

З КАФЕДРИ ПРЕЗИДІЇ НАН УКРАЇНИ



КУШНІР

Роман Михайлович – член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, директор Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ В ТЕРМОМЕХАНІЦІ НЕОДНОРІДНИХ ТІЛ

**За матеріалами наукової доповіді
на засіданні Президії НАН України
18 червня 2014 року**

Висвітлено результати теоретичних і прикладних досліджень з термомеханіки неоднорідних тіл, отримані впродовж останніх двох десятиліть науковцями Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. Значну увагу приділено їх практичному використанню, опублікуванню в наукових журналах і монографіях та презентації на міжнародних конференціях.

Ключові слова: термомеханіка, взаємозв'язані процеси різної фізичної природи, структурно неоднорідні тіла.

Вступ

Інтенсивний розвиток досліджень у галузі термомеханіки твердих деформівних тіл наприкінці 50-х років минулого століття в Україні, як і в усьому світі, був спричинений, передусім, нагальними потребами промисловості, зокрема теплоенергетики, літако- і ракетобудування, електроніки та ін., оскільки створювані нові прилади й елементи конструкцій у процесі їх виготовлення і функціонування зазнавали дії значних теплових та електромагнітних навантажень. Основні здобутки в цій науковій галузі в Україні пов'язані насамперед з фундаментальними і прикладними результатами представників наукових шкіл академіків АН України Анатолія Дмитровича Коваленка з Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка АН УРСР і Ярослава Степановича Підстригача, який починав такі дослідження у Львові спочатку у Фізико-механічному інституті АН УРСР, а потім продовжив у вже створеному ним Інституті прикладних проблем механіки і математики НАН України, який зараз но-

силь його ім'я. Ці два видатні українські вчені-механіки разом із академіком Польської академії наук Вітольдом Новацьким сформували основну теоретичну базу для проведення широких досліджень з механіки взаємозв'язаних процесів різної природи [1–6].

Далі основну увагу зосередимо на доробку представників наукової школи академіка Я.С. Підстригача. У 60–90-х роках минулого століття ним, разом зі своїми учнями й колегами, зокрема докторами наук, професорами Я.Й. Бураком і Г.С. Кітом (згодом членами-кореспондентами НАН України), В.М. Вігаком, Ю.М. Коляном, Б.Л. Пелехом і Г.В. Пляцком, було видано основні монографії з термомеханіки неоднорідних тіл, запроваджено у народногосподарську практику низку прикладних розробок для різних підприємств приладо- і машинобудування, про вагомість яких свідчить присудження їм у складі авторських колективів двох Державних премій України в галузі науки і техніки у 1975 і 1981 рр., двох премій імені М.М. Крилова НАН України у 1978 і 1999 рр. та двох премій імені О.М. Динника у 1987 і 1991 рр. І, найголовніше, вони змогли відшукати десятки здібних молодих людей і передати їм свої наукові знання та прагнення наполегливо працювати для отримання нових сучасних результатів у науці. Нині наукова школа академіка Я.С. Підстригача продовжує активно працювати: лише в Інституті та його Центрі математичного моделювання за цим науковим напрямом її представляють 15 докторів і близько 40 кандидатів наук.

Розвиток фундаментальних досліджень з термомеханіки неоднорідних тіл у науковій школі Я.С. Підстригача

Сформовані нашими вчителями основні напрями досліджень дозволили впродовж останніх двох десятиріч отримати низку вагомих теоретичних і прикладних результатів у термомеханіці неоднорідних електропровідних тіл [7], зокрема з математичного і термодинамічного моделювання взаємозв'язаних процесів різної природи в структурно неоднорідних тілах —



Академік Я.С. Підстригач (у центрі) з учнями і колегами (зліва направо): Я.Й. Бураком, Ю.М. Коляном, Г.В. Пляцком та Б.Л. Пелехом. 1979 р.

