

УДК 539.4

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МАТЕРИАЛАХ С ЭПФ

© Ю.Н. Вьюненко, Л.Ф. Вьюненко

Россия, Санкт-Петербург, НТФ «Вольта», ПГУПС

Vyunenko Yu.N., Vyunenko L.F. Temperature fields evolution in materials with SME. Computer-aided modelling of shape memory alloys behaviour focused on temperature fields evolution is accomplished on the base of a previously developed theoretical approach. The influence of isothermal sustain temperature on temperature distribution in cylindric TiNi samples and their warming up-times is investigated.

Сложность и многообразие факторов, воздействующих на поведение материалов во время трансформации кристаллической решетки, определяет важность исследований температурных полей в области температур превращения. С технической точки зрения особый интерес представляет изучение эволюции температурных полей при переводе деталей и узлов из одних тепловых условий в другие с частичным или полным переходом при теплосменах интервала температур превращения.

В работе решалась задача моделирования процесса распространения тепла по протяженному образцу круглого сечения, изготовленному из модельного изотропного материала, близкого по своим физико-механическим свойствам к TiNi эквивалентного состава. Исследования проводились в рамках теоретического подхода к описанию ЭПФ, основные положения которого изложены в работах [1 - 3]. В соответствии с этим подходом в основу математической модели поставленной задачи было положено двумерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

в котором $T = T(x, y, t)$ - значение температуры в точке с координатами (x, y) в момент времени t , коэффициент A зависит от теплопроводности материала k , плотности ρ и удельной теплоемкости c :

$$A = \begin{cases} \frac{k}{c\rho}, T < T_H, T > T_K \\ \frac{k}{c\rho + c_1\rho} \frac{(T - T_H)(T_K - T)}{(T_K - T_H)^2}, T_H \leq T \leq T_K \end{cases} \quad (2)$$

Характеристика материала c_1 в (2) находится из условия

$$\int_{T_H}^{T_K} c_1 \frac{(T - T_H)(T_K - T)}{(T_K - T_H)^2} dt = H,$$

где H - теплота превращения.

При выборе численных значений параметров материала использованы данные [4], в частности, интервал температур превращения (T_H, T_K) был принят равным (333 К, 343 К). Отметим, что относительно коэффициента теплопроводности k нитинола в литературе встречаются противоречивые данные - от 0,001 Вт/см/град до 0,02 Вт/см/град. Для определения значения этого коэффициента был проведен численный эксперимент по определению времени прогрева образцов после остановки нагрева при $T = T_0$ для двух значений k , результаты которого приведены в таблице 1, время прогрева указано в секундах.

Сравнение полученных результатов с данными [5] о временах изменения параметров демпфирования колебаний в изотермических условиях для сплава TiNi позволило выбрать для дальнейших расчетов значение $k = 0,001$ Вт/см/град.

В качестве расчетного метода использован простейший вариант метода сеток, позволяющий строить решение смешанной краевой задачи для уравнения (1) послышным заполнением сетки по схеме «бегущего счета». Устойчивость соответствующей методу разностной схемы гарантирована соотношением шагов сетки по пространственным переменным dx и по времени dt

$$dt \leq \frac{dx^2}{4 \max A}.$$

Таблица 1.

Время прогрева образцов
после остановки нагрева при $T = T_0$

k , Вт/см/град	T , К	R , мм		
		1	2	5
0,001	338	254	1398	5750
	343	142	548	3400
0,02	338	24	50	300
	343	17	36	175

