

УДК 539.3

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В КУСКОВО-ОДНОРІДНИХ ТІЛАХ ЗА ТЕПЛООВОГО ОПРОМІНЕННЯ

Олександр Гачкевич, Орест Гуменчук, Анджей Маринович, Ростислав Терлецький

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів;
Політехніка Опольська, м.Ополе

Широкі застосування функціональних та конструкційних шаруватих елементів з частково прозорих для теплового випромінювання матеріалів в різноманітних приладах та обладнанні спричинює необхідність дослідження їх термомеханічної поведінки як при виготовленні з використанням технологічного чинника нагріву – теплового опромінення, так і експлуатації за дії такого опромінення. При опроміненні внаслідок поглинання складниками енергії випромінювання в елементах конструкцій можуть протікати взаємозв'язані теплові і механічні процеси [2, 6, 10, 11]. Так як частково прозорі матеріали в переважній більшості з огляду на механічні властивості належать до крихких (для яких залежність між напруженнями та деформаціями практично до руйнування визначається за законом Гука), то вже при відносно невеликих інтенсивностях зовнішнього опромінення напруження, що виникають, можуть перевищувати допустимі та суттєво впливати на міцнісні та функціональні параметри конкретних елементів та виробів в цілому. Оптимізація термомеханічної поведінки таких тіл при їх термообробці дає змогу зменшити енергозатрати, час нагріву, рівень максимальних напружень та вплинути на інші параметри технологічних процесів [1, 5, 7].

В роботі запропоновано модель опису термомеханічних процесів в пружних кусково-однорідних тілах (в загальному із складниками різної прозорості) за сторонніх впливів (теплове опромінення, конвективний теплообмін і т.п.) та різні підходи оптимізації розглядуваних процесів. Такі підходи є розвитком існуючих в напрямку застосування до ширшого класу оптимізаційних задач (узгальнення критеріїв оптимізації, обмежень на параметри термомеханічних процесів, розширення модельних представлень шляхом збільшення параметрів стану чи розглядуваних процесів і явищ і т.п.) [4, 5, 7].

В основу опису термомеханічної поведінки тіл, що розглядаються, за теплового опромінення в умовах теплообміну із зовнішнім середовищем, зокрема, конвективного, покладено співвідношення феноменологічної теорії випромінювання в наближенні невипромінюючого матеріалу та квазістатичної термомеханіки [8, 9]. Напружено-деформівний стан частково прозорих елементів конструкцій за теплового опромінення пов'язано з об'ємними джерелами тепла, що виникають внаслідок поглинання матеріалом енергії випромінювання, а пондеромоторними силами дії випромінювання нехтуємо вна-

слідок їх малості для теплового випромінювання [6]. Теплофізичні характеристики складників конструкції прийнято незалежними від температури та рівними середнім значенням на проміжку нагрівання. Максимальна температура нагрівання тіла є значно меншою від температури випромінювача, а поверхні, що приймають участь в теплообміні випромінюванням – дифузні.

За прийнятих допущень визначення поля випромінювання та термонапруженого стану тіла за дії стороннього теплового опромінення зводиться до поетапного розв'язування наступних відповідних прямих задач: теорії випромінювання, у якій вихідним для знаходження спектральної інтенсивності випромінювання та відповідних їй тепловиділень в області тіла є рівняння переносу в наближенні не випромінюючого та нерозсіюючого матеріалу; теплопровідності, в якій тепловиділення використано як питому потужність неперервно розподілених теплових джерел; квазістатичної термопружності, з якої за відомого температурного поля знаходимо параметри спричиненого ним напружено-деформованого стану тіла [6].

Розроблено методику розв'язування сформульованих прямих задач математичної фізики за використання методів квадратур (для визначення із системи інтегральних рівнянь спектральних густин потоків енергії ефективного випромінювання), Гауса та прогонки для розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь, чисельного інтегрування Сімпсона, скінченних різниць та інших [3].