нового наукового напрямку фундаментальних досліджень. Серед них слід виокремити такі:

- запропоновано варіант теорії механотермоелектродифузії для тіл, здатних до намагнічування та поляризації за дії зовнішнього електромагнітного поля;
- здійснено постановки нових лінійних і нелінійних контактних-крайових задач теплопереносу та термопружності для опромінюваних шаруватих пластин за різних комбінацій радіаційних властивостей складників і розроблено методику їх розв'язування;
- розроблено й апробовано низку аналітично-чисельних методик визначення температурних полів та оригінальний варіант методу збурень для знаходження спричиненого ними квазістатичного напружено-деформованого стану термочутливих тіл, які перебувають в умовах складного теплообміну з довкіллям за дії силових навантажень;
- створено ефективний метод визначення нестационарних температурних полів і спричинених ними термонапружень у неоднорідних і термочутливих елементах конструкцій канонічної форми за неповної інформації про теплове навантаження внаслідок наявних технологічних обмежень, який ґрунтується на формулюванні оберненої задачі термопружності;
- сформульовано і, зведенням до обернених задач термомеханіки, розв'язано одно- та двовимірні задачі оптимального за швидкістю

керування нагріванням термочутливих тіл за обмежень на функцію керування (температура гріючого середовища, тепловий потік на поверхні тіла) та максимальне значення інтенсивності дотичних напружень або накопиченої пластичної деформації.

У розвинутих під керівництвом д-ра фіз.-мат. наук, проф. О.Р. Гачкевича варіантах термомеханіки багатокомпонентних тіл низької електропровідності та механотермодифузії в частково прозорих тілах об'єктом дослідження є неметалічні тверді тіла з домішками (зокрема, газовими). Це тверді суміші з двох або більшого числа компонент, які характеризуються поляризацією компонент і низькою провідністю ($\sigma < 10^2$ См/м). Такі тіла низької електропровідності (ТНЕ) можуть перебувати за дії механічних, теплових, дифузійних і електромагнітних навантажень (зокрема, квазіусталеного електромагнітного випромінювання від радіо- ($< 10^{11}$ Гц) до світлових ($10^{11} - 10^{15}$ Гц) частот). Вивчаються електромагнітні, теплові, механічні, дифузійні процеси, які описуються відповідними параметрами: характеристиками електромагнітного випромінювання і напруженого стану, температурою та концентраціями компонент. Запропоновані теорії можуть бути застосовані для розрахунку режимів оброблення тіл низької електропровідності високочастотним, надвисокочастотним, тепловим і лазерним електромагнітним випромінюванням, зокрема, з метою інтенсифікації дифузійних процесів (при дегазації, сушінні, очищенні від домішок, нанесенні зміцнювальних покриттів, легуванні тощо).

У рамках запропонованих варіантів теорій д-р фіз.-мат. наук Р.Ф. Терлецький разом з учнями отримав розв'язки нових практично важливих задач механотермодифузії для шару з газовими домішками. Зокрема, за однобічного його опромінення надвисокочастотною ТЕМ-хвилею (плоскою поперечною електромагнітною хвилею) одержано:

- вигляд розподілів тепловиділень, температури й напружень у шарі та їх рівнів залежно від співвідношення між довжиною електромагнітної хвилі та товщиною шару;

- залежність швидкості дифузії газових домішок від їх поляризаційних характеристик та параметрів ТЕМ-хвилі;

- глибинний характер стимуляції дифузії газових домішок у шарі (зокрема, води в околах обох основ шару);

- зростання максимальних рівнів розтягвальних напружень у шарі зі зменшенням довжини хвилі НВЧ-опромінення.

