

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ

© 2012 г. Е.А. РЫНДИН^{1,2}, А.С. ИСАЕВА²

¹Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону,
²ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», г. Таганрог

Методы неразрушающего контроля (НК) основаны на регистрации изменений физических параметров материала, из которого изготовлен диагностируемый элемент конструкции или деталь, вследствие воздействия на него неблагоприятных внешних факторов. Расширение спектра методов НК, таким образом, должно производиться за счет исследования новых физических явлений в различных материалах, возникающих при деформировании.

Многообещающими в этом отношении являются механолюминесцентные материалы. Анализ литературы по данной тематике показывает недостаточное число прикладных исследований механолюминесцентных материалов с целью разработки методов НК, в то время как в работах [1], [2], [3], [4] обозначается перспективность данного направления.

Построение математических моделей излучения для различных механолюминесцентных материалов, а также определение закономерностей формирования выходных оптических сигналов чувствительных элементов на основе механолюминесцентных материалов в зависимости от входных воздействий, вызывающих дефекты, являются необходимыми этапами разработки соответствующих систем мониторинга дефектов.

Для решения этой задачи в данной работе предложена модель, включающая нестационарное уравнение теплопроводности, описывающее распределение температуры в объекте исследования под воздействием лазерного импульса, и уравнения термоупругости [5], позволяющие определить механические напряжения, возникающие вследствие теплового воздействия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda_q \nabla T) = f(x, y, z) = 0; \\ \nabla^2(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + E \alpha_T \nabla^2(T - T_0) = 0; \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\) \\ (2) \\) \\ (3) \\) \\ (4) \\) \end{array}$$

где ρ – плотность материала; c – удельная теплоемкость; λ_q – коэффициент теплопроводности; T – абсолютная температура; t – время; x, y, z – координаты; $f(x, y, z)$ – функция плотности мощности источников тепла; E – модуль Юнга; α_T – коэффициент ли-

нейного теплового расширения; σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{yy} – компоненты тензора напряжения; T_0 – начальная температура тела.

