

*Работа была поддержана грантом РФФИ 10-08-90012-Бел\_a и Программой ОЭММПУ РАН № 16. Авторы также благодарят Г.И. Рааба за изготовление образцов УМЗ никеля методом равноканального углового прессования.*

### Список литературы

1. S.V. Dmitriev, A.I. Pshenichnyuk, A.M. Iskandarov, A.A.Nazarova. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 18 (025012),- 2010. -10pp.
2. Г.В. Бушуева, Г.М. Зиненкова, Н.А. Тяпунина, В.Т. Дегтярев, А.Ю. Лосев, Ф.А. Плотников // Кристаллография. -2008. -Т.53, №3. - С.507-512.
3. Н.А. Тяпунина, Г.В. Бушуева, М.И. Силис, Д.С. Подсобляев, Ю.Б. Лихущин, В.Ю. Богуненко // ФТТ. -2003. -Т.45, №5. - С.836-841.
4. А.А. Назарова, С.В. Дмитриев, Ю.А. Баимова, Р.Р. Мулюков, А.А. Назаров // ФММ. -2011. -Т.111, №5. - С. 536-543.
5. А.В. Кулемин. Ультразвук и диффузия в металлах. М.:Металлургия, 1978.-200 с.
6. В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко. Волочение и отжиг стальной проволоки с наложением ультразвуковых колебаний // Применение физических и физико-химических методов в технологических процессах. Научные труды МИСиС. М.: Металлургия, 1991. -С. 98-102.
7. В.П. Северденко, В.В. Клубович, А.В. Степаненко. Мн.: Наука и техника, 1976.
8. Н.А. Тяпунина, Е.К. Наими, Г.М. Зиненкова. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами. М.: МГУ, 1999. -238 с.
9. Назарова А.А., Мулюков Р.Р., Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Назаров А.А. // ФММ. -2010. -Т.110, №6. - С.600-607.
10. Назаров А.А., Ханнанов Ш.Х. // ФХОМ. -1986. -№ 4. - С.109-114.

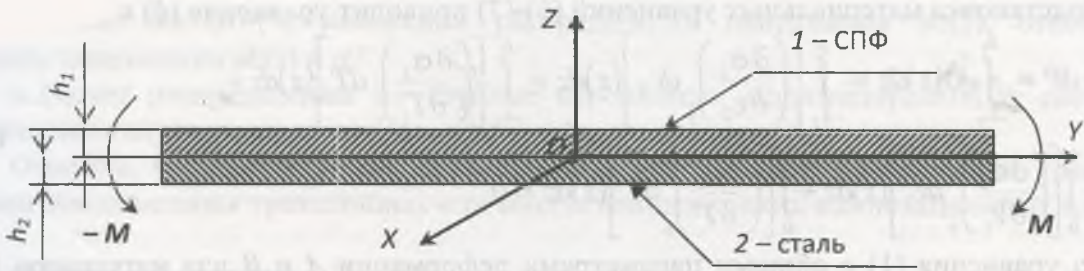
## БИМЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПЛАСТИНА ИЗ СТАЛИ И НИТИНОЛА ПРИ ИЗГИБЕ САМОУРАВНОВЕШЕННОЙ НАГРУЗКОЙ И ВОССТАНОВЛЕНИИ ФОРМЫ: ОДНОМЕРНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

**Пряхин С.С., Рубаник В.В. мл.**

*Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь  
sspryakhin@yandex.by, jr@tut.by*

При разработке структурных композиций, сочетающих такие разнородные материалы, как сплав с памятью формы (СПФ) и упругопластическая сталь, следует учитывать особенности их отклика на термомеханическую нагрузку. Сталь выдерживает значительные напряжения  $\sim 1000$  МПа, не теряя упругопластичности, но может разрушаться при деформациях выше 3%. Нитинол выдерживает деформации, более чем вдвое превышающие эту величину, однако при напряжениях выше 700 МПа теряет функциональные свойства обратимости формы под действием пластичности. В настоящей работе представлены уравнения для расчета поведения биметаллической пластины, композиция которой сочетает слои материалов с памятью формы и упругопластичностью. В отличие от ранее опубликованной работы [1], представленные уравнения позволяют анализировать не только фазу механического нагружения, но и фазы разгрузки и восстановления формы при температурном воздействии.

Модельный объект, биметаллическая пластина, условно изображен на рисунке. Он имеет слой толщиной  $h_1$  из нитинола, сплава с памятью формы, и слой упругопластической стали толщиной  $h_2$ . Объект подвергается изгибу концевой самоуравновешенной нагрузкой, разгружается и проходит фазу восстановления формы в цикле нагрева и охлаждения.



