УДК 539.3:669.018.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВОВ ТИПА ЖЕЛЕЗО-МАРГАНЕЦ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ

© А.Е. Волков, М.Е. Евард, А.А. Костина

Россия, Санкт-Петербург, Институт математики и механики СПбГУ

Volkov A.E., Evard M.E., Kostina A.A. Modelling of mechanical behavior of Fe-Mn-type alloys at cyclic variations of temperature. An account of crystallographic features of fcc-hcp transformation as well as of plastic accomodation of martensite has allowed describing accumulation of strain under a constant stress at cyclic variations of temperature. The model also gives the recovery of this strain at subsequent thermal cycles when the stress is removed.

При охлаждении материала, подверженного термоупругому мартенситному переходу, в напряженном состоянии через интервал температур прямой реакции происходит накопление деформации за счет пластичности превращения, а при последующем нагреве – возврат этой деформации (эффект памяти формы) в результате обратной реакции. Такое поведение характерно, например, для никелида титана и сплавов на медной основе [1]. Совершенно по-иному ведут себя железомарганцевые сплавы, мартенситное превращение в которых имеет взрывной характер. Согласно экспериментальным данным [2], пластичность превращения воспроизводится и при охлаждении, и при нагреве нагруженного образца, в результате чего происходит весьма значительное суммарное формоизменение материала. Теоретический анализ термоциклического поведения сплавов, похожих на никелид титана [3], доказал возможность применения структурно-аналитического подхода [4] для прогнозирования свойств таких объектов. Однако систематического моделирования поведения сплавов типа железо-марганец при циклическом изменении температуры до сих пор не было предпринято. Вместе с тем такой анализ необходим, поскольку при проектировании длительно работающих деталей и устройств из сплавов с памятью формы (СПФ) изучение закономерностей накопления деформации в этом режиме становится особенно важным. Здесь предпринята попытка решения этой задачи в рамках структурно-аналитической модели, которая допускает естественное обобщение, позволяющее использовать ее для описания поведения материалов типа железомарганец [5].

В соответствии с идеями, развитыми в [5], в уравнение, определяющее кинетику образования кристаллов новой фазы, для таких материалов необходимо вводить ограничения на предельно большой Φ^{o} (при охлаждении) и предельно малый $\Phi^{н}$ (при нагреве) допустимые размеры кристаллов мартенсита. При этом отрицательный размер кристалла мартенсита появляется, когда данный вариант обратного превращения реализуется на кристаллах мартенсита, полученных посредством не рассматриваемого, а других вариантов прямого превращения. Согласно [6], удовлетворительные результаты получаются при $\Phi^{o} = 5$, $\Phi^{н} = -4$. Кроме того, в работе [7] показано, что при моделировании свойств железомарганцевых сплавов для лучшего соответствия экспериментальным данным приходится учитывать разброс по статистическим параметрам материала – ширине температурного гистерезиса и положению его центра.

Рассматривали математический объект, который определялся системой уравнений, приведенной в [5]. Свойства материала в обозначениях [5] характеризовали следующими константами: $\Phi^{o} = 5$, $\Phi^{н} = -4$, $q_0 = -63$ МДж/м^3, $D_{31} = D_{13} = 0{,}075$ (все остальные $D_{ik} = 0$), $M_к = 320$ К, $M_н = 370$ К, $A_н = 470$ К, $A_к = 520$ К. Предполагали, что минимальное и максимальное отклонение ширины гистерезисной фигуры от среднего значения составляет 75 К, а минимальное и максимальное отклонение положения ее центра – 50 К. Составляющие упругих и тепловых деформаций не учитывали. Все расчеты выполняли для режима одноосного нагружения.

Исследовали влияние величины приложенной нагрузки на характер деформирования материала при циклических изменениях температуры. С этой целью объект, находящийся в мартенситном или аустенитном состоянии, нагружали, а затем производили термоциклирование в интервале температур 200–620 К. Характерные зависимости деформации от температуры приведены на рис. 1.

