

## Список литературы

1. Brinson L.C. One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1993. 4(2): pp. 229-242.
2. Пряхин С.С., Рубаник В.В. мл. Концепция разделения компонентов внутренней переменной для описания термомеханического поведения сплава с памятью формы при знакопеременных нагрузках. / Современные методы и технологии создания и обработки материалов/ IV Междунар. научн.-техн. конф. (Минск, 19-21 октября 2009г.): сб. материалов. В 3 кн. Кн.1. Многофункциональные материалы в современной технике и методы их получения. Материалы для микро- и нанoeлектроники / ред. коллегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) и др. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2009. –295 с. С. 190-195.
3. Brocca M., Brinson L.C., Bazant Z.P. Three dimensional constitutive model for shape memory alloys based on microplane model. J. Mech. Physics Solids, vol. 50, pp 1051-1077.

## МЕХАНИЗМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ЭПФ И ОБРАТИМАЯ ПАМЯТЬ ФОРМЫ

Вьюненко Ю. Н.

*СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия*

Деформационные процессы ЭПФ, наблюдаемые при нагреве металлических материалов с переходом температурных интервалов трансформации кристаллической решетки, могут быть обусловлены полями остаточных напряжений, возникающими в процессе формоизменения образцов в мартенситном состоянии [1]. Охлаждение предварительно продеформированных в высокотемпературном состоянии изделий из сплава TiNi может сопровождаться как восстановлением первоначальной формы [2], так и противоположным эффектом. Результаты были получены в рамках математической модели, включающей в себя уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \Delta u, \quad (1)$$

где  $u$  – температура,  $k = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$  – коэффициент температуропроводности,  $\lambda$  – коэффициент

теплопроводности,  $\rho$  – плотность материала,  $c = c(u)$  – теплоемкость, зависящая от температуры в интервале фазового превращения. При проведении численных экспериментов было принято, что

$$c(u) = c_0 + c_1 \frac{(u - u_n)(u_k - u)}{(u_k - u_n)^2}$$

$u_n$  и  $u_k$  – температура, соответственно, начала и конца превращения. За пределами температурной зоны превращения теплоемкость принималась постоянной  $c(u) = c_0$ . Постоянную  $c_1$  определяли из условия:

$$\int_{u_n}^{u_k} c_1 \frac{(u - u_n)(u_k - u)}{(u_k - u_n)^2} du = Q_{np}$$

где  $Q_{np}$  – скрытая теплота превращения.

Второй составляющей математической модели является закон деформирования материала. Упругая стадия растяжения, как в мартенситном, так и в аустенитном состоянии подчиняется закону Гука:

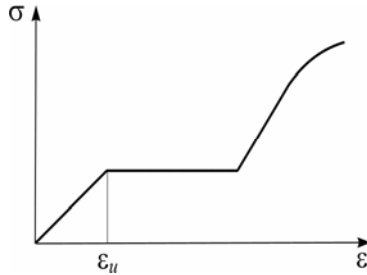
$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.1)$$

где  $\sigma$  – напряжение,  $\varepsilon$  – деформация  $E$  – модуль Юнга.

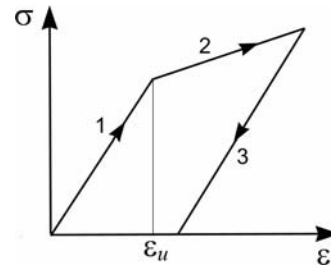
Превышение нагрузкой предела упругости в мартенситном состоянии для многих материалов приводит к накоплению пластической деформации по закону пластического течения (рис.1). В аустенитном состоянии материала закон деформирования (рис.2) может быть аппроксимирован на второй стадии роста нагрузки следующим соотношением:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_y + E_2 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_y), \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_y$  - деформационный предел упругости,  $E_2 = \partial\sigma / \partial\varepsilon$  – коэффициент деформационного упрочнения на втором этапе деформирования.



**Рис. 1.** Диаграмма деформирования материала в мартенситном состоянии на стадии нагружения (схема)



**Рис. 2.** Диаграмма деформирования материала в аустенитном состоянии. 1, 2 – стадии нагружения; 3 – разгрузка.

Форма, вновь приобретенная элементом конструкции после деформирования и снятия внешних нагрузок, определяется уравнениями равновесия. Сбалансированными будут поля внутренних напряжений в каждом сечении  $S$ :

$$\int_S \sigma(s) ds = 0. \quad (3.1)$$

Кроме этого должны быть уравновешены и моменты остаточных напряжений:

$$\int_S \sigma(s) \cdot r(s) ds = 0, \quad (3.2)$$

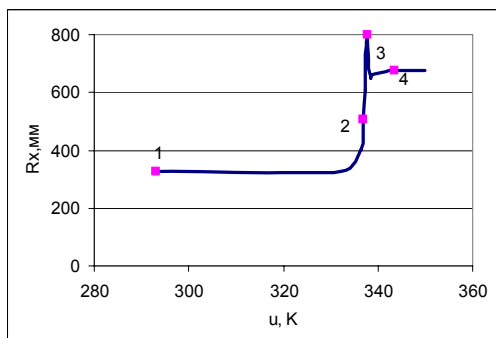
где  $r(s)$  – расстояние элемента  $ds$  до центра вращения. Уравнения равновесия также являются составляющей частью математической модели.

