

УДК 621.01: 539.5

Экспериментальное определение параметров диаграммы фазовых переходов для сплава с эффектом памяти формы

С.М. Ганыш, С.С. Гаврюшин, И.Н. Андронов

Изложена методика экспериментального определения параметров диаграммы фазовых переходов для сплавов с эффектом памяти формы. Проведены экспериментальные исследования с образцами, изготовленными из сплава с эффектом памяти формы ТН-1. Выполнена обработка полученных экспериментальных данных, проведено сравнение экспериментальных и аналитических кривых нагружения для цилиндрического образца.

Ключевые слова: сплав с эффектом памяти формы, зоны фазовых переходов, экспериментальное определение параметров.

Experimental determination of shape memory alloy parameters for phase transformations zones

S.M. Ganysh, S.S. Gavryushin, I.N. Andronov

The method to determine experimentally the shape memory alloy parameters phase transformations zones is presented. The pilot studies with specimens, produced from the TN-1 shape memory alloy have been carried out. The obtained experimental data have been processed, the experimental and analytical curves of loading the cylindrical specimens have been compared.

Keywords: shape memory alloy, zones of phase transformations, experimental determination of parameters.

Сплавы с эффектом памяти формы получили широкое распространение в медицине, авиакосмической технике, строительстве, приборостроении и других областях науки и техники [1–4].

В настоящее время для расчета элементов и конструкций из сплавов с эффектом памяти формы применяют различные математические модели, описывающие поведение материала. Авторами настоящей статьи использована модель, основанная на диаграмме фазовых переходов, предложенная в работе [1]. Диаграмма фазовых переходов в координатах $T - \tau$ для образца, работающего на кручение, представлена на рис. 1.

В работе [5] приведена математическая модель для сплошного цилиндрического образца, созданная на основе диаграммы фазовых переходов. Операторная форма дифференциальных уравнений, описы-



ГАНЫШ
Святослав Мирославович
аспирант, ассистент
кафедры «Прикладная
механика»



ГАВРЮШИН
Сергей Сергеевич
доктор технических наук,
профессор, зав кафедрой
«Компьютерные системы
автоматизации
производства»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



АНДРОНОВ
Иван Николаевич
доктор технических наук,
профессор, проректор
по научной работе
(Ухтинский
государственный
технический университет)
e-mail: holyslavik@yandex.ru

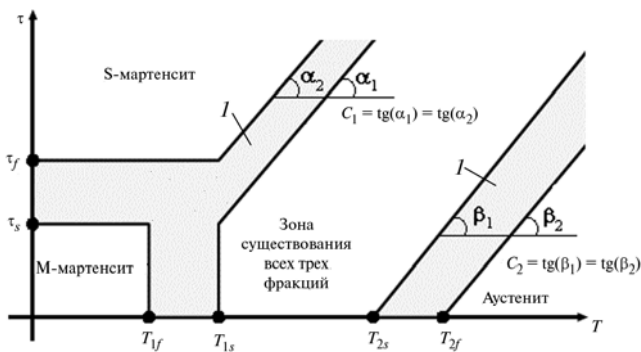


Рис. 1. Диаграмма фазовых переходов материала с эффектом памяти формы:

τ — касательное напряжение T — температура;
 I — зоны фазовых превращений

вающих поведение материала, представлена ниже:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_S &= F(\xi_S, \xi_M, \tau, \dot{\tau}, T, \dot{T}, H^i); \\ \dot{\xi}_M &= F(\xi_S, \xi_M, \tau, \dot{\tau}, T, \dot{T}, H^i), \end{aligned} \quad (1)$$

где ξ_S — объемная доля ориентированного мартенсита; ξ_M — объемная доля неориентированного мартенсита; τ — касательные напряжения; T — температура; H^i — функции-переключатели, отвечающие за активацию процессов фазовых переходов.

В развернутой форме уравнения (1) представлены в работе [5]. К параметрам диаграммы фазовых переходов, подлежащих экспериментальному определению, относятся следующие:

- характерные температуры материала: T_{1f} , T_{1s} , T_{2s} , T_{2f} ;
- характерные значения напряжений фазовых переходов: τ_s , τ_f ;
- угловые коэффициенты наклона границ зон фазовых переходов диаграммы C_1 , C_2 (модель материала строится в предположении равенства углов наклона границ $\alpha_1 = \alpha_2$, $\beta_1 = \beta_2$).

