробітників ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАНУ та один співробітник Національної академії сухопутних військ імені Петра Сагайдачного, а саме:

академік НАН України, д. ф.-м. н. Р.М. Кушнір;

чл.-кор. НАН України, д. ф.-м. н., В.В. Михаськів;

чл.-кор. НАН України, д. ф.-м. н., Ю.В. Токовий;

науковий керівник семінару д. ф.-м. н., проф. О.Р. Гачкевич;

д. т. н., проф. П.І. Ванкевич;

д. ф.-м. н., с. н. с. Б.М. Калиняк;

д. ф.-м. н., с. н. с. Б.В. Процюк;

д. ф.-м. н., с. н. с. Р.Ф. Терлецький;

д. ф.-м. н., с. н. с. В.А. Шевчук;

к. ф.-м. н., с. н. с. О.М. Вовк;

к. ф.-м. н., с. н. с. Г.Ю. Гарматій;

к. ф.-м. н., с. н. с. М.Г. Івасько;

к. ф.-м. н., с. н. с. Є.М. Ірза;

к. ф.-м. н., с. н. с. Т.В. Козакевич;

к. ф.-м. н., с. н. с. Т.Я. Соляр.

СЛУХАЛИ:

1. Наукову доповідь аспірантки ІППММ ім.Я.С. Підстригача НАН України Бардин Тетяни Петрівни за матеріалами дисертації "Оцінювання міцності контактних біметалевих термоперетворювачів засобами математичного і комп'ютерного моделювання", поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань «11 – Математика та статистика» за спеціальністю «113 – Прикладна математика».

Тему дисертаційної роботи "Оптимізація за напруженнями контактних біметалевих термоперетворювачів" затверджено на засіданні Вченої ради ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України (протокол № 11 від 29 грудня 2020 року). Науковим керівником затверджено д.ф.-м.н., с.н.с. Б.Д. Дробенка. Тему "Оцінювання міцності контактних біметалевих

термоперетворювачів засобами математичного і комп'ютерного моделювання" було перезатверджено на засіданні Вченої ради ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України (протокол № 6 від 17 квітня 2025 року).

2. Запитання до здобувача.

Запитання по темі дисертації ставили: акад. НАН України, д. ф.-м. н. Р.М. Кушнір; чл.-кор. НАН України, д. ф.-м. н. В.В. Михаськів; д. ф.-м. н., проф. О.Г. Гачкевич; д. ф.-м. н., с. н. с. Б.М. Калиняк; д. ф.-м. н., с. н. с. Б.В. Процюк; д. ф.-м. н., ст. н. с. Р.Ф. Терлецький; д. ф.-м. н., с. н. с. В.А. Шевчук, на які Т.П. Бардин дала чіткі та ґрунтовні відповіді, що свідчить про її високий фаховий рівень, знання предмету досліджень та самостійність виконання роботи.

3. Виступи за обговореною роботою.

В обговоренні дисертації взяли участь: акад. НАН України, д. ф.-м. н. Р.М. Кушнір; чл.-кор. НАН України, д. ф.-м. н. В.В. Михаськів; д. ф.-м. н., проф. О.Г. Гачкевич; д. ф.-м. н., с. н. с. Б.М. Калиняк, а також рецензенти д. ф.-м. н., с. н. с. Б.В. Процюк і д. ф.-м. н., с. н. с. Р.Ф. Терлецький, які позитивно оцінили проведені автором дослідження, підкреслили актуальність роботи, її новизну та практичну цінність.

1. Актуальність теми.

Біметалеві термоперетворювачі є одними з найпоширеніших у термометрії, оскільки їхні деформації є вельми інформативними і доволі точними з погляду визначення температури досліджуваних об'єктів за незначних затрат на обслуговування та невисокої вартості. Ними комплектуються сучасні інженерні конструкції у різних галузях промисловості, а також озброєнь та військової техніки. Більшість термометричних біметалевих систем та їх аналогів є кусково-однорідними тілами, що складаються з металів з різними теплофізичними та фізико-механічними характеристиками. Внаслідок цього в них за умов експлуатації можуть виникати значні температурні напруження, які спричиняють розтріскування, порушення зчеплення між окремими складниками, частковий або повний розрив між ними і вихід з ладу основного конструкційного елемента, що забезпечує процес термометрії. З огляду на зазначене, актуальною є проблема підвищення експлуатаційної надійності існуючих біметалевих термоперетворювачів і створення нових, надійніших термометричних систем. І вирішальне значення для оцінювання міцності та допустимих меж надійного функціонування приладів контактної термометрії має дослідження термомеханічних процесів у них за умов їх виготовлення та експлуатації з використанням адекватних засобів математичного і комп'ютерного моделювання.

