

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В МАТЕРИАЛАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

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

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

*Ключевые слова:* эффект памяти формы, моделирование поведения материалов.

## THE RESEARCH OF MODE OF DEFORMATION IN MATERIALS WITH SHAPE MEMORY EFFECT

M.A. NOZDRIN, Ph.D., Z.V. ZARUBIN, assistant

This work is devoted to the problems of mathematical simulation of material behavior with shape memory effect in case of a complex thermo-mechanical loading.

*Key words:* shape memory effect, simulation of material behavior.

Одним из путей совершенствования элементов конструкций и приборов является создание и использование материалов с заданными физико-механическими свойствами. Такими материалами, в частности, могут быть материалы с эффектом памяти формы.

Материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ) были открыты в конце 60-х гг. прошлого века. Уже через 10 лет (конец 70-х – начало 80-х гг.) появляется множество сообщений в научных журналах, описывающих различные возможности их применения. В настоящее время для МПФ определены функциональные свойства: одно- и двухсторонний эффект памяти, псевдо- или суперэластичность, высокая заглушающая способность.

Материалы с ЭПФ уже нашли широкое применение в медицине в качестве имплантируемых в организм длительно функционирующих материалов. Они проявляют высокие эластичные свойства, способны изменять свою форму при изменении температуры и не разрушаться в условиях знакопеременной нагрузки.

Сложный характер фазовых превращений мартенситного типа, происходящий в сплавах на основе никелида титана, особенно ярко проявляется в пористых структурах [1]. Фазовые переходы в таких сплавах характеризуются широким гистерезисом и продолжительным температурным интервалом, в котором материал проявляет эффект памяти формы и сверхэластичности. Кроме сплавов на основе Ni-Ti, мартенситные превращения существуют, например, в таких системах, как Pt-Ti, Pt-Ga, Pt-Al.

Важной особенностью пористого никелида титана, по сравнению с беспористым (литым) сплавом того же состава, является широкий температурный интервал фазовых превращений. Он составляет примерно 250 °С, т. е. значительно превышает интервал (30–40 °С) превращений литого сплава. Увеличение температурного интервала фазовых превращений обусловлено структурой пористого никелида титана. Существенным является также размерный фактор, поскольку мартенситное превращение в тонких перемычках и массивных областях проявляются по-разному. Действие этих факторов приводит к тому, что фазовые превращения в пористых материалах на основе никелида титана начинаются в различных областях при разных температурах, вытягивая гистерезис вдоль оси температур, соответственно расширяя температурные интервалы превращений и интервалы

проявления эффекта памяти формы и сверхэластичности.

В пористом сплаве эффект памяти формы проявляется в более широком температурном интервале, чем в литом, и остаточная пластическая деформация в пористом материале имеет более значительную величину (рис. 1).

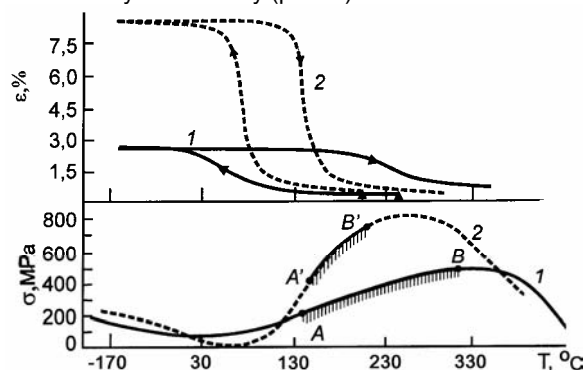


Рис. 1. Температурные зависимости эффекта обратной памяти и предела текучести в пористом (1) и литом (2) сплавах на основе никелида титана

В литом никелиде титана происходит практически полное (до 100%) восстановление формы после деформирования на 6–8% и последующего нагрева выше температурного интервала мартенситного перехода. При увеличении степени деформации литого никелида титана образуются дислокационные дефекты, которые в отличие от мартенситных превращений необратимы. Стадия обратимой деформации по мартенситному механизму сменяется стадией необратимой пластической деформации. Даже при малых нагрузках возникают участки, в которых величина упругой деформации превышает предельную. В противоположность этому в пористых сплавах даже при минимальных деформациях степень восстановления формы не превышает 85%. Степень восстановления формы зависит от пористости, распределения пор по размерам, уровня напряжений мартенситного сдвига, т.е. связана с особенностями деформирования пористых тел. Анализ деформационных зависимостей никелида титана с различной пористостью показывает, что предел текучести сплава уменьшается с увеличением пористости.

Количество научных публикаций, посвященных общим вопросам моделирования напряженно-деформированного состояния в материалах с ЭПФ, относительно невелико. Известны работы, в которых напряженно-деформированное состояние при решении термоупругопластических задач рассчитывается с применением ассоциативного закона пластического течения А.А. Ильюшина [2]. Упругопластическая составляющая модели базируется на теории пластического течения с постулатом пластичности А.А. Ильюшина, сформулированной в пятимерном пространстве девиаторов тензора деформаций. Для проведения численных расчетов применяется метод локальных функционалов, основанный на принципе виртуальных перемещений и являющийся модификацией метода конечных элементов.