Экспериментальные исследования проводились на специальной установке, спроектированной и изготовленной в Ухтинском государственном техническом университете (рис. 2). Экспериментальная установка позволяет исследовать поведение стержневых образцов, работающих на кручение и растяжение-сжатие,

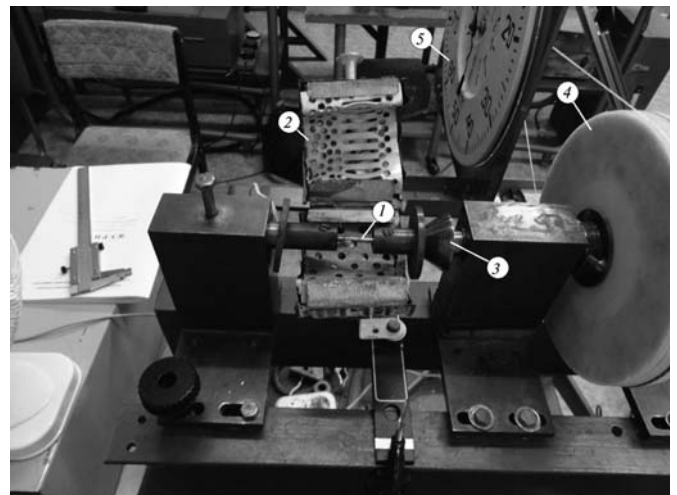


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки:

1 — образец; 2 — электропечь; 3 — захват; 4 — блок для передачи нагрузки; 5 — измерительное табло

при различных температурных воздействиях и различном уровне нагружения.

Перед проведением эксперимента образец подготавливается к испытаниям. Для снятия остаточных микронапряжений в образце, связанных с механической обработкой при его изготовлении, применяется холодный отжиг: партия образцов помещается в муфельную печь, разогретую до температуры 500...550 °С и выдерживается в течение 1 ч с последующим остыванием на воздухе. После отжига образец термоциклируется при невысоком уровне нагружения до перехода материала в установившийся режим [6].

Эксперименты проводились со сплошными круглыми цилиндрическими образцами, изготовленными из сплава ТН-1. Важно отметить, что более точные результаты эксперимента могут быть получены на тонкостенных образцах круглого поперечного сечения, однако их изготовление дорого и трудоемко по сравнению с круглыми сплошными образцами.

Для определения характерных температур фазовых переходов T_{1f} , T_{1s} , T_{2s} , T_{2f} применялась методика, описанная в работе [6]:

- ненагруженный образец, находящийся в состоянии неориентированного мартенсита, нагревается до температуры, выше ожидаемой температуры фазового перехода T_{2f} ;

- образец нагружают моментом, создающим в образце максимальные касательные напряжения, величиной 40...50 МПа;
- образец охлаждается до полного перехода аустенита в ориентированный мартенсит;
- с образца снимается действующая на него нагрузка, после чего он нагревается до температуры, выше ожидаемой температуры фазового перехода T_{2f} ;
- образец охлаждается до полного перехода аустенита в неориентированный мартенсит.

На рисунке 3 представлена экспериментальная зависимость между температурой и угловой деформацией, полученная по описанной выше методике.

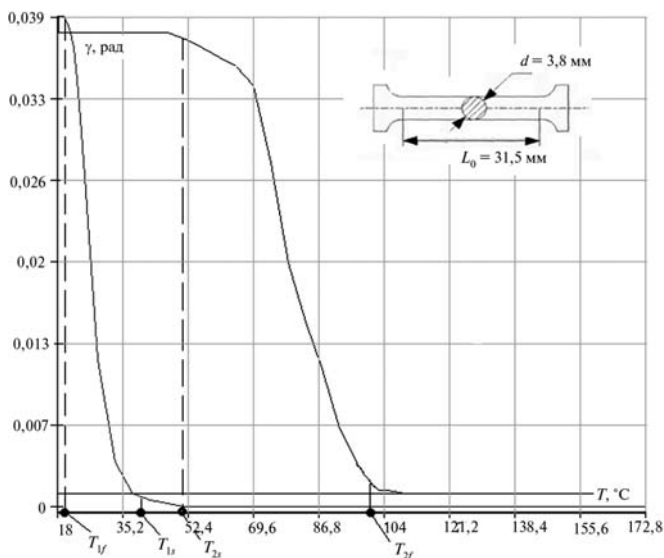


Рис. 3. Зависимость между температурой от угловой деформации для определения характерных температур фазовых переходов