Дисертаційна робота спрямована на розроблення засобів математичного і комп'ютерного моделювання для дослідження міцності й експлуатаційної надійності контактних біметалевих термоперетворювачів складної форми та структури на основі рівнянь тривимірної термопружності для побудови теоретичних основ раціонального проектування і розробки оптимальних за напруженнями пристроїв термометрії, а також прогнозування їх функціональної здатності та міцнісних характеристик.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертації виконувалися в рамках науково-дослідних тем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України: "Виявлення додаткового ресурсу конструкцій енергетичного машинобудування, озброєнь та військової техніки засобами математичного моделювання" (2021-2023, № держреєстрації 0121U100692); "Моделювання та розвиток методів розрахунку раціонального функціонування конструкційних елементів і систем різного цільового призначення за комплексних навантажень" (2023-2024, № держреєстрації 0123U100908); "Розвиток математичних моделей дослідження

окремих проблем теплоенергетики, управління транспортуванням і зберіганням вуглеводнів" (2024-2025, держ. реєстр. номер 0124U000242)

3. Наукова новизна. У дисертації одержані наступні наукові результати:

1. Розроблено математичну модель для кількісного опису термомеханічних процесів у кусково-однорідних тілах складної форми і структури за термосилового навантаження на основі залежностей тривимірної теорії теплопровідності й термопружності та числову методику розв'язування сформульованих задач математичної фізики з використанням методу скінченних елементів і різницевих алгоритмів.
2. Побудовано на основі запропонованої методики обчислювальний алгоритм та створення відповідного програмного забезпечення для комп'ютерного моделювання процесів деформування термоперетворювачів за умов експлуатації.
3. Уперше досліджено напружено-деформований стан контактних біметалевих термоперетворювачів і захисних оболонок для них у 3D формулюванні.
4. Запропоновано новий клас біметалевих термоперетворювачів, особливості будови яких усувають основну причину виходу з ладу за умов експлуатації – розтріскування чи порушення зчеплення між складниками з різними фізико-механічними характеристиками.
5. Отримано коефіцієнти запасу та оцінки експлуатаційного ресурсу захисних оболонок термоперетворювачів. Визначено граничне значення кількості циклів навантаження-розвантаження до руйнування для різних типорозмірів захисної арматури.
6. Порівняльний аналіз результатів на основі запропонованого в роботі уточненого тривимірного підходу і галузевої нормативної методики з використанням інженерних співвідношень показав, що для найбільш навантаженої захисної оболонки максимальні експлуатаційні напруження відрізняються у півтора рази.

4. Теоретичне та практичне значення результатів дисертації полягає у розробці варіанту методики математичного і числового моделювання зумовлених дією термосилового навантаження процесів теплопровідності та деформування в кусково-однорідних тілах складної форми і структури. Розроблене програмне забезпечення надає можливість адекватного моделювання та дослідження термомеханічної поведінки кусково-однорідних тіл за термосилового навантаження і може бути основою розробки раціональних за напруженнями конкретних елементів конструкцій за різними критеріями, зокрема, з метою забезпечення в них бажаного чи близького до заданого рівня експлуатаційних напружень. Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці біметалевих контактних термоперетворювачів нового типу, яких характеризує вища експлуатаційна надійність у порівнянні з існуючими. Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено 2 актами, які додані до дисертації. Зокрема результати дисертаційної роботи впроваджені в Державному підприємстві «Львівський державний завод «ЛОРТА»» та використані в Національній академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. За допомогою розробленого програмного забезпечення встановлено температурні діапазони безпечної експлуатації термоперетворювачів нового типу та коефіцієнти запасу для кожного типу і розміру їхньої захисної арматури. На підставі виконаних обчислювальних експериментів для захисних оболонок різних типорозмірів зроблено висновок про можливу їхню безпечну експлуатацію на номінальних режимах експлуатації за задовільного стану металу, відсутності недопустимих дефектів і відповідності результатів контролю металу вимогам нормативних документів і стандартів.

5. Публікації та висновок про особистий внесок здобувача в отримання наукових результатів та в працях, написаних у співавторстві. За темою дисертації опубліковано 13 наукових праць. Серед них одна стаття опублікована у виданні, індексованому в міжнародній

науково-метричній базі Scopus [1], 3 статті у фахових наукових виданнях [2-4], 2 патенти на корисну модель [5, 6]. Результати дисертації додатково відображено в семи тезах доповідей на міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференціях [7-13].

