

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

НОЗДРИН М.А., канд. техн. наук, ЗАРУБИН З.В., асп.

Рассматриваются вопросы математического моделирования поведения материалов с эффектом памяти формы в случае сложного термомеханического нагружения.

Ключевые слова: эффект памяти формы, метод конечных элементов, упругость, пластичность.

STRESS CONDITION OF SHAPE MEMORY ALLOY CONSTRUCTION

M.A. NOSDRIN, Candidates of Engineering, Z.V. ZARUBIN, Post-Graduate Student

Mathematical modeling of shape memory alloys behavior under complex thermomechanical loading are considered.

Keywords: shape memory effect, finite element method, elasticity, plasticity.

Сплавы с эффектом памяти формы – это класс материалов, способных в процессе нагрева восстанавливать большие предварительно заданные деформации. Такое поведение и получило название эффекта памяти формы, а сами сплавы были отнесены к классу функциональных. Название феномена подчеркивает особенность деформирования, когда тело изменяет свою форму не под действием механической силы, а в результате изменения температуры, преобразуя таким образом тепловую энергию в механическую.

В материалах с эффектом памяти формы механизмом деформации служит обратимое термоупругое мартенситное превращение, заключающееся в том, что в процессе охлаждения материал из одного состояния, называемого аустенитом, переходит в другое – мартенсит (прямое превращение) [1]. При нагреве происходит обратное превращение. Переход характеризуется перестройкой кристаллической решетки, сопровождающейся ее деформацией. Обратимость превращения обеспечивает обратимость деформации, достигающей 8–10 %. Свойствами памяти формы обладают сплавы (более двухсот) Ti-Ni, Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al, Au-Cd и др.

Температуры мартенситных превращений сильно зависят от химического состава сплавов, их термической и механической обработки и могут находиться в районе как комнатной температуры, так и температуры жидкого азота или достигать 150°C и выше. Сплавы с эффектом памяти формы обладают не только этим функциональным свойством, но и другими, также связанными с обратимыми мартенситными превращениями, среди которых следует назвать сверхупругость, сверхпластичность, способность генерировать реактивные напряжения, двустороннюю память формы (рис. 1).

Возможности широкого применения изделий из сплавов с эффектом памяти формы

(ЭПФ) существенно ограничиваются из-за отсутствия универсальных и достоверных методов их теоретического расчета. Это приводит к неоптимизированному использованию изделий с ЭПФ.

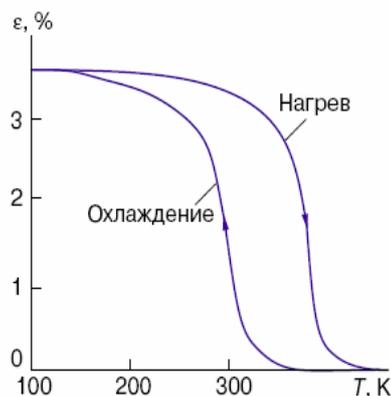


Рис. 1. Диаграмма, иллюстрирующая эффект двусторонней памяти формы в никелиде титана

Предлагается развитие методики расчета напряженно-деформированного состояния произвольной конструкции из сплава с ЭПФ [2–5]. Сплав с ЭПФ моделируется как двухфазный материал, в котором соотношение мартенситной и аустенитной фаз определяется коэффициентом Φ [6]. Данный коэффициент изменяется в пределах от нуля до единицы и описывает температурный гистерезис, проявляемый сплавами с ЭПФ (рис. 2). Нагрев сплава происходит по линии $m-1-2-3-4-5-a$, а охлаждение по линии $a-5-6-7-8-1-m$.

При изменении нагрева на охлаждение в интервале температур $T_1 < T < T_4$ поведение материала описывается петлей гистерезиса $m-1-2-3-8-1-m$. При смене охлаждения нагревом в интервале температур $T_1 < T < T_4$ поведение материала описывается петлей гистерезиса $a-5-6-7-4-5-a$.

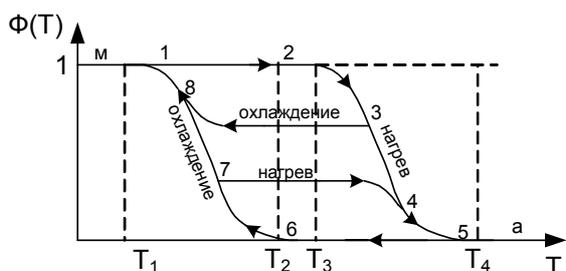


Рис. 2. Зависимость относительного количества мартенсита (Φ) от температуры: T₁ – температура окончательного превращения аустенита в мартенсит при охлаждении; T₄ – температура окончательного превращения мартенсита в аустенит при нагреве.

С помощью коэффициента Φ выражаются зависимости модуля упругости E и предела текучести σ_T сплава с ЭПФ от температуры, гистерезисный характер которых подтверждается экспериментальными исследованиями (рис. 3):

$$E(\Phi) = E_a - (E_a - E_m)\Phi,$$

$$\sigma_T(\Phi) = \sigma_{T_a} - (\sigma_{T_a} - \sigma_{T_m})\Phi,$$

где E_a – модуль упругости материала в аустенитном состоянии; E_m – модуль упругости материала в мартенситном состоянии; σ_{T_a} – предел текучести материала в аустенитном состоянии; σ_{T_m} – предел текучести материала в мартенситном состоянии.