Эксперимент проводился для партии из 16 образцов. Экспериментальные данные обрабатывались согласно методике, описанной в работе [7]. В результате эксперимента получены следующие значения температур фазовых переходов:

Температура	Значение, °C
T_{1s}	40
T_{1f}	20
T_{2s}	50
T_{2f}	100

Для определения начального и конечного напряжений фазового перехода предварительно подготовленный образец, находящийся при температуре ниже T_{1s} , нагружают моментом $M^* = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$, и получают зависимость $\gamma(M)$, представленную на рис. 4.

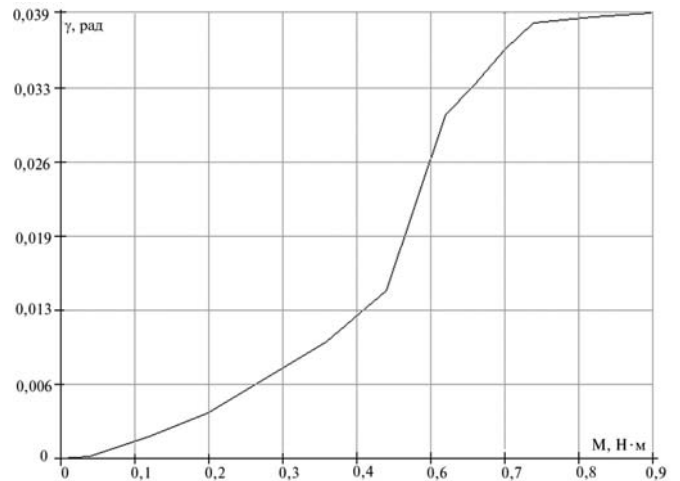


Рис. 4. Зависимость крутящего момента, действующего на образец, от угловой деформации при постоянном значении температуры

Напряжение τ_s соответствует началу фазового превращения, поэтому при его определении можно считать справедливым линейное распределение касательных напряжений по сечению. Отсюда значение напряжения при текущем значении температуры

$$\tau_s^* = \frac{16M_s^*}{\pi d^3}, \quad (2)$$

где M_s^* — значение момента, при котором линейный участок зависимости начнет переходить в нелинейный; d — диаметр образца.

При определении касательного напряжения τ_f возникает проблема, обусловленная с неравномерным распределением касательных напряжений в сплошном цилиндрическом образце, вследствие которого формула (2) становится неприменима. В связи с этим, возникает необходимость использования методов регрессионного анализа.

С помощью системы уравнений (1) строится аналитическая зависимость $\gamma(M)$, соответствующая экспериментально полученной зависимости. Для такой аналитической зависимости известны все параметры, кроме величины

τ_f , которая подбирается исходя из условия близости экспериментальной и аналитической зависимостей с привлечением метода наименьших квадратов [7].

В результате были получены следующие значения величин касательных напряжений τ_s и τ_f :

Касательное напряжение	Значение, МПа
τ_s	0
τ_f	69

Для экспериментального определения угловых коэффициентов наклона границ зон фазовых переходов C_1, C_2 были выполнены следующие действия:

- подготовленный к эксперименту образец нагружался крутящим моментом M^* , вызывающим фазовый переход неориентированного мартенсита в ориентированный мартенсит. Нагрузка в работе производилась следующими крутящими моментами M^* : 0,15; 0,25; 0,35; 0,45; 0,55; 0,65; 0,75; 0,85 Н·м;

- образец, нагруженный моментом M^* при температуре T_{1f} , нагревался до температуры, выше температуры фазового перехода T_{2f} до полного фазового перехода ориентированного мартенсита в аустенит, после чего он охлаждался до полного перехода аустенита в ориентированный мартенсит, т. е. до температуры ниже чем T_{1f} .

Получаемая по описанной выше методике зависимость между температурой и угловой деформацией представлена на рис. 5.