Запропонована математична модель термомеханічної поведінки термочутливого тіла враховує залежність теплофізичних (коефіцієнтів теплопровідності та об'ємної теплоємності) і механічних (модуля Юнга, коефіцієнтів Пуассона і коефіцієнта температурного розширення) характеристик матеріалу від температури. У цьому випадку як рівняння теплопровідності, так і граничні умови на поверхні, що обмежує тіло, які моделюють складний (конвективно-променевий) теплообмін із середовищами з високими чи низькими температурами, є суттєво нелінійними. У свою чергу, фізичні співвідношення Дюгамеля — Неймана та система розв'язувальних диференціальних рівнянь руху термочутливого тіла в переміщеннях мають змінні коефіцієнти. Усе це зумовлює необхідність розроблення ефективних методик визначення температурних полів. Під керівництвом д-ра техн. наук, проф. В.С. Поповича розроблено й апробовано низку аналітично-чисельних методик — поетапної лінеаризації, лінеаризуючих параметрів, сплайн-апроксимацій та послідовних наближень. Для знаходження спричиненого ними квазістатичного напружено-деформованого стану такого термочутливого тіла запропоновано, зокрема, оригінальний варіант методу збурень.

Дослідження термомеханічної поведінки багатьох елементів і вузлів сучасного енергетичного обладнання (трубопроводів теплових і атомних електростанцій), авіаційних та ракетних двигунів, технологічного устаткування, різних трибосистем за реальних умов їх роботи та натурних випробовувань суттєво ускладнюється внаслідок відсутності повної інформації про їх теплове навантаження через неможливість безпосереднього доступу до частини граничної

поверхні. Оснащення елементів і вузлів додатковими давачами, розташованими всередині, є, як правило, неможливим або небажаним з огляду на технологічні, конструктивні чи методичні причини (порушення цілісності та властивостей матеріалу, спотворення реальних температур і напружень, труднощі із забезпеченням надійного їх контакту всередині матеріалу).

Задачі такого типу недоозначені, і здебільшого єдино можливим підходом до їх розв'язання є використання моделей і методів обернених задач (або неklasичних крайових задач), які можна сформулювати на основі додаткової інформації про поведінку деяких параметрів процесу на доступній для проведення експериментальних вимірювань частині граничної поверхні. Зокрема, якщо для двохшарового порожнистого циліндра відоме його зовнішнє теплове навантаження (наприклад, температури нагріву граничних поверхонь $t_1(\tau)$, $t_2(\tau)$), то знаходження його теплового і термонапруженого станів зводиться до розв'язування відповідної прямої задачі термопружності. Якщо через певні причини теплове навантаження на одній із граничних поверхонь невідоме, наприклад температура внутрішньої граничної поверхні $t_1(\tau)$, то вихідна задача термопружності є недоозначеною і для її розв'язання потрібно використати додаткову інформацію на доступній для проведення відповідних вимірювань частині граничної поверхні, скажімо, про поведінку в часі радіальних переміщень зовнішньої граничної поверхні циліндра. Тоді, з урахуванням зв'язності полів температури та переміщень, задачу визначення цієї невідомої температури $t_1(\tau)$ можна звести до оберненої задачі термопружності, яка описується інтегральним рівнянням Вольгерри першого роду. Такий, розроблений д-ром фіз.-мат. наук А.В. Ясінським, підхід, як показують експериментальні дослідження, дає змогу істотно підвищити ефективність розв'язання сформульованих задач цього класу.

Актуальною як з погляду застосувань, так і в теоретичному плані є також проблема розроблення методів побудови розв'язків суміжного класу обернених задач термомеханіки — опти-

мального за швидкодією керування нестационарними температурними режимами тіла за обмежень на функцію керування (температуру гріючого середовища, тепловий потік) та параметри теплового і термонапруженого станів. У зв'язку з цим у межах теорії неізотермічних пружно-пластичних процесів деформування елементів тіла за траєкторіями малої кривини, розробленої в працях академіка НАН України Ю.М. Шевченка та його учнів, сформульовано і, шляхом зведення до обернених задач термомеханіки, д-ром фіз.-мат. наук А.В. Ясінським розв'язано одно- та двовимірні задачі оптимального за швидкодією керування нагріванням термочутливих твердих тіл за обмежень на функцію керування і максимальне значення інтенсивності дотичних напружень або накопиченої пластичної деформації зсуву. Для побудови розв'язку сформульованих задач оптимізації розвинуто (на випадок пружно-пластичного деформування тіла) запропонований Я.С. Підстригачем та його учнем, професором В.М. Вігаком підхід, згідно з яким оптимальне за швидкодією керування приймається таким, що дорівнює гранично допустимому обмеженню або забезпечує рівність обмежуваного параметра його гранично допустимій величині. Внаслідок цього вихідна задача оптимізації зводиться до розв'язання послідовності прямих і обернених задач термопластичності. Зауважимо, що розв'язки таких задач є важливими щодо мінімізації енергетичних затрат технологічних процесів, пов'язаних з термічним обробленням елементів конструкцій, зокрема в металургійній та машинобудівній галузях промисловості, а також оптимізації перехідних режимів експлуатації відповідальних деталей і вузлів теплоенергообладнання.