Если температура продеформированного в однофазном состоянии образца в процессе нагрева или охлаждения приближается к температурам трансформации кристаллической решетки, то из-за “дефекта” модуля упругости состояние равновесия будет нарушено. Это приведет к изменению формы приобретенной при деформировании. Для расчета этого процесса при нагреве температурная зависимость модуля упругости была выбрана в следующей форме:

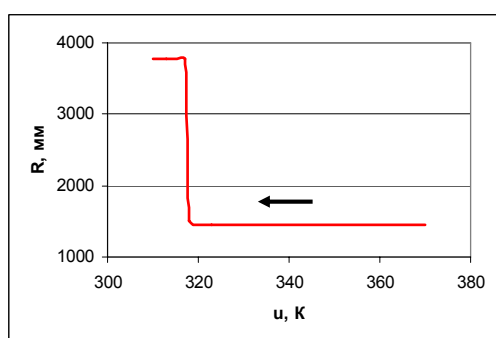
$$E(u) = \begin{cases} E_M, & \text{при } u < A_H \\ E_M \frac{A_K + A_H - 2u}{A_K - A_H}, & \text{при } A_H \leq u \leq \frac{A_K + A_H}{2} \\ E_A \frac{2u - A_K + A_H}{A_K - A_H}, & \text{при } \frac{A_K + A_H}{2} \leq u \leq A_H \\ E_A, & \text{при } u > A_K \end{cases}$$

где  $A_H$  и  $A_K$  – температуры начала и конца аустенитного превращения. Для охлаждения была принята аналогичная зависимость модуля Юнга от температуры. При этом величины  $A_H$  и  $A_K$  были заменены на  $M_H$  и  $M_K$  – температурные границы прямого мартенситного превращения.

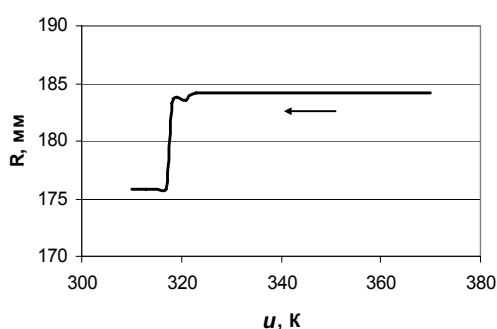
В численном эксперименте были приведены расчеты радиуса кривизны изогнутой пластины. Предполагали, что при деформировании были реализованы условия чистого изгиба. Физические характеристики модельного материала были приняты равными соответствующим величинам сплава TiNi, близкого к эквиаtomному составу. Толщина пластин принималась равной 4 мм. Зависимость температур  $A_H$ ,  $A_K$ ,  $M_H$  и  $M_K$  от степени пластической деформации была принята линейной [3]. Для проведения вычислений использовали метод сеток.