Видно, что математический объект накапливает деформацию как при прямом, так и при обратном превращении. При этом величина накапливаемой деформации от цикла к циклу уменьшается до тех пор, пока не происходит стабилизации состояния. Оказалось, что при больших действующих напряжениях стабилизация достигается позже, чем при малых (рис. 2), причем число циклов до стабилизации N одинаково для опытов, изображенных на рис. 1а и б. Эти результаты соответствуют данным прямых наблюдений на железомарганцевых сплавах [2], хотя в реальном эксперименте для достижения устойчивого состояния требуется большее число циклов. Кроме того, расчет показал, что при термоциклировании происходит понижение температуры начала прямого мартенситного перехода $A_н$ напряженного материала (рис. 3), которое обычно объясняют лишь увеличением плотности дислокаций ростом числа циклов [8].

Таким образом, структурно-аналитическая модель, учитывающая особенности мартенситного превращения в данных материалах, демонстрирует возможность удовлетворительного описания одностороннего формоизменения при теплосменах. Причем в рамках такого подхода этот эффект вызван исключительно эволюцией фазового состава материала, а не обусловлен накоплением необратимой пластической деформации.

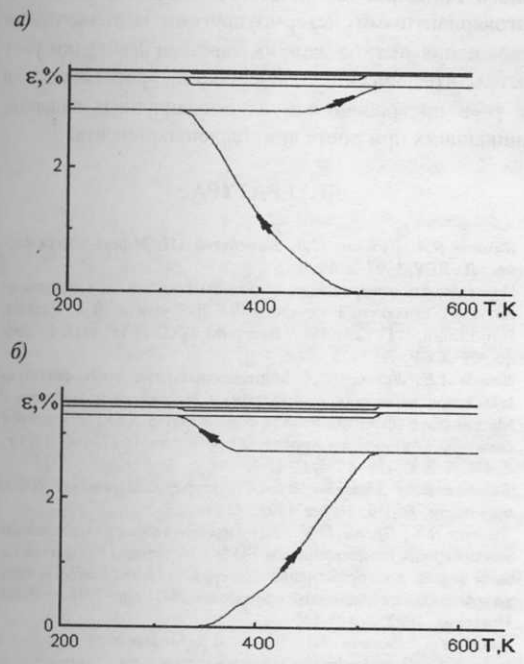

Рис. 1. Зависимость деформации от температуры при охлаждении (а) или нагреве (б) под постоянной нагрузкой 150 МПа и последующем термоциклировании в интервале 200–600 К.

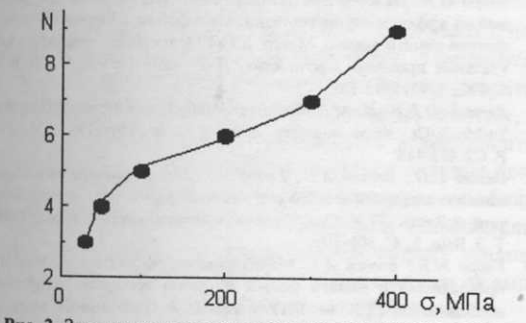

Рис. 2. Зависимость числа циклов до достижения стабильного состояния от напряжения при термоциклировании в интервале 200–600 К.

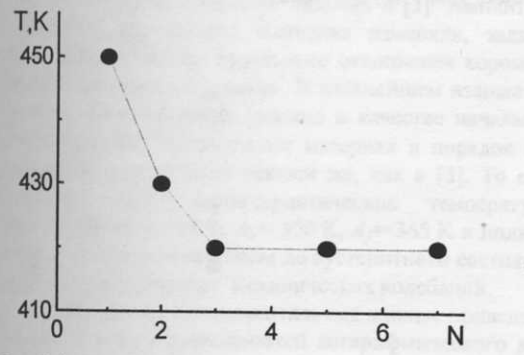

Рис. 3. Зависимость температуры $M_н$ от числа термоциклов под постоянной нагрузкой 150 МПа.