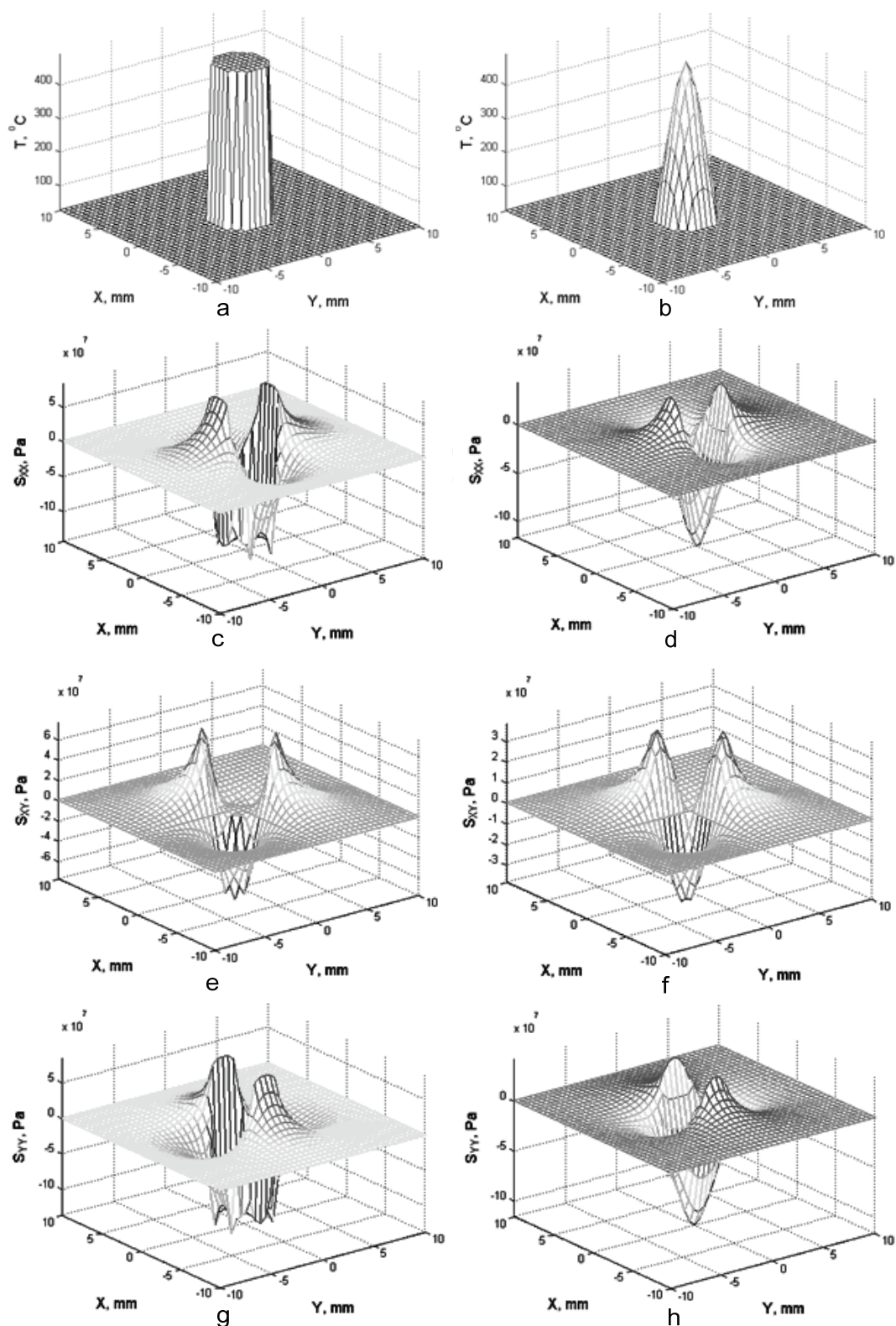


Рис. 1. Распределения по координатам температуры и напряжений на поверхности пластины. Показаны распределения температуры в момент прекращения действия лазерного импульса для равномерного распределения плотности мощности по площади сечения лазерного луча (а) и для гауссовского распределения плотности мощности по площади сечения лазерного луча (б), показаны распределения напряжений

σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{xz} в пластине в момент прекращения действия лазерного импульса для равномерного распределения плотности мощности по площади сечения лазерного луча (с, е, г соответственно), и для гауссовского распределения (d, f, h соответственно).

Уравнения (1) – (4) решались для граничных условий:

$$T \Big|_{x,y,z \max} = T \Big|_{x,y \min, z} = T \Big|_{x,y \max, z} = T \Big|_{x \min, y, z} = T \Big|_{x \max, y, z} = T_0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x,y,z \min} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{4E_L}{\pi D^2 \tau \lambda_q}; \\ x^2 + y^2 \leq D^2/4; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} \Big|_{x,y \min} = \sigma_{xx} \Big|_{x,y \max} = \sigma_{xx} \Big|_{x \min, y} = \sigma_{xx} \Big|_{x \max, y} = 0; \\ \sigma_{yy} \Big|_{x,y \min} = \sigma_{yy} \Big|_{x,y \max} = \sigma_{yy} \Big|_{x \min, y} = \sigma_{yy} \Big|_{x \max, y} = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где D – диаметр лазерного пучка в месте его падения на пластину; E_L – энергия лазерного импульса; τ – длительность лазерного импульса.

В общем случае задачи теплопроводности и термоупругости решаются для трех измерений, но с учетом того, что объектом исследования является тонкая пленка или пластина, целесообразно решать задачу термоупругости для двух измерений (x, y), а уравнение теплопроводности для трех измерений, с последующим преобразованием в двумерное распределение температуры.

Задача распределения температуры в пластине решается в трех измерениях, поскольку для двух измерений тепловой поток лазерного излучения может быть задан лишь как эквивалентный внутренний источник тепла, что может оказаться некорректным. Полученные в результате решения уравнения теплопроводности нестационарные распределения температуры использовались для последующего решения уравнения термоупругости.

Система (1) – (8) решалась численно с использованием метода конечных разностей.

Численное решение системы уравнений (1) – (8) выполнялось для исходных данных, соответствующих сульфиду цинка, обладающему механолюминесцентными свойствами.

На Рис. 1 приведены распределения по координатам температур и компонент тензора напряжений σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{yy} в различные моменты времени, полученные из решения системы (1) – (8) при длительности лазерных импульсов 1 мс для равномерного и гауссовского распределений плотности мощности по площади сечения лазерного луча.

Разработанная модель позволяет получить нестационарные распределения температур и компонент тензора механических напряжений в зависимости от параметров лазерных импульсов, что обеспечит эффективное применение экспериментальных данных для разработки систем мониторинга дефектов на основе явления механолюминесценции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Госконтракт № 16.740.11.0425 от 03.12.10, Госсоглашение № 14.A18.21.0126) в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Татмышевский К.В.* Научные основы расчета и проектирования механолюминесцентных чувствительных элементов датчиков импульсного давления: дис. док. тех. наук. — Владимир, 2009. — с. 46.
2. *Макарова Н.Ю.* Интеллектуальные композиционные панели со встроенными механолюминесцентными датчиками давления // Тезисы Всероссийской научн.-практ. конференции "Актуальные проблемы авиации и космонавтики". Красноярск. — 2005. — с. 65 - 66.
3. *Макарова Н.Ю., Спажакин А.Г., Корнилов П.П., Клименко Ю.С., Скорняков Р.А.* Система мониторинга напряженно-деформированного состояния крыльев самолета // Тезисы Всероссийской научн.-практ. конференции "Актуальные проблемы авиации и космонавтики". Красноярск. — 2005. — с. 67 - 68.
4. *Татмышевский К.В.* Механолюминесцентные (светогенерационные) сенсорные элементы для современных информационно-измерительных технологий // Микросистемная техника. — 2004. — №12. — с. 4-10.
5. *Коваленко А.Д.* Основы термоупругости. — Киев: «Наукова Думка», 1970. — с. 43-48.