Практичне використання результатів досліджень

Розглянутий напрям досліджень досить повно відображувався у науково-дослідних темах Інституту за цільовими програмами Відділення математики НАН України у період з 2007 р. по сьогодні. Отримані результати таких цілеспря-

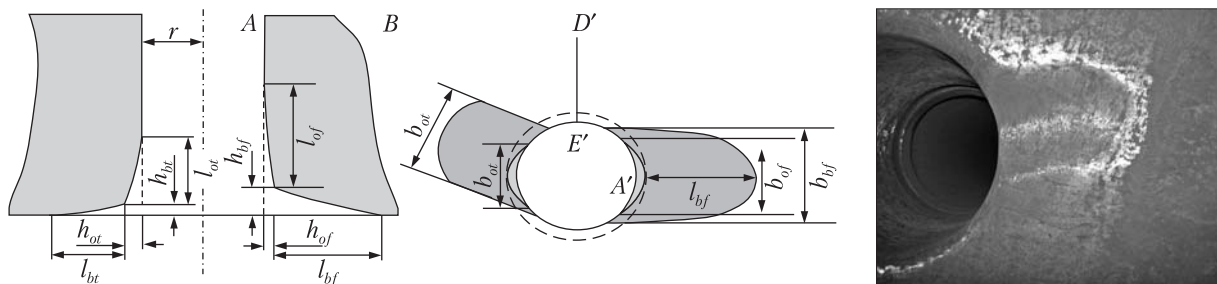


Схема для моделювання і реальний вигляд ремонтних вибірок барабана котла Бурштинської ТЕС

мованих фундаментальних досліджень стали основою для формування науково-технічних та інноваційних проектів, господарських договорів, а також проектів за загальноакадемічною програмою прикладних досліджень «Ресурс», програмою спільних проектів НАН України та УНГЦ.

Зокрема, на основі загальних співвідношень нелінійної термомеханіки, з використанням сучасних чисельних методів і відповідного програмного забезпечення запропоновано підхід до визначення напружено-деформованого стану функціонуючих елементів котлоагрегатів та дослідження можливості їх подальшої експлуатації. При виконанні науково-технічного проекту «Моделювання, розрахунок та оптимізація ремонтних вибірок барабана котла Бурштинської ТЕС» д-р фіз.-мат. наук Б.Д. Дробенко розробив методику дослідження напружено-деформованого стану діючих елементів енергетичного обладнання (барабанів котлів високого тиску, колекторів первинного пароперегрівача котла, штуцерів барабанів котлів та екранних труб) з ремонтними вибірками дефектів та пошкодженнями за різних режимів їх експлуатації з метою оцінювання ресурсу цих структур (схему для моделювання таких вибірок та їх реальний вигляд наведено на рисунку).

На цій основі досліджено напружено-деформований стан барабанів котлоагрегатів блоків № 5 Бурштинської та № 6 Добротвірської ТЕС, які вичерпали свій парковий ресурс. За результатами виконаних досліджень зроблено висновок про можливе подовження термінів експлуатації розглянутих барабанів понад регламент-

ний термін. Отримані результати апробовано і впроваджено при розробленні технології виконання ремонтних робіт у конкретних елементах енергообладнання Бурштинської ТЕС, що дає можливість не допустити їх руйнування.

