

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАСТИНЕ ИЗ НИТИНОЛА ПРИ ИЗГИБЕ, СНЯТИИ НАГРУЗКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ НАГРЕВЕ

Пряхин С.С., Рубаник В.В. мл.

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

В постановке задачи использовались модельные упрощения из работы [1]. Модельный объект рассматривается как тонкая прямоугольная пластина из материала с памятью формы. Толщина пластины h предполагается много меньшей продольного и поперечного размеров. Деформационные процессы рассматриваются как плоские, плоскость которых ориентирована параллельно продольному направлению пластины и координате ее глубины z . Вдали от краев пластины предполагается, что функции распределений состояния ее материала зависят только от координаты глубины пластины. Их зависимостями от продольной и поперечной координат пренебрегается.

Подразумевается, что изменения состояния пластины происходят под действием квазистатических изменений самоуравновешенной нагрузки с моментом M , приложенной к торцу пластины, и температуры материала T . Равновесию пластины отвечают интегральные выражения для текущих изменений распределений продольных компонентов напряжения по глубине $\sigma(z)$:

$$\begin{aligned}d \int_0^h \sigma(z) dz &= 0, \\d \int_0^h \sigma(z) z dz &= dM.\end{aligned}\tag{1}$$

Из гипотезы плоских сечений принималась связь между изменениями распределений компонентов деформации $\varepsilon(z)$ и текущими параметрами их линейности A и B

$$d\varepsilon(z) = dA \cdot z + dB, \quad 0 \leq z \leq h.\tag{2}$$

В постановке математической задачи использовалась дифференциальная связь между изменениями величин деформации, напряжения, и температурой вида

$$d\sigma = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_T d\varepsilon + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right)_\varepsilon dT,\tag{3}$$

где выражения частных производных связаны с переменными состояния в соответствии с одномерной моделью термомеханического поведения материала с памятью формы [2]. Также использовались кинетические соотношения модели [2], связывающие две компоненты внутренней переменной материала ξ^+ и ξ^- с напряжением и температурой уравнениями вида

$$\bar{\xi} = \bar{\xi}(\sigma, T).\tag{4}$$

Соотношения (1)–(4) описывают дифференциальную связь между изменениями распределений напряжения и переменных состояния СПФ в условии заданных во времени изменений переменных нагрузки (момента M и температуры T). Дополнение этих соотношений начальными распределениями напряжения и переменных состояния, а также изменениями переменных нагрузки делает математическую постановку задачи моделирования корректной. Расчеты состояния нагруженной пластины в соответствии с данной постанов-

кой задачи выполнялись по предложенной нами итерационной схеме, описанной в работе [3].

Моделирование неупругого отклика пластины, подвергаемой изотермическому механическому циклу нагрузка-разгрузка при температуре $T \geq A_f$, всегда приводит к решениям с полным восстановлением неупругой деформации в полцикле снятия нагрузки (сверхупругость). В конце такого цикла остаточные напряжения отсутствуют (см. рис. 1).

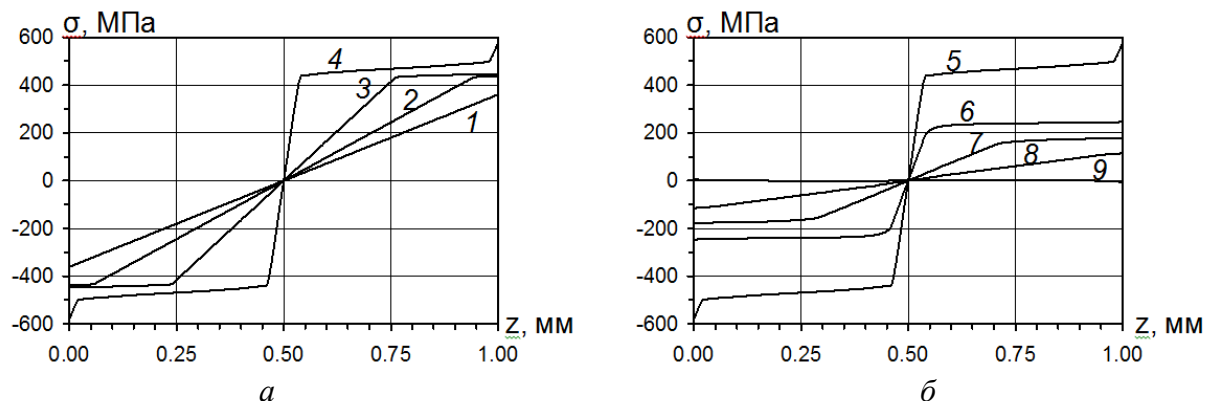


Рис. 1. Эпюры напряжения σ по толщине z пластины нитинола в изотермических ($T = 60^\circ\text{C}$) процессах: a – нарастание изгибающего момента; b – уменьшение изгибающего момента.
 M : 1 – 60 Н; 2 – 80 Н; 3 – 100 Н; 4 – 120 Н; 5 – 120 Н; 6 – 60 Н; 7 – 40 Н; 8 – 20.0 Н; 9 – 0.