1. Drobenko B.D., **Bardyn T.P.** Strength of the Welded Joint of the Connecting Pipe and the Collector of the Boiler Primary Steam Superheater. *Mater Sci* **59**, 2023, 335–339. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00782-x>.
2. **Бардин Т.П.**, Дробенко Б.Д. Температурні напруження в біметалевих контактних термоперетворювачах під час їхньої експлуатації. *Прикл. проблеми мех. і мат.*, 2023. <https://doi.org/10.15407/apmm2023.21.30-42>. <http://journals.iapmm.lviv.ua/ojs/index.php/APMM/article/view/apmm2023.21.30-42>.
3. Дробенко Б.Д., **Бардин Т.П.** Міцність та експлуатаційна надійність біметалевих контактних термоперетворювачів. *Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології*, 2023. Вип. 38. С. 99-112. <https://doi.org/10.15407/fmmit2023.38.099>. <http://www.fmmit.lviv.ua/index.php/fmmit/article/view/342/302>.
4. **Бардин Т.П.**, Дробенко Б.Д. Рівняння нестационарної задачі теплопровідності конструктивного вузла термометричного пристрою систем озброєння та військової техніки. *Збірник наукових праць Військової академії*. Одеса : Військова академія, 2023. №2(20). С. 101–107. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.20.101-107>.
5. **Бардин Т.П.**, Настишин Ю.А., Дробенко Б.Д. Термочутливий елемент: *патент на корисну модель* № 119339. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.09.2017, Бюл. № 18. Заявка № u2017 02496 від 17.03.2017.
6. **Бардин Т.П.**, Яковлев М.Ю., Дробенко Б.Д. Термочутливий елемент: *патент на корисну модель* № 119343. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.09.2017, Бюл. № 18. Заявка № u2017 0567 від 20.03.2017.
7. **Бардин Т.**, Дробенко Б. Комп'ютерне моделювання процесів деформування біметалевих контактних термоперетворювачів. *Математичні проблеми механіки неоднорідних структур*: зб. наук. праць 11-ї Міжн. наук. конф. / за заг. ред. Р.М. Кушніра і Ю.В. Токового. Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, 2024. Вип. 6. 37-38.
8. **Бардин Т.П.**, Дробенко Б.Д. Вимоги до математичної моделі нестационарної задачі теплопровідності конструктивного вузла термометричного пристрою систем озброєння та військової техніки. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: збірка тез доповідей науково-практичної конф., м. Львів, 31 листопада 2023 р. Львів : НАСВ, 2023. С. 119.
9. **Бардин Т.П.**, Дробенко Б.Д. Напружено-деформований стан контактних біметалевих термоперетворювачів. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: зб. тез доп. наук.-практ. конф. 17 листопада 2022 року. Львів: НАСВ, 2022. С. 286.
10. **Бардин Т.П.**, Дробенко Б.Д. Обґрунтування вибору конструктивної схеми вузла площинного термоперетворювача та постановка задачі розрахунку його термометричних параметрів. *Сучасні проблеми термомеханіки–2021*: зб. наук. праць Міжн. наук. конф. та міні-симпозіумів / за заг. ред. Р.М. Кушніра і Ю.В. Токового. Львів : Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, 2021. С. 39-40.
11. **Бардин Т.П.**, Дробенко Б.Д. Обґрунтування вибору матеріалів для конструктивних елементів механічних контактних термометрів систем озброєння та військової техніки. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: зб. тез доп. Міжн. наук.-техн. конф. (м. Львів, 17-18 травня 2023 р.). Львів : НАСВ, 2023. С. 15-16.
12. **Бардин Т.П.**, Дробенко Б.Д. Оптимізація зварного з'єднання штуцера і колектора. *Сучасні проблеми механіки та математики – 2023*: зб. наук. праць / за заг. ред. акад.

НАН України Р.М. Кушніра та чл.-кор. НАН України В.О. Пелиха. Львів : Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, 2023. С.109.

13. **Бардин Т.П.**, Дробенко Б.Д. Розрахунок термопружних характеристик біметалевого термочутливого елемента систем озброєння та військової техніки. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: зб. тез доп. наук.-практ. конф. 28-29 листопада 2024 року. Львів: НАСВ, 2024. С. 331.

Усі результати, що становлять основний зміст дисертації, отримані здобувачем самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, їй належить аналіз літературних джерел, в яких розглянуто питання, споріднені з напрямом досліджень дисертаційної роботи, формулювання задач, розробка і обґрунтування математичної й числової моделі і відповідного програмного забезпечення, виконання обчислювальних експериментів та інтерпретація отриманих результатів. Зокрема, у праці [1] розроблене в дисертаційній роботі математичне і програмне забезпечення пройшло апробацію на вирішенні нагальної практичної проблеми; наведено результати експертного аналізу міцності вузла зварного з'єднання штуцера і колектора, яке зазнало руйнування на Бурштинській ТЕС.