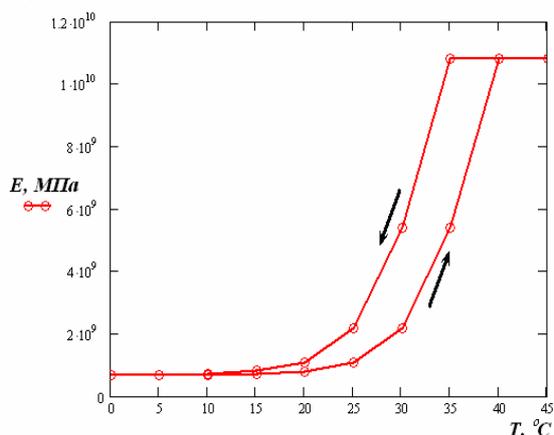


Рис. 3. Экспериментальная кривая зависимости модуля Юнга от температуры

Диаграмма растяжения-сжатия материала представима в качестве реологической функции, которая зависит от коэффициента Φ и максимального за цикл нагружения напряжения (σ_{max}):

$$F(\sigma, \sigma_{max}, \Phi) =$$

$$= \begin{cases} \frac{\sigma}{E} & \text{при } \sigma \leq \sigma_T, \\ \left(\frac{\sigma_T - \sigma_T}{E} + \frac{\sigma}{E^*}\right) & \text{при } \sigma > \sigma_T, \end{cases} \quad \text{при } \sigma_{max} \leq \sigma_T,$$

$$= \begin{cases} \left(\frac{\sigma_T - \sigma_{max}}{E} - \frac{\sigma_T - \sigma_{max}}{E^*}\right) + \frac{\sigma}{E} & \text{при } \sigma_T < \sigma_{max} \leq \sigma, \\ \left(\frac{\sigma_T - \sigma_T}{E} + \frac{\sigma}{E^*}\right) & \text{при } \sigma < \sigma_{max}. \end{cases}$$

Строятся реологические модели линейной деформации от напряжения в материале и напряжения от деформации. При этом при изменении свойств материала возможен переход от пластичного состояния, в котором возможны остаточные деформации, к упругому. Функция зависимости деформаций от напряжений представляется в виде суммы функции упругой деформации и функции остаточной пластической деформации:

$$\varepsilon(\sigma, \sigma_{max}) = \varepsilon_1(\sigma, \sigma_{max}) + \varepsilon_2(\sigma, \sigma_{max}),$$

где ε₁(σ, σ_{max}) – функция остаточной пластической деформации; ε₂(σ, σ_{max}) – функция упругой деформации, вызванной нагрузкой:

$$\varepsilon_1(\sigma, \sigma_{max}) = \begin{cases} (\sigma_{max} - \sigma_T) \left(\frac{1}{E^*} - \frac{1}{E}\right) & \text{при } \sigma_{max} > 0, \\ (\sigma_{max} + \sigma_T) \left(\frac{1}{E^*} - \frac{1}{E}\right) & \text{при } \sigma_{max} < 0, \end{cases}$$

$$\varepsilon_2(\sigma, \sigma_{max}) = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} & \text{при } -|\sigma_{max}| < \sigma < |\sigma_{max}|, \\ |\sigma_{max}| \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E^*}\right) + \frac{\sigma}{E^*} & \text{при } \sigma \leq -|\sigma_{max}|, \\ |\sigma_{max}| \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E^*}\right) + \frac{\sigma}{E^*} & \text{при } \sigma \geq |\sigma_{max}|. \end{cases}$$

Максимальное напряжение σ_{max} определяется исходя из интенсивности напряжений в точке образца при сложном напряженном состоянии.

Переменный коэффициент демпфирования моделируется следующим образом:

$$b(\Phi) = b_a - (b_a - b_m)\Phi,$$

где b_a – коэффициент демпфирования материала в аустенитном состоянии; b_m – коэффициент демпфирования материала в мартенситном состоянии.

Далее рассмотрим плоскую задачу деформации балочной конструкции из сплава с ЭПФ в изменяющемся температурном поле. Для этого запишем систему дифференциальных уравнений для упругих деформаций в точке стержня:

тировании прецизионных изделий // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 4. – С. 163.

3. Ноздрин М.А., Зарубин З.В. Исследование напряженно-деформированного состояния в материалах с памятью формы // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 3. – С. 20–22.

4. Зарубин З.В., Ноздрин М.А. Применение метода конечных элементов к расчетам материалов с памятью формы: Мат-лы конф. XIV Туполевские чтения. Т. 1. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 117–118.

5. Ноздрин М.А., Зарубин З.В. Моделирование эффекта памяти формы в конструкционных материалах /

Новые материалы и технологии, НМТ – 2006 // Мат-лы Всеросс. науч.-техн. конф. В 3-х т. – М.: ИЦ МАТИ, 2006. – Т.1. – С. 89–90.

6. Александрович А.И., Кувшинов П.А. Решение трехмерной упругопластической задачи для конечного отрезка толстостенной трубы методом локальных функционалов // Известия РАН. МТТ. – № 4. – С. 74–85.

7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975.

Ноздрин Михаил Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики,
e-mail: nozdrin@tipm.ispu.ru

Зарубин Захар Викторович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
ассистент кафедры теоретической и прикладной механики,
телефон (4932) 26-97-11.