В условии однородного нагружения в температурном диапазоне $M_S < T < A_S$ образующийся в нитиноле напряженно индуцированный мартенсит полностью сохраняется в последующем полцикле разгрузки. В конце механического цикла материал приобретает неупругую деформацию (деформацию превращения). При моделировании воздействия изотермического изгиба нитиноловой пластины в этом температурном диапазоне решения также отвечают накоплению деформации превращения, которая сохраняется при снятии нагрузки. Как результат после механического цикла нагрузки в пластине образуются остаточные напряжения (см. рис. 2). После разгрузки максимальные значения наведенной деформации превращения локализованы у свободных поверхностей $z = 0$ и $z = 1$ мм и они противоположны по знаку локальным остаточным напряжениям. Аналогичные по морфологии эпюры остаточных напряжений для пластины из сплава с памятью формы были получены в работе [4].

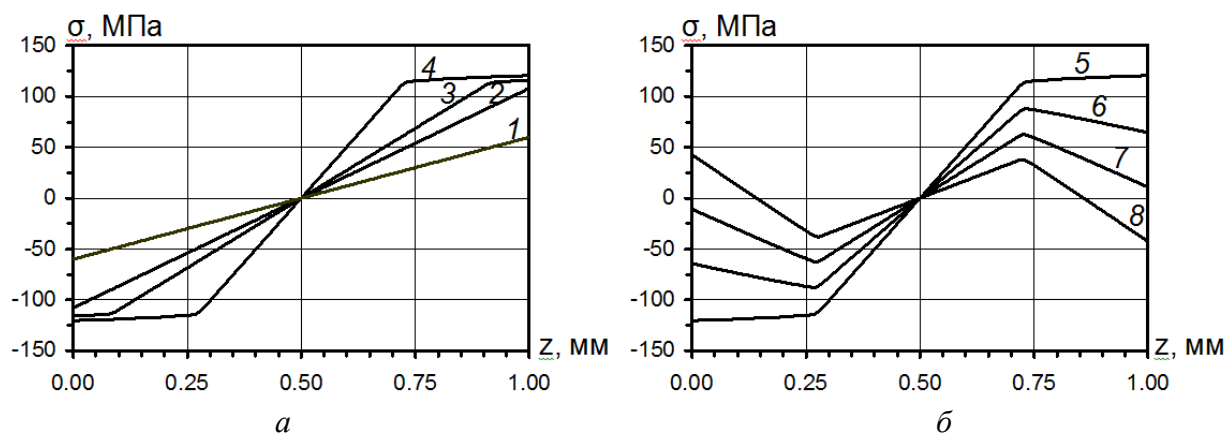


Рис. 2. Эпюры напряжения σ по толщине z пластины из нитинола в изотермических ($T = 20^\circ\text{C}$) процессах: a – нарастание изгибающего момента; b – уменьшение изгибающего момента.
 M : 1 – 10 Н; 2 – 18 Н; 3 – 22 Н; 4 – 27.4 Н; 5 – 27.4 Н; 6 – 18 Н; 7 – 9 Н; 8 – 0.0 Н.