Квазистатическое описание поведения пластины дается, исходя из следующих положений.

Гипотеза плоских сечений приводит к линейности текущих распределений продольной компоненты деформации по толщине пластины  $z$

$$\epsilon_y(z) = A_y z + B_y, \quad -h_2 \leq z \leq h_1, \quad (1)$$

где параметры линейного распределения  $A_y$  и  $B_y$  меняются во времени при изменениях составляющих нагрузки: изгибающего момента  $M = M_x$  и температуры  $T$ .

Удаленные от торцов длинномерного объекта сечения рассматриваются как равноправные, в которых поперечные напряжения удовлетворяют условиям равновесия

$$P_y = - \int_{-h_2}^{h_1} \sigma_y(z) dz = 0, \quad (2)$$

$$M_x = \int_{-h_2}^{h_1} \sigma_y(z) z dz \neq 0. \quad (3)$$

В уравнениях равновесия фигурируют только продольные компоненты напряжения, поэтому далее в индексных обозначениях указываем только индексы 1 и 2, отвечающие материалам верхнего и нижнего элементов пластины (нитинола и стали, соответственно).

Расчет эволюции распределения деформации и напряжения базируется на пошаговой численной процедуре, в которой дифференциалу изменения нагрузки – момента  $dM$  в уравнениях (2)-(3) отвечают дифференциалы напряжений  $d\sigma_1$  и  $d\sigma_2$

$$-dP = \int_{-h_2}^{h_1} d\sigma(z) dz = \int_{-h_2}^0 d\sigma_2(z) dz + \int_0^{h_1} d\sigma_1(z) dz = 0, \quad (4)$$

$$\int_{-h_2}^{h_1} \sigma(z) z dz = \int_{-h_2}^0 d\sigma_2(z) z dz + \int_0^{h_1} d\sigma_1(z) z dz = dM. \quad (5)$$

Такой расчет может быть выполнен, опираясь на модели квазистатического поведения материалов, связывающих между собой дифференциалы напряжения, деформации и температуры уравнениями вида:

$$d\sigma_1 = \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \epsilon_1} \right)_T d\epsilon_1 + \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial T} \right)_\epsilon dT, \quad (6)$$

$$d\sigma_2 = \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \epsilon_2} \right)_T d\epsilon_2 + \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial T} \right)_\epsilon dT. \quad (7)$$

Поскольку при разгрузке биметаллической пластины и восстановлении формы СПФ упругопластическая сталь и нитинол подвергаются воздействию обратных механических нагрузок, модели материалов должны описывать поведение материалов и при знакопеременных нагрузках. Данным требованиям удовлетворяют, в частности, следующие модели: для СПФ предложенная нами модель [2], для упругопластического материала на основе теории Москвитина [3].

Подстановка материальных уравнений (6)-(7) приводит уравнение (4) к виду

$$\begin{aligned}
 -dP = & \int_{-h_2}^{h_1} d\sigma(z) dz = \int_{-h_2}^0 \left[ \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T d\varepsilon_2 \right] (z) dz + \int_{-h_2}^0 \left[ \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial T} \right)_\varepsilon dT \right] (z) dz + \\
 & + \int_0^{h_1} \left[ \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T d\varepsilon_1 \right] (z) dz + \int_0^{h_1} \left[ \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial T} \right)_\varepsilon dT \right] (z) dz = 0
 \end{aligned} \quad (8)$$

Из уравнения (1) с общими параметрами деформации  $A$  и  $B$  для материалов 1 и 2 следуют дифференциальные соотношения

$$d\varepsilon_1(z) = dAz + dB, \quad d\varepsilon_2(z) = dAz + dB. \quad (9)$$

Подставив (9) в (8) и учитывая, что в текущем состоянии параметры  $A$  и  $B$  и температуры  $T$  не являются функциями  $z$ , приводим уравнение (8) к виду

$$\begin{aligned}
 -dP = & dA \left[ \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T (z) z dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T (z) z dz \right] + dB \left[ \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T (z) dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T (z) dz \right] + \\
 & + dT \left[ \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial T} \right)_\varepsilon (z) dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial T} \right)_\varepsilon (z) dz \right] = 0
 \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогичным образом из уравнения (3) можно получить уравнение

$$\begin{aligned}
 dA \left[ \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T (z) z^2 dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T (z) z^2 dz \right] + dB \left[ \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T (z) z dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T (z) z dz \right] + \\
 + dT \left[ \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial T} \right)_\varepsilon (z) z dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial T} \right)_\varepsilon (z) z dz \right] = dM
 \end{aligned} \quad (11)$$

При заданных дифференциальных изменениях составляющих термомеханической нагрузки  $dM$  и  $dT$  систему двух уравнений (10) и (11) можно рассматривать как линейную, в которой неизвестными являются два дифференциала параметров распределения деформации  $dA$  и  $dB$ . Коэффициенты этой системы (выражения в квадратных скобках) можно рассматривать как известные величины, поскольку их можно численно рассчитывать для текущего состояния, исходя из моделей материалов. Эта система является разрешимой относительно  $dA$  и  $dB$ .