У співпраці з науковцями інститутів НАН України – електрозварювання ім. Є.О. Патона, фізико-механічного ім. Г.В. Карпенка та проблем міцності ім. Г.С. Писаренка – проведено прикладні дослідження щодо створення нових технологій і приладів у галузі сучасного матеріалознавства, розроблення методів оцінювання міцності та надійності елементів конструкцій у рамках проектів загальноакадемічної програми «Ресурс». Зокрема, розроблено методику оптимізації експлуатаційних параметрів нафтопроводів для забезпечення їх заданого ресурсу з урахуванням дефектності труб і впливу зовнішніх чинників (спільно з ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України).

Останнім часом відновлено виконання науково-дослідних робіт учених Інституту в інтересах ДП КБ «Південне» згідно з Програмою співробітництва цього підприємства з установами НАН України.

Презентація результатів досліджень в Україні та за її межами, міжнародна співпраця

З метою широкого ознайомлення наукової громадськості з отриманими результатами теоретичного і прикладного характеру за цим пріоритетним для Інституту науковим напрямом здійснюються такі заходи:

- тематика наукових досліджень широко подається у науковому журналі Інституту «Математичні методи та фізико-механічні поля» (видається з 1975 р., в 2009 р. відновлено його переклад у видавництві Springer) та щорічному збірнику наукових праць «Прикладні проблеми механіки і математики»;

- результати науковців Інституту постійно висвітлюються у провідних міжнародних наукових журналах, зокрема в Journal of Thermal Stresses, Journal of Engineering Mathematics та Journal of Heat & Mass Transfer;

- упродовж 2000–2013 рр. видано понад 20 монографій, зокрема узагальнююче 5-томне видання «Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл» [7], захищено 15 докторських і понад 30 кандидатських дисертацій;

- Інститут з 1983 р. регулярно організовує міжнародну наукову конференцію «Математичні проблеми механіки неоднорідних структур» (чергова, вже 9-та, відбулася у Львові у вересні 2014 р.), на якій повноцінно репрезентуються нові результати співробітників Інституту за цим науковим напрямом;

- забезпечується постійна участь науковців Інституту в роботі міжнародних конгресів з температурних напружень, що проводяться з 1995 р. кожні два роки по чергово у країнах Північної Америки (США і Канаді), Азії (Японії, Тайвані і Китаї) та Європи (Польщі, Австрії та Угорщині);

- співробітниками Інституту сформовано цикли праць, які відзначені Державною премією України в галузі науки і техніки за 2011 р. та двома преміями імені М.О. Лаврентьєва НАН України за 2003 і 2013 рр.

Учені Інституту налагодили тісні наукові контакти за цим науковим напрямом з представниками провідних наукових осередків у Білорусі, Вірменії, Грузії, Італії, Китаї, Польщі, Росії, США, Тайвані та Японії. Співпраця реалізується через спільні наукові проекти, зокрема за програмами спільних досліджень НАН України з Російським ФФД і СВ РАН, Державним ФФД України з Білоруським РФФД і Російським ФФД.

Інститут став ініціатором і координатором підготовки оглядових статей від науковців Дніпропетровська, Донецька, Києва, Львова і Луцька, а також Москви і Новосибірська до 11-томної «Енциклопедії з температурних напружень» (головний редактор — Річард Гетнарський, США) [8], опублікованої у видавництві Springer наприкінці 2013 р.

Заклучні зауваження

Перспективними напрямками забезпечення проведення досліджень за розглянутою тематикою, на нашу думку, є такі:

- по-перше, подальший розвиток фундаментальних і прикладних досліджень за цим пріоритетним напрямом діяльності Інституту і утвердження наукової школи академіка Я.С. Підстригача і зміцнення її наукового потенціалу;

- по-друге, розширення співпраці з академічними установами технологічного профілю та проектно-конструкторськими організаціями України з метою підготовки і реалізації проектів для впровадження теоретичних результатів Інституту в атомну і теплову енергетику, приладо-, літако- і ракетобудування;

- по-третє, зміцнення міжнародних наукових зв'язків, опублікування наукових результатів у престижних міжнародних наукових журналах, участь в основних за пріоритетною тематикою міжнародних конференціях та їх проведення з метою залучення науковців Інституту до спільних міжнародних грантів і проектів;

- по-четверте, видання в Україні та за кордоном монографій з термомеханіки структурно неоднорідних тіл за комплексного теплового, силового та електромагнітного навантажень і аналітично-чисельних методів розв'язування відповідних крайових задач.