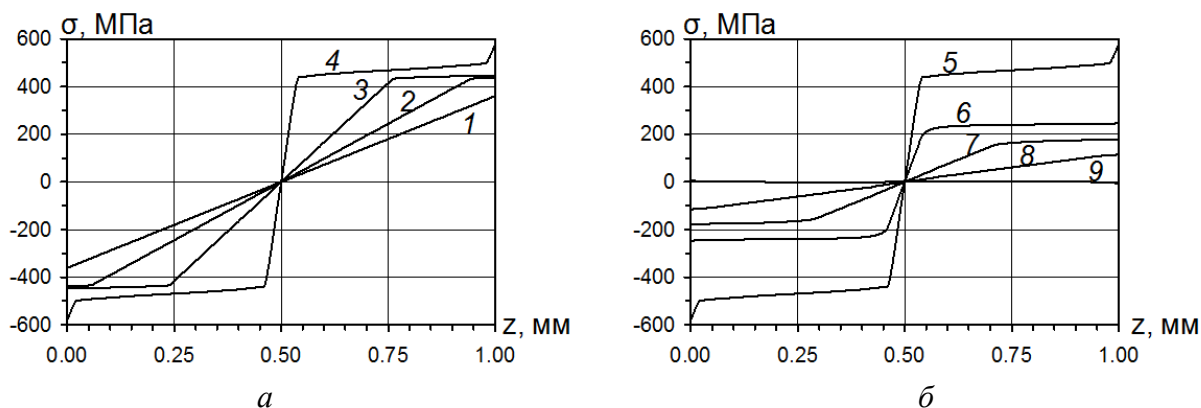


Рис. 3. Эпюры напряжения σ по толщине z пластины из нитинола после снятия нагрузок (с максимумами $a - M_{\max} = 27.4$ Н; $b - M_{\max} = 34.8$ Н) при увеличении при $M = 0$ температуры. T : 1 – 20°C; 2 – 42.8°C; 3 – 45.6°C; 4 – 50°C; 5 – 20°C; 6 – 42.8°C; 7 – 45.6°C; 8 – 50°C; 9 – 60°C.

Для свободной пластины с остаточными напряжениями, образованными при неупругом изотермическом изгибе и снятии нагрузки в температурном диапазоне $M_S < T < A_S$, выполнены расчеты состояния при последующей стадии нагрева. Получены два типа численных решений задачи моделирования, отвечающих качественно различному поведению пластины во время нагрева. К первому типу относятся решения, описывающие релаксацию остаточных напряжений при нагреве. Ко второму – описывающие нарастание упругой энергии, сопровождающееся блокированием обратных мартенситных превращений. Они демонстрируются на рис. 3. Рис. 3а относится к случаю с максимальным значением предшествующей нагрузки во время изгиба $M_{\max} = 27.4$ Н при $T = 20^\circ\text{C}$. У поверхности пластины концентрация мартенсита достигла $\xi = 3\%$. Отметим пульсацию интенсивности напряжения в приповерхностных слоях при нагреве. Рис. 3б относится к случаю с максимумом предшествующей нагрузки $M_{\max} = 34.8$ Н при $T = 20^\circ\text{C}$. У поверхности концентрация мартенсита достигла $\xi = 50\%$, т.е. на порядок больше, чем на рис. 3а.

Поведение решений для стадии нагрева объясняется тем, что математическое описание содержит механизм нарастания локальных напряжений при обратных превращениях. После разгрузки наведенная деформация превращения в приповерхностных слоях ориентирована противоположно остаточным напряжениям. Обратное превращение приводит к сокращению интенсивности деформации превращения в этих слоях, что локально усиливает в них интенсивность напряжения. При этом нарастание напряжения в приповерхностном слое блокирует обратные превращения. Какой тип решения - определяется исходным уровнем мартенсита.

Список литературы

1. Волков, А. Е. Расчет неупругой деформации биметаллического элемента из сплава с памятью формы и стали / А. Е. Волков, М. Е. Евард // Актуальные проблемы прочности: сб. материалов 50 Междунар. научн. симп.: Витебск, Беларусь, 27 сент. – 1 окт. 2010 г.: в 2 ч. – Витебск: УО «ВГТУ», 2010. – Ч. 1. С. 69-72.
2. Pryakhin, S. Modeling of thermomechanical behavior of shape memory alloys // S. Pryakhin, V. Rubanik, Jr. // Material Science Foundations. – 2015. Vols. 81-82. P. 77-103.
3. Пряхин, С. С. Биметаллическая пластина из стали и нитинола при изгибе самоуравновешенной нагрузкой и восстановлении формы: одномерное приближение / С. С. Пряхин, В. В. Рубаник мл. // Перспективные материалы и технологии: сб. статей Междунар. симп.: Витебск, 29 мая - 1 июня 2013 г. – Витебск: УО «ВГТУ», 2013. – С. 54-57.
4. Выюненко, Ю. Н. Эффект памяти формы, инициируемый механизмом остаточных напряжений / Ю. Н. Выюненко // Перспективные технологии и методы контроля. – Витебск: УО «ВГТУ», 2009. – Гл. 14. – С. 384-399.