В других работах рассматриваются методики решения частных задач [3, 4].

Нами предлагается методика расчета напряженно-деформированного состояния произвольной конструкции из сплава с ЭПФ. Определяющей системой уравнений являются статические уравнения механики сплошной среды в перемещениях:

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_j} + \mu \nabla^2 u_j = 0.$$

Моделирование поведения сплавов с эффектом памяти формы проводилось методом конечных элементов. Свойства сплавов с ЭПФ задавались набором линейных аппроксимаций деформационной кривой: для каждого определенного значения температуры – своя аппроксимация (рис. 2). Характерными точками деформационной кривой являются:

$\sigma_H^{am}$  – значение напряжения, вызывающего фазовый переход из аустенита в мартенсит в изотермических условиях;

$\sigma_K^{am}$  – конечное значение напряжения, превышение которого вызовет пластические деформации;

$\sigma_H^{ma}$  – значение напряжения, вызывающего фазовый переход из мартенсита в аустенит в изотермических условиях;

$\sigma_K^{ma}$  – значение напряжения, при котором происходит полная трансформация мартенсита в аустенит;

$\epsilon_{ост}$  – максимальное значение остаточной деформации.

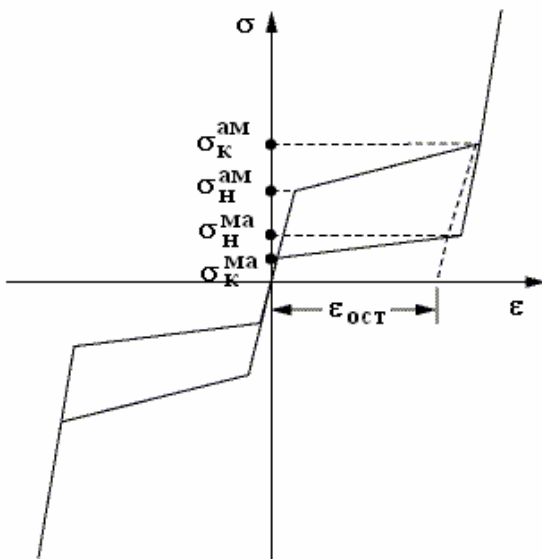


Рис. 2. Аппроксимация деформационной кривой материала с ЭПФ для заданной температуры T

Задается набор из 6 таких аппроксимаций для конкретных значений температур в диапазоне от температуры полного мартенсита  $T_M$  до температуры полного аустенита  $T_A$ .

Эффект памяти формы моделируется диаграммой зависимости деформации от температуры (рис. 3).

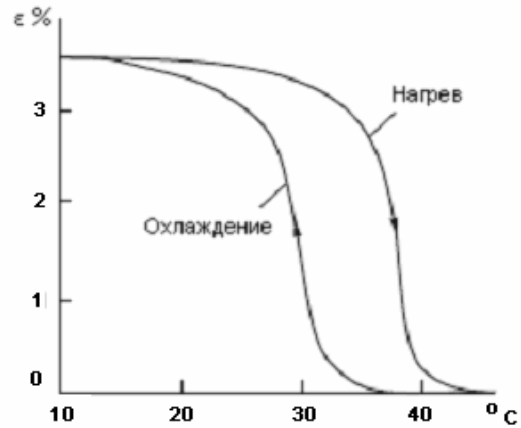


Рис. 3. График зависимости деформации от температуры для нитинола

Расчет осуществляется по следующему алгоритму:

1. С помощью метода конечных элементов рассчитывается неупругая деформация объекта при  $T_M$ , заданная системой нагрузок.

2. При увеличении температуры до  $T_1$  осуществляется переход к новому графику, из которого по значению напряжения определяется соответствующее значение деформации  $\epsilon_2$ .

3. При увеличении температуры до  $T_2$  осуществляется переход к новому графику, из которого по значению того же квазинатяжения определяется соответствующее значение деформации  $\epsilon_3$ .

4. Далее итерационно приближаемся к значению  $T_A$ , при котором  $\epsilon_{ост} = 0$ .

Рассмотрим тестовый пример. В качестве объекта моделирования выбран криволинейный стержень s-образной формы из нитинола (рис. 4). Подобные объекты применяются, в частности, в ортопедии в качестве имплантатов.