У роботі [2] сформульовано тривимірну математичну модель для кількісного опису процесів теплопровідності та деформування в кусково-однорідних термоперетворювачах складної форми і структури за інтенсивного термосилового навантаження; розроблено методику розв'язування сформульованої задачі на основі методу скінченних елементів (для апроксимації шуканих параметрів за просторовими змінними) та однокрокових багато-параметричних різницевого алгоритмів (для апроксимації параметрів за часом); досліджено міцність однієї із запропонованих нових конструкцій термоперетворювача. Встановлено, що розглядуваний тип термоперетворювач зберігає свою цілісність до температур порядку 760°C.

У праці [3] досліджена міцність та експлуатаційна надійність нових конструкцій біметалевих контактних термоперетворювачів іншого типу засобами розробленого комп'ютерного моделювання, розробленими на основі тривимірної термопружності. Встановлено, що розглядуваний тип термоперетворювач зберігає свою цілісність до температур порядку 850°C.

У статті [4] здобувачкою побудовано математичну модель і методику розв'язування нестационарної задачі теплопровідності для вузла термометричного пристрою систем озброєння та військової техніки складної форми. Отримані розрахункові залежності є основою для числового моделювання процесів теплопровідності в біметалевих термоперетворювачах різних конструкційних форм та типорозмірів.

У працях [5, 6] запропоновано нові типи біметалевих контактних термоперетворювачів, конструкційні рішення в яких уможливили усунення основної причини виходу з ладу стандартних біметалевих контактних перетворювачів – порушення зчеплення між окремими складниками термоперетворювача при циклічному високотемпературному навантаженні, внаслідок чого відбувається часткове розшарування або повний розрив між ними. Аби уникнути швидкого виходу з ладу біметалевого термоперетворювача, запропоновано таку його конструкцію, за якої складник з більшим коефіцієнтом лінійного температурного розширення виконаний із окремих сегментів, а інший – на одній із бокових сторін містить бурти. За такої будови сегменти складника з більшим коефіцієнтом лінійного температурного розширення встановлені між буртами складника з меншим. Для пом'якшення контакту між складниками передбачено проміжки, які усувають тертя між ними, що збільшує надійність та роботоздатність термоперетворювача за довготривалого циклічного теплового навантаження.

6. Дотримання принципів академічної доброчесності. Дисертація Бардин Т.П. є оригінальною роботою. Вона виконана здобувачкою самостійно і доброчесно. Текст

рукопису не містить ознак академічного шахрайства. Роботу передано експерту для проведення науково-технічної експертизи щодо збігів із Інтернет-джерелами.

7. Дисертаційна робота Бардин Т.П. "Оцінювання міцності контактних біметалевих термоперетворювачів засобами математичного і комп'ютерного моделювання", яка подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, та відповідає напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України зі спеціальності 113 – Прикладна математика.

РЕКОМЕНДУВАЛИ:

1. Дисертаційну роботу "Оцінювання міцності контактних біметалевих термоперетворювачів засобами математичного і комп'ютерного моделювання", подану Бардин Тетяни Петрівни на здобуття ступеня доктора філософії, до захисту.
2. Головою спеціалізованої вченої ради призначити:
 - д.ф.-м.н., старшого наукового співробітника Калиняка Богдана Миколайовича, провідного наукового співробітника відділу механіки деформівного твердого тіла Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України.

Опонентами призначити:

- д.ф.-м.н., професора Дияка Івана Івановича, декана факультету прикладної математики та інформатики Львівського національного університету ім. Івана Франка;
- д.ф.-м.н., професора Мусія Романа Степановича, професора кафедри вищої математики, Інститут прикладної математики та фундаментальних наук Національного університету «Львівська політехніка».

Рецензентами призначити:

- д.ф.-м.н., старшого наукового співробітника Процюка Бориса Васильовича, провідного наукового співробітника відділу термомеханіки Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України;
- д.ф.-м.н., старшого наукового співробітника Терлецького Ростислава Федоровича, провідного наукового співробітника відділу теорії фізико-механічних полів Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України.

Головуючий на засіданні:

д. ф.-м. н., проф., головний науковий співробітник
відділу теорії фізико-механічних полів
Інституту прикладних проблем механіки і
математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

Олександр ГАЧКЕВИЧ