Таким образом, моделирование поведения биметаллической пластины для стадий изотермического нагружения и разгрузки, а также термического цикла нагрева и охлаждения можно реализовать в численном виде с использованием единой пошаговой процедуры. Эта процедура для известных текущих распределений по глубине переменных состояния материалов должна возвращать модифицированные распределения переменных состояния, обусловленные заданными текущими изменениями переменных термомеханической нагрузки  $dM$  и  $dT$ . Исходя из представленных уравнений, она может быть реализована в виде алгоритма, включающего в себя следующие фазы:

1. Расчет распределений по координате глубины значений частных производных, входящих в уравнения (6)-(7), отвечающих текущим распределениям переменных состояния материала и направлению изменения нагрузки.

2. Расчет коэффициентов (выражений в квадратных скобках) для уравнений (10)-(11), представляющих собой интегральные выражения рассчитанных выше производных.

3. Расчет из (10)-(11) изменений параметров  $dA$  и  $dB$ , отвечающих изменениям  $dM$  и  $dT$ .

4. Расчет из (9) изменений распределений деформации  $d\varepsilon(z)$ , отвечающих изменениям  $dA$  и  $dB$ .

5. Расчет из (6)-(7) изменений распределений напряжения  $d\sigma(z)$ , отвечающих текущим изменениям  $d\varepsilon(z)$  и  $dT$ .

6. Расчет распределений по глубине переменных модифицированных состояний, включающих внутренние переменные моделей материалов.

Отметим, что аналогичный подход можно использовать в построении уравнений, для анализа поведения трехслойных или многослойных тонких композиционных пластин.

### Список литературы

1. Пряхин С.С., Рубаник В.В. мл. О задаче изгиба биметаллической пластины с элементом из сплава с памятью формы / Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» Сборник статей, 24-26 мая 2011 г., Витебск.- С. 92-95.

2. Пряхин С.С., Рубаник В.В. мл. Моделирование термомеханического поведения сплавов с памятью формы. В монографии: Современные перспективные материалы. Витебск: Изд-во УО "ВГТУ". – 2011.- С. 415-449.

3. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагрузениях. М.: Изд. МГУ. – 1965. – 266с.

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В МНОГОСЛОЙНОЙ КЕРАМИКЕ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$

<sup>1</sup>Шут В.Н., <sup>1</sup>Сырцов С.Р., <sup>1</sup>Трубловский В.Л., <sup>2</sup>Пинчук Т.И.

<sup>1</sup> ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск, Республика Беларусь, shut@vitebsk.by

<sup>2</sup> ГНУ «Институт порошковой металлургии НАН Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь

### Введение

Высокие диэлектрические характеристики сегнетоэлектрической керамики на основе твердых растворов титаната бария-стронция ( $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ , BST) и возможность изменения их с помощью внешних воздействий (электрических, тепловых, деформационных) обуславливает ее широкое применение в современной электронике (конденсаторостроение, техника СВЧ и т.д.) [1–3]. При практическом использовании керамических пленок BST (особенно в высокочастотной электронике) к их параметрам предъявляются жесткие требования – они должны иметь низкие диэлектрические потери ( $tg\delta$ ) в микроволновой области и минимальную дисперсность диэлектрических характеристик в широком температурном интервале (от  $-20$  до  $+80^\circ C$ ). Однако, как и для любой сегнетоэлектрической системы, для керамики BST характерна сильная температурная зависимость параметров в области температуры Кюри и повышенный уровень диэлектрических потерь в сегнетофазе [4, 5]. Несмотря на не снижающийся объем исследований однородных по составу сегнетоэлектрических керамических (в том числе BST) структур, возможности улучшения их характеристик «традиционными» способами практически исчерпаны.

Решение указанных проблем было найдено в рамках принципиально нового подхода в физике сегнетоэлектрических материалов, интенсивно развиваемого в последние годы – создание градиентных сегнетоэлектриков, т.е. структур с изменяющимися по объему характеристиками (составом). Экспериментально была подтверждена возможность улучшения диэлектрических свойств таких структур за счет формирования межфазных границ, обусловленных изменением состава (compositional interfaces). Кроме того, в некоторых градиентных тонких пленках было обнаружено необычное явление