

## ЭФ И СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ПРЕВРАЩЕНИЯ

Вьюенко Ю. Н.

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Моделирование эффекта памяти формы в рамках механизма остаточных напряжений [1,2] предполагает знание ряда физических характеристик и их поведения вблизи температур фазового превращения. Численные эксперименты [3,4] показали, что восстановление формы обусловлено нарушением равновесия остаточных напряжений в результате возникающего градиента температур и “дефекта” модулей в гетерофазной зоне. Размеры этой зоны и ее движение по объему конструкции определяют скорость нагрева поверхности (или объема материала), распределение температурных границ фазового перехода и скрытая теплотой превращения. Первый из трех факторов контролируется как в численных, так и в натуральных экспериментах. Очень много имеется информации в литературе по влиянию различных факторов на температурные границы фазового превращения. О скрытой теплоте превращения данных немного, и в разных источниках значения этой характеристики сильно различаются. Поэтому представляют интерес результаты численного эксперимента по определению влияния величины теплоты превращения на деформационный процесс ЭПФ.

Рассмотрим восстановление формы изогнутого круглого цилиндра, равномерно нагреваемого с поверхности. Полагаем, что при деформировании были реализованы условия чистого изгиба. Считая цилиндр достаточно длинным, не учитываем нагрев с торцевых поверхностей. В этом случае в систему основных уравнений механизма остаточных напряжений ЭПФ войдет уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где  $a = \frac{\lambda}{c(T)\rho}$  – коэффициент температуропроводности,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $c(T)$  – теплоемкость и  $\rho$  – плотность материала.

При условии пластической деформации по закону пластического течения уравнение равновесия моментов остаточных напряжений примет вид:

$$\int_0^{re} E(T) \frac{y^2}{R} \sqrt{r_0^2 - y^2} dy + \int_{re}^{r_0} E(T) \frac{y^2}{R} \left( \frac{y}{R} - \frac{y}{R_0} + \varepsilon_e \right) y \sqrt{r_0^2 - y^2} dy = 0, \quad (2)$$

где  $E(T)$  – модуль Юнга,  $R$  – радиус кривизны цилиндра после снятия внешней нагрузки,  $R_0$  – радиус оправки,  $r_0$  – радиус цилиндра,  $re$  – расстояние от нейтрального слоя до границы зоны упругого деформирования материала.

Температурная зависимость модуля Юнга отражается кусочно-линейной функцией:

$$E(T) = \begin{cases} E_H, T < A_s \\ E_H \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot (T - A_s)}{A_f - A_s}\right), A_s \leq T \leq \frac{A_s + A_f}{2} \\ E_H \cdot \frac{2 \cdot \left(T - \frac{A_s + A_f}{2}\right)}{A_f - A_s}, \frac{A_s + A_f}{2} \leq T \leq A_f \\ E_B, A_f \leq T \end{cases} \quad (3)$$

где  $E_H$  и  $E_B$  модули Юнга, соответственно, низкотемпературной и высокотемпературной фаз,  $A_s$  и  $A_f$ , соответственно, температуры начала и конца превращения.

Влияние пластической деформации  $\varepsilon_p$  на значения  $A_s$  и  $A_f$  принимаются равными

$$A_s(\varepsilon_p) = A_{s0} - k\varepsilon_p; A_f(\varepsilon_p) = A_{f0} - k\varepsilon_p, \quad (4)$$

где  $A_{s0}$  и  $A_{f0}$  – температуры начала и конца превращения недеформированного материала.

Температурная зависимость теплоемкости представлена следующим образом:

$$c(T) = \begin{cases} c_0, T < A_s, T > A_f \\ c_0 + c_1 \frac{(T - A_s)(A_f - T)}{(A_f - A_s)^2}, A_s \leq T \leq A_f \end{cases}$$

где  $c_0$  и  $c_1$  константы. Значение  $c_1$  зависит от теплоты превращения  $Q$ :

$$\int_{A_s}^{A_f} c_1 \frac{(T - A_s)(A_f - T)}{(A_f - A_s)^2} dT = Q.$$

Радиус цилиндра был выбран равным 2 мм. Температурные границы превращения были приняты равными:  $A_{s0} = 333$  К,  $A_{f0} = 343$  К, а коэффициент  $k - 10$  К. Радиус оправки  $R_0$  был выбран таким образом, чтобы величина  $\varepsilon_p$  в наружном волокне составила 0,01. Остальные характеристики модельного материала были приняты равными соответствующим константам эквивалентного никелида титана. Скорость нагрева поверхности принимали равной 0,25 К/с.

