

УДК 539.4

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

© А.Е. Волков, С.Ю. Захаров, Л.Н. Курзенева

Россия, Санкт-Петербург, СПбГУ

Volkov A.E., Zakharov S.Yu., Kurzenyova L.N. Features of simulation of shape memory materials deformation in complicated-stress conditions. This paper demonstrates the use of the improved mathematical model of shape memory, based on structural-analytical theory of strength. In fact the model has an additional scale level of averaging. It shows new model effects which shape memory materials have on the complicated-stress conditions (transformation plasticity effect, shape memory effect and reversive shape memory effect) described better than by the old model.

Экспериментальное изучение материалов с памятью формы в условиях сложного напряженного состояния выявило ряд интересных закономерностей. В частности, деформирование растяжением не повышает предел текучести для последующего кручения [1]; траектория возврата деформации есть кратчайшая прямая в пространстве деформаций [2]; наличие дополнительной компоненты напряжения оказывает подавляющее действие на способность материала генерировать реактивные напряжения и производить полезную работу [3].

Для расчета деформации материалов с памятью успешно используют структурно-аналитическую теорию прочности. Исследования показали большое значение правильного выбора операции усреднения деформаций микрообъемов при расчете деформации среды, наблюдаемой в макроопыте. При усреднении в одну стадию сразу и по ориентационным вариантам мартенсита, и по ширине термомеханического гистерезиса превращения результаты моделирования обнаруживают ряд несоответствий с экспериментом, в особенности, в условиях сложного напряженного состояния [4] (например, появляется плато на кривой генерации реактивных напряжений, что не свойственно реальному сплаву). Вариант теории с более правильным устройством оператора усреднения описан в [5] и соответствует введению дополнительного масштабного уровня усреднения. Предполагается, что представительный объем среды состоит из областей, характеризующихся значениями ширины температурного гистерезиса превращения и положением его центра на оси температур. Статистические распределения этих параметров моделируют наличие неравномерных полей внутренних напряжений. Внутри каждой такой области различают микрообласти с разными ориентациями дисторсии превращения (вариантами мартенсита).

Кристаллы мартенсита, относящиеся к какому-либо ориентационному варианту при своем росте могут занимать объем только своей области. Объемы же, имеющие одинаковые ориентации, но относящиеся к разным областям, представляют собой разные пространственные места и между собой никак не связаны. Усреднение производится сначала внутри каждой об-

ласти по ориентациям, а затем переходят к усреднению по ширине гистерезиса, то есть по всем областям.

Целью настоящей работы явилось применение названной выше модели с двухступенчатым усреднением при сложных температурно-силовых режимах нагружения сплавов с памятью формы.

Для описания использовали следующую систему соотношений:

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_{ik} &= \alpha_{ip} \alpha_{kq} \dot{\tau}_{pq}; \quad \dot{\beta}_{ik}^{\Phi} = D_{ik} \dot{\Phi}; \quad T^* = T - \frac{T_0}{q} D_{31} \tau_{31}; \\ \dot{\Phi} &= -\dot{T}^* \left\{ H(1 - \Phi_M) H(-\dot{T}^*) \frac{H(M_S - \Phi(M_f - M_S) - T^*)}{M_n - M_S} + \right. \\ &\quad \left. H(\Phi) H(\dot{T}^*) \frac{H(T^* + \Phi(A_n - A_S) - A_S)}{A_n - A_S} \right\};\end{aligned}$$

$$\Phi_M = \int_{\{\omega\}} f(\omega) \Phi d\omega;$$

$$\Phi_{\Sigma} = \int_{-\delta-D}^{\delta} \int_D \psi(S_{\delta}) \varphi(S_D) \Phi_M dS_{\delta} dS_D.$$

$$\dot{\varepsilon}_{ik}^{\Phi} = \int_{\{\omega\}} f(\omega) \alpha_{ip} \alpha_{kq} \dot{\beta}_{pq}^{\Phi} d\omega;$$

$$\varepsilon_{ik}^y = \frac{1}{E} (1 + \nu) \sigma_{ik} - \nu \sigma_{11} \delta_{ik}; \quad \varepsilon_{ik}^{полн.} = \varepsilon_{ik}^y + \varepsilon_{ik}^{\Phi}.$$

Все переменные и константы имеют тот же смысл, что и в [4]. Φ_{Σ} — характеризует количество мартенсита внутри области. Для расчетного материала принимали: $M_n = 320$ К, $M_s = 270$ К, $A_n = 350$ К, $A_s = 380$ К; ненулевые компоненты матрицы дисторсии превращения $D_{13} = D_{31} = 0,11$.

В работе приведены результаты для типичных режимов температурно-силового воздействия, инициирующих эффекты пластичности превращения и памяти формы при одновременном действии растягивающей силы и крутящего момента. При этом величины нагрузок варьировали от 0 до 500 МПа. Возникающие в про-

цессе прямого мартенситного перехода деформации сдвига и растяжения за вычетом упругих составляющих обозначали соответственно γ_{np} и ϵ_{np} , а возвращаемые при нагреве деформации — γ_{npf} и ϵ_{npf} .