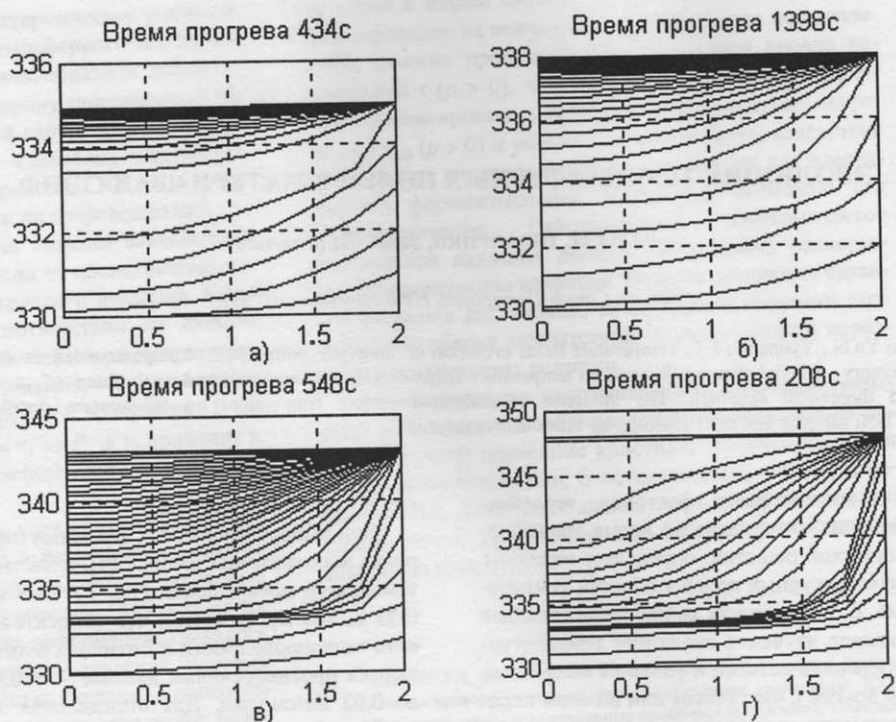


Рис. 1. Распределение температур по радиусу образца круглого сечения при равномерном нагреве с поверхности и остановке нагрева при температуре T_0 с последующей изотермической выдержкой: а) $T_0 = 335$ К, б) $T_0 = 338$ К, в) $T_0 = 343$ К, г) $T_0 = 348$ К.

В численном эксперименте моделировался равномерный нагрев образца при различных скоростях нагрева и различных значениях температуры остановки нагрева с последующей изотермической выдержкой. Предварительные расчеты показали, что нагрев образца с начальными температурами до 331 К приводит к одинаковому распределению температур в момент достижения $T = T_H$ на поверхности образца, поэтому начальная температура в расчетах принималась равной 330 К. Из результатов, полученных для образцов с радиусом сечения 1 мм, 2 мм, 5 мм следует, что характер распределения температуры не зависит от размеров сечения. Время прогрева, как видно из таблицы 1, зависит не только от радиуса сечения, но и от температуры изотермической выдержки.

На рис. 1 приведены семейства кривых, показывающие эволюцию температурного поля в сечении образца с радиусом $R = 2$ мм при нагреве поверхности до 335 К (рис. 1а), 338 К (рис. 1б), 343 К (рис. 1в) и 348 К (рис. 1г) с последующей изотермической выдержкой. Остановка нагрева приводит к постепенному выравниванию температур по сечению. Однако продолжительность этого процесса различна и достигает наибольшего значения при температуре остановки нагрева, равной 338 К. Именно при этой температуре фактическая теплоемкость материала максимальна, вместе с тем температура поверхности такова, что обеспечивается минимальный подвод тепловой энергии.

Если на рис. 1а-в кривые распределения температуры по радиусу сечения обладают традиционной формой, то на рис. 1г часть кривых имеет перегиб. Эта особенность может быть объяснена тем, что после про-

грева материала во внешних слоях до температур выше T_K теплоемкость значительно снижается, поэтому нагрев внешних слоев происходит быстро, а поступление тепла к центру сечения «блокируется» фазовым превращением. Это и приводит к необычному распределению температур в случае остановки нагрева при $T > T_K$.

Исследования многих авторов показали сильную зависимость свойств материалов с ЭПФ от вида термомеханической обработки. Полученные в настоящей работе результаты обнаруживают принципиальную возможность задания нужного распределения физико-механических свойств деталей и элементов конструкций соответствующим выбором температурного воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вьюненко Ю. Н., Сырковская Л. Е. Расчет температурного поля в нитиноловом цилиндре // Материалы с новыми функциональными свойствами: Матер. семинара. Новгород, 1990. С. 134.
2. Вьюненко Ю. Н. Об одном механизме проявления ЭПФ // Актуальные проблемы прочности: Тез. докл. / Первая междунар. конф. Новгород, 1994. С. 126.
3. Вьюненко Л. Ф., Вьюненко Ю. Н., Ларионов М. А., Сырковская Л. Е. «Дефект» модуля упругости, сдвиги температур и ЭПФ // Материалы со сложными функционально-механическими свойствами. Компьютерное конструирование материалов: Сб. докл. / XXX Межресп. семинар «Актуальные проблемы прочности». Новгород, 1994. С. 28.
4. Корнилов И. И., Белоусов О. К., Качур Е. В. Никелид титана и другие сплавы с памятью формы. М., 1977. 178 с.
5. Вьюненко Ю. Н., Лихачев В. А. Временная зависимость внутреннего трения в никелиде титана вблизи температур фазового превращения // Металлофизика. 1980. Т. 2. № 6. С. 52-56.