Вместе с тем, отсутствие учета микропластической деформации, возникающей при росте мартенситного кристалла и вызывающей частичную аккомодацию мартенсита и релаксацию межфазных напряжений, приводит к тому, что стабилизация состояния модельного материала происходит за 3–5, в то время как в реальном эксперименте сплав продолжает деформироваться на протяжении нескольких десятков термоциклов, а после такого длительного термотренинга способен к формоизменению при циклическом изменении температуры и в разгруженном состоянии.

Для учета микропластических явлений, связанных с ростом кристаллов новой фазы, использовали предложенную в [9] модель с учетом кристаллографических особенностей протекающего в железомарганцевых сплавах γ↔ε превращения [10]. Начальное значение предела микротекучести F_0^y = 10 МПа выбрали таким образом, чтобы микропластичность (а следовательно, и недовозврат деформации при последующем нагреве) проявлялась даже при малой величине (10 МПа) приложенной нагрузки. Модуль микроупругости g_m = 81 ГПа. Значение модуля микропластичности h_m варьировали.

Исследовали влияние величины h_m на кинетику накопления деформации при термоциклировании в полном интервале температур фазовых переходов под постоянной нагрузкой. С этой целью объект, находящийся в мартенситном или аустенитном состоянии, нагружали растягивающим напряжением 50 МПа, а затем производили термоциклирование в интервале температур 200–620 К. Характерная кривая зависимости деформации от температуры для h_m = 2 МПа приведена на рис. 4. Видно, что математический объект накапливает деформацию как при прямом, так и при обратном превращении в течение многих циклов. При этом величина накапливаемой деформации от цикла к циклу медленно уменьшается.

Рис. 5 иллюстрирует влияние величины модуля микропластичности h_m на максимальную деформацию, накопленную за N циклов. Ясно, что путем подбора констант можно добиться хорошего соответствия результатов расчета и экспериментальных данных для широкого спектра материалов.

Для любых значений внешней нагрузки и констант материала при термоциклировании происходит понижение температуры начала прямого мартенситного перехода $M_н$ напряженного материала, аналогичное изображенному на рис. 3.

Если же после длительного термоциклирования под нагрузкой объект разгрузить и продолжать циклически нагревать и охлаждать через интервал температур фазового перехода, то как при обратном, так и при прямом превращении происходит возврат деформации благодаря сформированным в процессе тренировки внутренним микронапряжениям, связанным с аккомодационными процессами (рис. 6). Наиболее интенсивный в первых полуциклах, процесс возврата постепенно затухает, и материал в конце-концов перестает

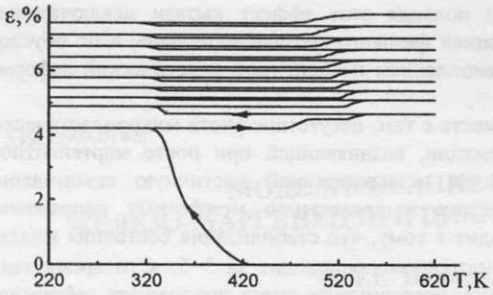

Рис. 4. Зависимость деформации от температуры охлаждения под постоянной нагрузкой 50 МПа и последующем термоциклировании в интервале 220–620 К.

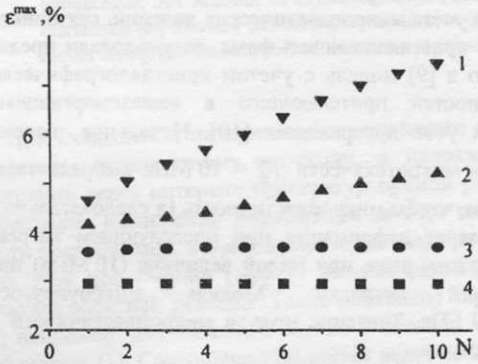

Рис. 5. Величина максимальной деформации образца, накопленной за N циклов при термоциклировании в полном интервале температур мартенситного превращения под нагрузкой 50 МПа для различных значений модуля h_m: 2 (1), 5 (2), 7 (3), 65 (4) МПа.