На рис. 1 приведена температурная зависимость радиуса кривизны при величине теплоты превращения 356,9 Дж/г (кривая 1), 35,69 Дж/г (кривая 2) и 3,569 Дж/г (кривая 3). Из приведенных данных видно, что деформационный процесс восстановления формы во всех трех случаях начинается одновременно. Однако в первом случае из-за длительного прогрева материала изменение формы образца заканчивается при  $T = 363$  К на поверхности. При меньших затратах тепла на перестройку кристаллических решеток формоизменение длится лишь до  $T = 353$  К на поверхности (кривые 2,3). При этом возрастает коэффициент восстановления формы с 49,5% в первом случае до 54,2% во втором и до 56,3%; в третьем. Таким образом, теплота превращения может влиять на степень восстановления формы, обусловленную механизмом остаточных напряжений. Кроме этого, снижение значений теплоты превращения приводит к образованию локального минимума при температуре поверхности 346К. По всей видимости, этот эффект (как и максимум на температурной зависимости  $R$ ) – следствие температурной аномалии модуля Юнга и “конкуренции” материала, в котором остаточные напряжения стремятся восстановить первоначальную форму, и области с напряжениями, противодействующими ЭПФ.

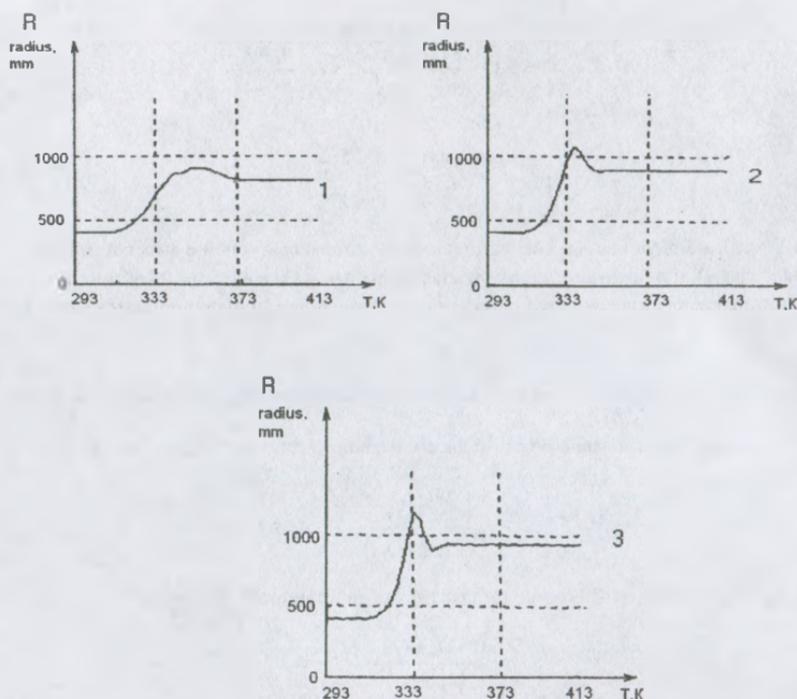


Рис.1.

## Список литературы

1. Выюненко Ю.Н., Сырковская Л.Е. "Дефект" модуля упругости и ЭФП. В кн. Функционально-механические свойства материалов и их компьютерное конструирование. Псков, 1993, с. 538-540.
2. Yu N. Vyunenکو, L. F. Vyunenکو. Residual stresses mechanism of SME. Theory and simulation. J.Phys. IV Franse, 2003, v.112, p.235-238
3. Выюненко Ю.Н., Сырковская Л.Е. Температурная зависимость модуля упругости и эффекта памяти формы. В кн.: Механика прочности материалов с новыми функциональными свойствами. Рубежное, 1990, с.159-161.
4. Ю.Н.Выюненко, Л.Ф.Выюненко, Е.А.Пляк. Моделирование эволюции полей упругих характеристик материалов с ЭПФ. Вестник ТГУ, т.8, вып. 4, 2003, с.557-560.