Обычно при охлаждении материала с мартенситной неупругостью, нагруженного осевой силой и крутящим моментом одновременно, наблюдают эффект пластичности превращения по растягивающей и сдвиговой компонентам деформаций. При этом влияние одной нагрузки на величину эффекта по второй компоненте таково, что на первом этапе происходит линейный рост, а дальнейшее повышение напряжения приводит к падению величины пластичности превращения. Аналогичный результат был получен и в расчете.

На рис. 1 изображено влияние касательной нагрузки на эффект пластичности превращения по осевой компоненте деформации при действии растягивающего напряжения, равного 100 МПа, для «отожженного материала», не имеющего статистических распределений по ширине гистерезиса и положению его центра, (кривая 1) и с учетом статистических распределений по ширине гистерезиса и положению температуры

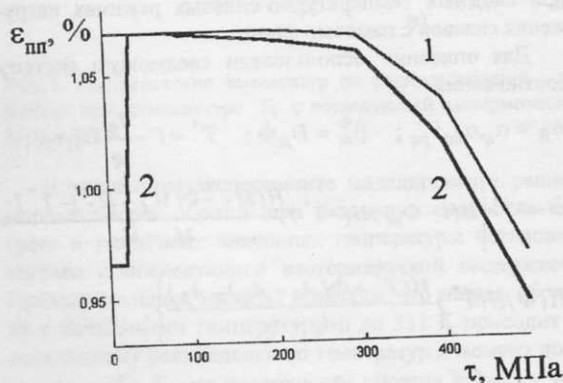


Рис. 1. Влияние касательной нагрузки на эффект пластичности превращения.

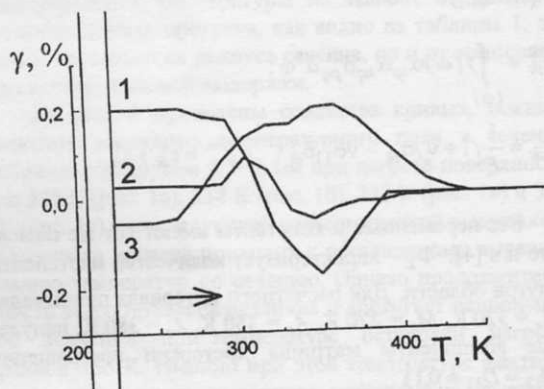


Рис. 2. Формоизменение объекта для различных вариантов статистических распределений.

T_0 , равных ± 90 К, (кривая 2). Действительно, присутствие касательных напряжений поначалу (20 - 30 МПа) способствует росту величины ϵ_{np} , а после — подавляет эффект, причем на последней стадии (после отметки 300 МПа) значительно.

Естественно ожидать, что и на характер проявления эффекта памяти формы по одной компоненте деформации также должно накладываться влияние напряжений по другой компоненте. Поскольку гипотетические материалы имели совершенную память формы, поэтому графики зависимости « $\epsilon_{np} - T$ » и « $\epsilon_{npf} - T$ » оказались тождественны. Причем силовой режим при обратном фазовом переходе не играет никакой роли — отсутствуют нагрузки, присутствуют отдельно или вместе — зависимости « $\epsilon_{npf} - T$ » будут абсолютно идентичны. Однако введение распределений ширины гистерезиса и положения его центра может порой привести к весьма неожиданным результатам. На рис. 2 изображено формоизменение объекта при нагреве под осевой нагрузкой 300 МПа после охлаждения под действием касательного напряжения 200 МПа и активного деформирования в мартенсите для различных вариантов статистических распределений: 1 — без распределений; 2 — с распределением по ширине гистерезиса; 3 — по ширине гистерезиса и температуре термодинамического равновесия. «Идеальный, тщательно отожженный материал» (случай 1) проявляет эффект реверсивной памяти формы одного типа (вогнутость вниз на кривой 1), материал, имеющий оба распределения — другого типа (выпуклость вверх на кривой 3). Интересен промежуточный случай, когда имеется распределение только по температуре T_0 . Кривая имеет два реверса. Существенно, что при других значениях остаточной деформации для всех трех случаев характер реверса сохранялся неизменным. Данный факт объясняется особенностями внутреннего устройства модельного материала. Заметим, что в реальных экспериментах один и тот же сплав может демонстрировать все три упомянутых типа поведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каменцева З.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А. Исследование деформационного упрочнения никелида титана // Проблемы прочности. 1980. Вып. 9. С. 87-92.
2. Андронов И.Н., Лихачев В.А., Рогачевская М.Ю. Эффекты памяти формы у сплава TiNiCu при сложном напряженном состоянии // Изв. вузов. Физика. 1989. № 2. С. 112-113.
3. Андронов И. Н., Богданов Н. П., Северова Н.А. Закономерности поведения никелида титана в условиях производства механической работы // Совр. вопр. физ. и мех. материалов. С.-Пб., 1997. С. 178-182.
4. Горошко О.А., Курзенева Л.Н. Влияние термодинамических характеристик гипотетических материалов с памятью на эффект генерации реактивных напряжений // Там же. С. 112-117.
5. Likhachev V.A. Theory of martensitic unelasticity of crystals // Abst. of Int. MECAMAT95. (La Bresse, May 16-19, 1995.) La Bresse, France, 1995. P. C1-321-C1-333.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 97-01-00823.