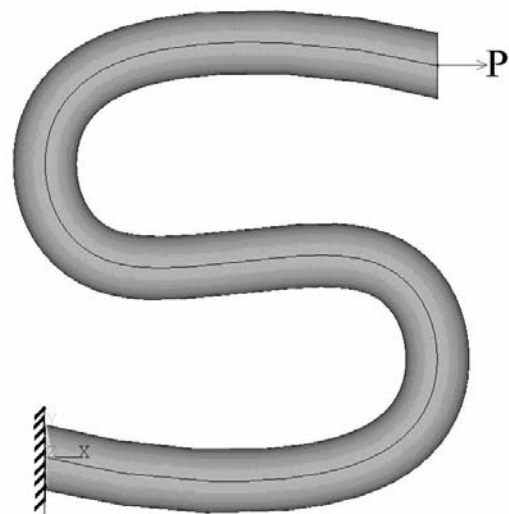


Рис. 4. Тестовый образец с приложенной нагрузкой  $P = 3000$  Н

Стержень имеет следующие параметры: диаметр нитинолового прутка  $d = 0,01$  м; длина прямых участков  $l = 0,06$ ; радиус кривизны дуговых участков  $r = 0,02$  м. Параметры материала: модуль Юнга в аустенитной фазе  $E_A = 75$  ГПа; модуль Юнга в мартенситной фазе  $E_M = 28$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; температура полного перехода в мартенситную фазу  $T_M = 10$  °С; температура полного перехода в аустенитную фазу  $T_A = 40$  °С. Следует обратить внимание на то, что используемый материал является термоактивным вследствие узкого аустенитно-мартенситного гистерезиса. Образец разбивался на тетраэдрические десятиузловые конечные элементы. Моделировались следующие этапы нагружения исследуемого объекта:

1. Закрепление одного из свободных концов стержня жесткой заделкой.

2. Неупругая деформация объекта, вызванная сосредоточенной силой при температуре, меньшей, чем  $T_M$ .

3. Постепенное повышение температуры от величины  $T_M = 10$  °С до величины  $T_A = 40$  °С.

Повышение температуры проводилось пошагово, и для каждого значения выполнялся расчет напряженно-деформированного состояния (рис. 5, 6, 7).

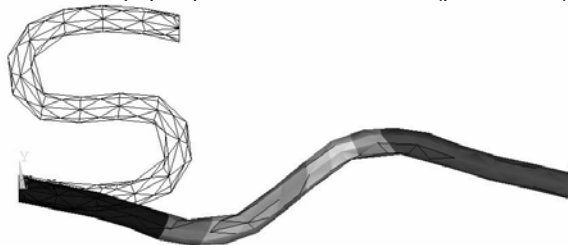


Рис. 5. Неупругая деформация образца после приложения нагрузки при температуре 10 °С

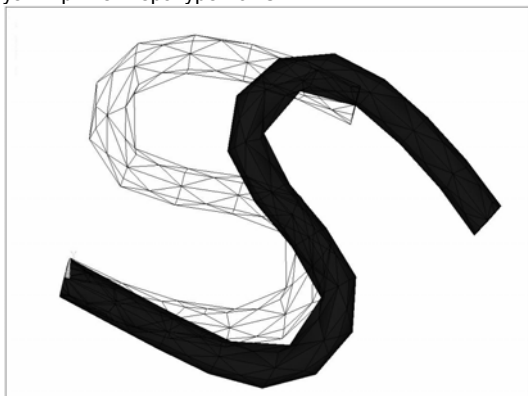


Рис. 6. Частичное восстановление формы после удаления нагрузки и нагрева до 25 °С

*Ноздрин Михаил Александрович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики,  
телефон (8-4932) 26-97-11,  
e-mail: tipm@tipm.ispu.ru

*Зарубин Захар Викторович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
ассистент кафедры теоретической и прикладной механики,  
телефон (8-4932) 26-97-11,  
e-mail: tipm@tipm.ispu.ru



Рис. 7. Восстановление формы после удаления нагрузки и нагрева до 35 °С

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при нагружении образца при температуре 10 °С возникают неупругие деформации, при постепенном нагреве образца до 40 °С наблюдается восстановление его формы.

Предлагаемая методика моделирования нитинола дает удовлетворительные результаты и может использоваться для расчета напряженно-деформированного состояния конструкций из различных сплавов с эффектом памяти формы, однако в целях дальнейшего совершенствования методики представляется необходимым проведение ряда экспериментов.

#### Список литературы

1. **Физико-механические** свойства и структура сверхэластичных пористых сплавов на основе никелида титана / В.Э. Гюнтер, Ю.Ф. Ясенчук, А.А. Клопотов, В.Н. Ходоренко // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – Вып. 1. – С. 71–76.

2. **Александрович А.И., Кувшинов П.А.** Решение трехмерной упругопластической задачи для конечного отрезка толстостенной трубы методом локальных функционалов // Известия РАН. МТТ. – 2004. – № 4. – С. 74–85.

3. **Окулов О.А., Ноздрин М.А.** Свойство памяти формы в материалах // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. XII междунар. научн.-техн. конф. студ. и аспирантов. В 3-х т. – М.: МЭИ, 2006. – Т. 3. – С. 300–301.

4. **Беляков М.В., Зарубин З.В., Ноздрин М.А.** Исследование свойств памяти формы материалов при проектировании прецизионных изделий // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 4. – С. 163.