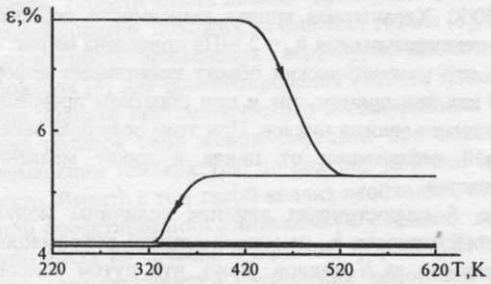

Рис. 6. Зависимость деформации от температуры при циклировании без нагрузки в полном интервале температур превращения после предварительной тренировки (рис. 4).

деформироваться. Данный эффект, наблюдаемый экспериментально [11], в рамках структурно-аналитической теории до сих пор описать не удавалось.

Результаты моделирования показывают, что для верного описания циклического поведения сплавов с многовариантными нетермоупругими мартенситными превращениями типа железо–марганец необходим учет кристаллографических особенностей протекающего в них γ↔ε превращения и аккомодационных явлений, возникающих при росте кристаллов мартенсита.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П.* Эффект памяти формы. Л.: ЛГУ, 1987. 216 с.
2. Пластичность превращения и механическая память в железомарганцевых сталях при кручении / С.Л. Кузьмин, В.А. Лихачев, В.В. Рыбин, О.Г. Соколов // Препринт 489 ОЛФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1975. 52 с.
3. *Волков А.Е., Лихачев В.А.* Мартенситная неупругость, реализующаяся при вариациях температуры в ограниченном интервале // Материалы с эффектом памяти формы: Матер. XXXI Межреспубл. семинара «Актуальные проблемы прочности» 13-17 нояб. 1995 г., С.-Пб. Ч. 3. С.-Пб., 1995. С. 41-46.
4. *Лихачев В.А., Малинин В.Г.* Структурно-аналитическая теория прочности. С.-Пб.: Наука, 1993. 471 с.
5. *Лихачев В.А., Эрглис И.В.* Аналитическая теория функционально-механических свойств сплавов FeMn // Материалы с эффектом памяти формы и их применение: Матер. XXVI Межреспубл. семинара «Актуальные проблемы прочности» 20-21 апр. 1992 г., С.-Пб. Новгород, 1992. С. 104-109.
6. *Евард М.Е., Лихачев В.А., Эрглис И.В.* Моделирование эффектов пластичности превращения и памяти формы с учетом ограничения на размер кристалла мартенсита // Материалы со сложными функционально-механическими свойствами. Компьютерное конструирование материалов: Матер. XXX Межреспубл. семинара «Актуальные проблемы прочности», 16-19 мая 1994 г., Новгород. Ч. 1. Новгород, 1994. С. 61-70.
7. *Евард М.Е., Лихачев В.А.* Влияние характера мартенситных реакций на эффекты неупругости и памяти формы // Материалы с эффектом памяти формы: Матер. XXXI Межреспубл. семинара «Актуальные проблемы прочности», 13-17 нояб. 1995 г., С.-Пб. Ч.3. С.-Пб., 1995. С.11-18.
8. *Perez-Saez R.B., No M.L., San Juan J.* Influence of thermal cycling in a Fe-Mn-Si-Cr shape memory alloy // J. de Phys. 1995. V. IV. P. C2-443-448.
9. *Беляев С.П., Волков А.Е., Евард М.Е.* Моделирование микропластических явлений в сплавах с памятью формы типа никелида титана // Вестн. ТГУ. Сер. Естеств. и технич. науки. Тамбов, 1998. Т. 3. Вып. 3. С. 306-309.
10. *Евард М.Е., Волков А.Е.* Моделирование эффектов пластичности превращения и памяти формы с учетом кристаллографических особенностей ГЦК ↔ ГПУ перехода // Современные вопросы физики и механики материалов: Матер. XXXII семинара «Актуальные проблемы прочности», 12-14 нояб. 1997 г., С.-Пб. С.-Пб., 1997. С. 199-207.

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