На рисунке 5 характерные точки процесса $M1, M2$ соответствуют началу и окончанию процесса перехода мартенсита в аустенит, точки $N3, N4$ — началу и окончанию процесса перехода аустенита в мартенсит. Неравномерное распределение касательных напряжений по сечению не позволяет использовать точки $M1$ и $M4$ для определения угловых коэффициентов наклона границ зон фазовых переходов, поэтому для определения коэффициента C_1 используется только точка $N3$, а для определения коэффициента C_2 — точка $M2$.

Экспериментальные зависимости аппроксимировались аналитическими с помощью соотношений (1) методом регрессионного

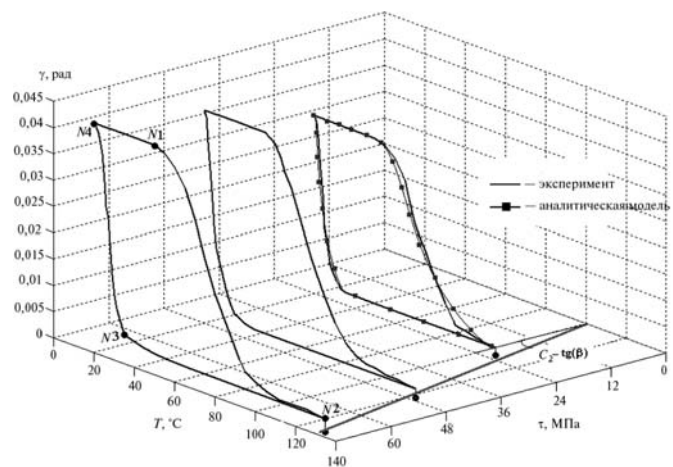


Рис. 5. Зависимость температуры, действующей на образец, от угловой деформации при постоянном значении крутящего момента

анализа. По соотношениям (1) можно определить значение касательного напряжения в точках $N2, N3$, а значения коэффициентов C_1, C_2 можно рассчитать по следующим формулам:

$$C_1^* = \frac{\tau^* - \tau_s}{T^* - T_{1s}}; \quad (3)$$

$$C_2^* = \frac{\tau^*}{T^* - T_{2s}}.$$

В результате были получены следующие значения угловых коэффициентов наклона границ диаграммы фазового перехода:

Угловой коэффициент	Значение, МПа/ °С
C_1	4,5
C_2	3

Для проверки полученных в результате эксперимента параметров диаграммы фазовых переходов сплава с эффектом памяти формы, были построены аналитические зависимости, которые сравнивались с экспериментальными (см. рис. 5).

Представленная в работе методика экспериментального определения параметров была использована для проектирования винтовых цилиндрических пружин, изготовленных из материала с эффектом памяти формы. Методика может быть рекомендована для проектирова-

ния упругих элементов силовых приводов и термодатчиков.

Литература

1. *Auricchio F.* Shape Memory Alloys: applications, micromechanics, macromodelling and numerical simulations. California: Berkeley, 1995, 163 с.
2. *Шишкин С.В., Махутов Н.А.* Расчет и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2007. 412 с.
3. *Melton K.R.* General applications of shape memory alloys and smart materials, in: K. Otsuka, C.M. Wayman (Eds.) // Shape Memory Materials, Cambridge. Cambridge University Press, 1999. Ch.10. P. 220—239.
4. *Song G, Ma N., H.-N. Li.* Applications of shape memory alloys in civil structures // Engineering Structures. 28 (2006). P. 1266—1274.
5. *Гаврюшин С.С., Ганыш С.М.* Численное моделирование процессов деформирования элемента в форме винтовой цилиндрической пружины, выполненного из материала с эффектом памяти формы // Известия вузов Машиностроение. 2012. № 8. С. 15—20.
6. *Андронов И.Н., Богданов Н.П., Вербаховская Р.А., Северова Н.А.* Механические свойства материалов с эффектом памяти формы при сложном температурно-силовом воздействии и ортогональном нагружении: монография / Под ред. И.Н. Андропова. Ухта: УГТУ, 2010. 191 с.
7. *Протасов К.В.* Статистический анализ экспериментальных данных. М.: Мир, 2005. 142 с.

Статья поступила в редакцию 17.09.2012