Автор висловлює щирю подяку співробітникам Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, докторам наук, професорам О.Р. Гачкевичу і В.С. Поповичу за допомогу при підготовці цієї наукової доповіді.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коваленко А.Д. Введение в термоупругость. — К.: Наук. думка, 1965. — 204 с.
2. Коваленко А.Д. Избранные труды. — К.: Наук. думка, 1976. — 762 с.
3. Новацкий В. Вопросы термоупругости. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 364 с.
4. Новацкий В. Теория упругости. — М.: Мир, 1975. — 872 с.
5. Підстригач Я.С., Ярема С.Я. Температурні напруження в оболонках. — К.: Вид-во АН УРСР, 1961. — 212 с.
6. Підстригач Я.С. Вибрані праці. — К.: Наук. думка, 1995. — 459 с.
7. Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл: в 5 т. / за заг. ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра.
 Т. 1: Термомеханіка багатокомпонентних тіл низької провідності / Я.Й. Бурак, О.Р. Гачкевич, Р.Ф. Терлецький. — Львів: СПОЛОМ, 2006. — 300 с.;
 Т. 2: Механотермодифузія в частково прозорих тілах / О.Р. Гачкевич, Р.Ф. Терлецький, Т.Л. Курницький. — Львів: СПОЛОМ, 2007. — 184 с.;
 Т. 3: Термопружність термочутливих тіл / Р.М. Кушнір, В.С. Попович. — Львів: СПОЛОМ, 2009. — 412 с.;
 Т. 4: Термомеханіка намагнечуваних електропровідних термочутливих тіл / О.Р. Гачкевич, Б.Д. Дробенко. — Львів: СПОЛОМ, 2010. — 256 с.;
 Т. 5: Оптимізація та ідентифікація в термомеханіці неоднорідних тіл / Р.М. Кушнір, В.С. Попович, А.В. Ясінський. — Львів: СПОЛОМ, 2011. — 256 с.
8. Kushnir R.M., Tokosyu Yu.V. Encyclopedia of Thermal Stresses // Mat. методи і фіз.-мех. поля. — 2013. — Т. 56, № 4. — С. 163—170.

Р.М. Кушнір

Институт прикладных проблем механики и математики
 им. Я.С. Пидстригача НАН Украины
 ул. Научная, 3б, Львов, 79060, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
 В ТЕРМОМЕХАНИКЕ НЕОДНОРОДНЫХ ТЕЛ

Освещены результаты теоретических и прикладных исследований по термомеханике неоднородных тел, полученные на протяжении последних двух десятилетий учеными Института прикладных проблем механики и математики им. Я.С. Пидстригача НАН Украины. Значительное внимание уделено их практическому использованию, опубликованию в научных журналах и монографиях, а также презентации на международных конференциях.

Ключевые слова: термомеханика, взаимосвязанные процессы различной физической природы, структурно неоднородные тела.

R.M. Kushnir

Pidstryhach Institute for Applied Problems
 of Mechanics and Mathematics of NAS of Ukraine
 3b Naukova St., L'viv, 79060, Ukraine

MODELING AND OPTIMIZATION
 IN THE THERMOMECHANICS OF INHOMOGENEOUS SOLIDS

The results of theoretical and applied research in the thermomechanics of inhomogeneous solids, which were achieved by the scientists of the Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of NAS of Ukraine during two latter decades, are presented. The special attention is given to their practical implementation, publication in the scientific journals and monographs worldwide, and presentation on international conferences.

Keywords: thermomechanics, coupled processes of different physical nature, structurally-inhomogeneous solids.