**Рис. 3.** Эволюция радиуса кривизны изогнутой пластины при нагреве с постоянной скоростью



**Рис. 4.** Развитие аустенитной памяти формы с учетом влияния пластической деформации на  $M_H$  и  $M_K$

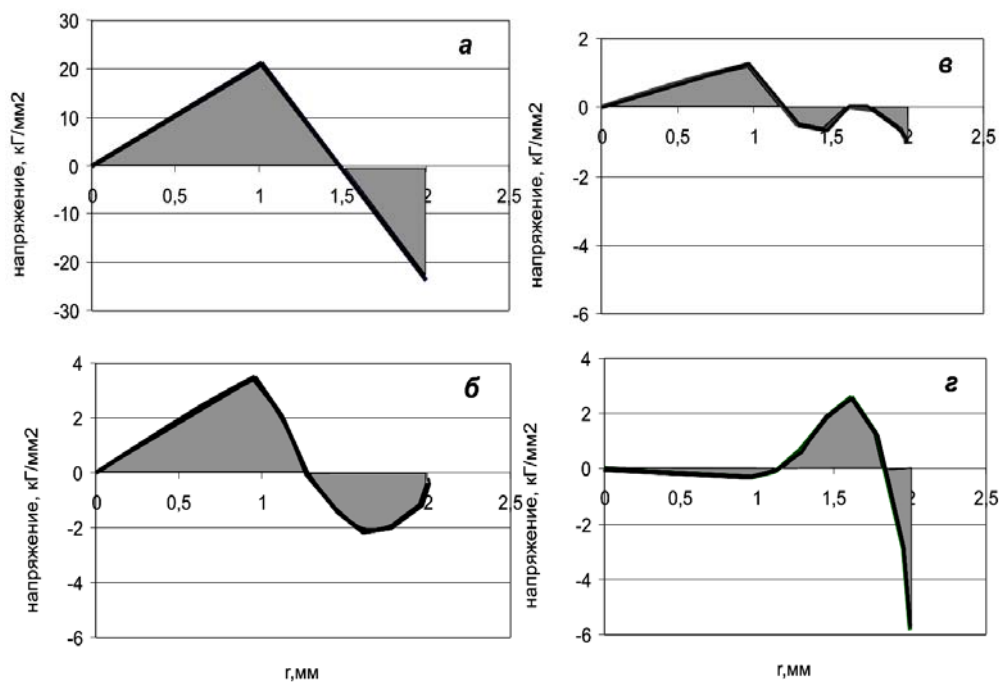


**Рис. 5.** Усиление кривизны пластины при охлаждении материала через интервал прямого мартенситного превращения

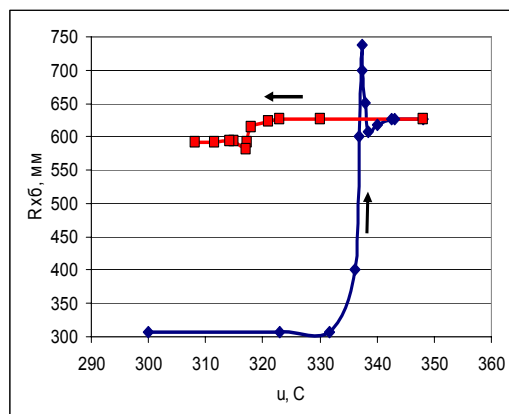
(рис. 7). Таким образом, механизм остаточных напряжений, по крайней мере, частично, участвует в развитии процессов обратимой памяти формы.

На рис. 3 показано изменение радиуса кривизны пластины при нагреве. В результате действия предложенного механизма возврата формы восстановлено более 50% остаточной деформации. Близкие результаты были получены и при охлаждении (рис. 4). При повышении степени первоначальной деформации роль механизма остаточных напряжений в восстановлении формы при нагреве снижается. А при охлаждении можно получить и противоположный эффект (рис. 5). Обусловлено это тем, что при значительных деформациях фазовое превращение на поверхности пластины начинается при существенно более низких температурах. Развитие “дефекта” модуля упругости в зоне упругого деформирования материала во внутренних слоях пластины начинается раньше, что и приводит к усилению его изгиба за счет действия напряжений в приповерхностных слоях.

В рамках предполагаемой модели удается отслеживать эволюцию полей напряжений в процессе восстановления формы [4]. На рис. 6 показаны распределение напряжений по поперечной толщине пластины при разных температурах. Завершение фазового превращения по всему объему пластины приводит к ситуации, аналогичной исходной. Распределение напряжений таково, что в приповерхностных слоях присутствуют напряжения сжатия. Поэтому в численном эксперименте, когда стадия нагрева пластины сменялась стадией охлаждения, было отмечено усиление кривизны пластины с переходом температур прямого превращения



**Рис. 6.** Распределение напряжений по толщине пластины при температурах 293 (а), 336,9 (б), 337,7 (в) и 343,6 (г).



**Рис.7.** ЭПФ при нагреве и эффект ОПФ при охлаждении

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-01-00605*

### Список литературы

1. Вьюненко Ю.Н. Механизм эффекта памяти формы, обусловленный эволюцией поля остаточных напряжений. *Материаловедение*. №12, 2003, С. 2-6.
2. Вьюненко Ю.Н., Носковец А.А. Роль остаточных напряжений в эффекте памяти формы аустенитного типа. *Первые Московские Чтения по проблемам прочности материалов*, 1-3 декабря 2009 г. Тезисы докладов. С.50.
3. Вьюненко Ю.Н. Эффект памяти формы, инициируемый механизмом остаточных напряжений. Глава 14 в кн. *Перспективные технологии и методы контроля* - Витебск: изд-во УО «ВГТУ», 2009 – с.384-399
4. Вьюненко Ю.Н. Изменение поля напряжений в результате развития эффекта памяти формы. // *Сб. материалов XIX Петербургских Чтений по проблемам прочности*, 2010. – Ч.2., с.318-319