З метою постановки відповідних оптимізаційних задач (знаходження оптимальних режимів нагріву елементів конструкції чи умов їх експлуатації) сформульовано ряд критеріїв оптимізації, що узагальнюють чи доповнюють існуючі [4, 5]. Зроблено постановки ряду задач оптимізації нагріву частково прозорих пружних тіл з використанням різних критеріїв, систем обмежень та функцій керування. Розроблено методику розв'язування таких задач з використанням методів проєкції градієнту (субградієнту), ярів, локальних варіацій та інших [12].

Як приклад, визначено оптимальний режим нагріву порожнистої кулі, що зазнає дії зовнішнього теплового та силового навантаження в умовах конвективного теплообміну із зовнішнім середовищем. Джерелом випромінювання є нагріта до підвищеної температури коаксіальна до зовнішньої основи сферична поверхня. Порожнина кулі газонаповнена і герметизована, що є фактором додаткового тиску при нагріві газу.

За критерій оптимальності прийнято сумарне за час нагріву абсолютне значення потоку тепла через зовнішню поверхню (яким мінімізуємо кількість теплової енергії, що виходить з тіла в зовнішнє середовище). За функцію керування вибрано температуру зовнішнього середовища. Обмеження на температуру, напруження, функцію керування та відповідні швидкості її зміни задано областями допустимої зміни. Як мету нагріву вибрано умову досягнення на зовнішній основі (поверхні кулі) в кінцевий момент часу заданої температури.

1. Manufacturing processes. Actual problems – 2020. – Vol. II. Modelling and optimization of manufacturing processes. – Studia i monografie. – Z. 547 / Pod red. nauk.: *O. Hachkevych, A. Stanik-Besler, T. Wolczański*. – Opole: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2020. – 194 p.
2. *Бурак Я.Й., Гачкевич О.Р., Терлецький Р.Ф.* Термомеханіка тіл низької електропровідності при дії електромагнітного випромінювання інфрачервоного діапазону частот // Доповіді АН УРСР. Сер.А. – 1990. – № 6. – С. 39-43.
3. *Волков Е.А.* Численные методы. – Москва: Наука, 1982. – 256 с.
4. *Гачкевич М., Гуменчук О., Чорний Б.* Методика оптимізації режимів нагрівання конвективним способом і джерелами тепла кусково-однорідних оболонок обертання // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. мех.-мат. – 2000. – Вип. 57. – С. 48–51.
5. *Гачкевич О.Р., Гачкевич М.Г., Будз С.Ф.* Оптимізація за напруженим станом режимів нагріву скляних кусково-однорідних оболонок. – Львів: ППММ ім. Я.С. Підстригача, 2014. – 334 с.
6. *Гачкевич А.Р.* Термомеханика электропроводных тел при воздействии квазиустановившихся электромагнитных полей. – Киев: Наук. думка, 1992. – 192 с.
7. *Григолюк Э.И., Подстригач Я.С., Бурак Я.И.* Оптимизация нагрева оболочек и пластин. – Киев: Наук. думка, 1979. – 364 с.
8. *Зигель Р., Хауэлл Дж.* Теплообмен излучением. – Москва: Мир, 1975. – 935с.
9. *Коваленко А.Д.* Термоупругость. – Киев: Вища школа, 1975. – 216 с.
10. Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. *Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра*. Т. 1: Термомеханіка багатокомпонентних тіл низької електропровідності / *Я.Й. Бурак, О.Р. Гачкевич, Р.Ф. Терлецький*. – Львів: СПОЛОМ, 2006. – 300 с.
11. Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. *Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра*. Т. 2: Механотермодифузія в частково прозорих тілах / *О.Р. Гачкевич, Р.Ф. Терлецький, Т.Л. Курницький*. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 184 с.
12. *Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К.* Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. – Москва: Мир, 1986. – 352 с.

OPTIMIZATION OF THERMOMECHANICAL PROCESSES IN PIECEWISE-HOMOGENEOUS BODIES SUBJECTED TO THERMAL RADIATION

The paper a model for the description of thermomechanical processes in elastic piecewise-homogeneous bodies with components of different transparency under thermal irradiation and various approaches for optimizing the processes under consideration are proposed. A number of problems to optimize the heating of semitransparent elastic bodies using various criteria, systems of constraints and control functions are formulated. As an example, the optimal heating mode of the hollow sphere under the influence of external thermal radiation and force load under convective heat exchange conditions with an external environment are determined.