

05

Межфазные напряжения и аномальный вид кривых термоупругой деформации сплава Cu–Al–Ni с эффектом памяти формы

© Г.А. Малыгин, В.И. Николаев, С.А. Пульнев, А.В. Чикиряка

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: malygin.ga@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 31 мая 2017 г.

Исследованы кривые термоупругой деформации монокристаллов сплава Cu–13.5 wt.% Al–4.0 wt.% Ni с эффектом памяти формы (ЭПФ). Найдено, что при циклическом изменении температуры в интервале 300–450 К петли термоупругого гистерезиса монокристаллических образцов имеют аномальный вид и содержат участки ускоренного изменения термоупругой деформации как при нагреве, так и при охлаждении. Обнаруженный эффект может быть использован для увеличения быстродействия силовых и сенсорных устройств на основе сплавов с ЭПФ. Теоретический анализ эффекта в рамках теории размытых мартенситных переходов показал, что аномальный характер петель гистерезиса может быть обусловлен влиянием межфазных напряжений на динамику мартенситных превращений в рассматриваемых сплавах.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.24.45339.16894

Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) нашли применение в промышленности, медицине, космонавтике как рабочие элементы различных технических устройств. По мере роста числа исследований открываются новые функциональные возможности этих сплавов. Так, в последнее время внимание исследователей привлек необычный вид диаграмм сжатия монокристаллических образцов сплавов с эффектом памяти формы, таких как Cu–Al–Ni [1] и Ni–Fe–Ga–Co [2,3]. Диаграммы сжатия указанных кристаллов содержали аномально большие (до 30–50%) и продолжительные (2–4% деформации) участки снижения деформирующего напряжения. Оказалось, что при нагреве восстановление деформации памяти формы у этих кристаллов имеет взрывообразный характер и протекает в сверхузком температурном интервале

(порядка 10^{-3} К) и за короткое время (10^{-4} – 10^{-5} с) [1,2]. Указанное обстоятельство открывает перспективу создания быстродействующих силовых и сенсорных устройств на основе этих и подобных им сплавов с ЭПФ. Анализ и моделирование кривых сжатия этих кристаллов [3] в рамках теории размытых мартенситных переходов (РМП) [4] показали, что причиной их аномального вида могут быть межфазные напряжения из-за возникновения разницы модулей упругости и параметров решеток на границах аустенитно-мартенситных фаз (ламелей). Следует заметить, что до сих пор влияние межфазных [5,6] (в более общем случае упругих [7]) микронапряжений на динамику мартенситных переходов обсуждалось в основном с качественной стороны.

Целью настоящей работы является исследование необычного вида кривых термоупругой деформации монокристаллических образцов сплава Cu–13.5 wt.% Al–4.0 wt.% Ni при циклическом изменении температуры в условиях приложенной к образцам в направлении кристаллографической оси [001] постоянной нагрузки в виде свободно подвешенного груза. Опыты осуществлялись на образцах диаметром 3 мм при длине рабочей части 90 мм. Перед опытом образцы после небольшой выдержки при температуре 1223 К закаливались погружением в воду, а затем в течение 1 h находились при температуре 373 К, после чего охлаждались на воздухе. Измерение термоупругой деформации образцов в цикле нагрев–охлаждение проводилось с помощью специального измерительного устройства с точностью $4 \cdot 10^{-5}$. Скорость сканирования температуры составляла 1–2 К/min.

На рис. 1 в качестве примера показана термоупругая деформация исследуемого сплава при постоянном напряжении 100 МПа и однократном циклическом изменении температуры в интервале 300–450 К. Видно, что петля гистерезиса термоупругой деформации имеет необычную форму, содержит участки *ab* и *cd* ускоренного изменения деформации как при нагреве, так и при охлаждении, в результате чего она приобретает аномальный („рюмочный“) вид, сильно сужаясь в средней части.

Как и в случае упомянутых выше аномальных спадов напряжения на кривых псевдоупругой деформации монокристаллов сплава Cu–Al–Ni [1], можно предполагать, что необычный вид петли гистерезиса термоупругой деформации на рис. 1 также связан с влиянием межфазных напряжений на процессы прямого и обратного мартенситных переходов в исследуемом сплаве. Согласно теории РМП, относительный объем кристалла φ_M , занятый мартенситом, изменяется

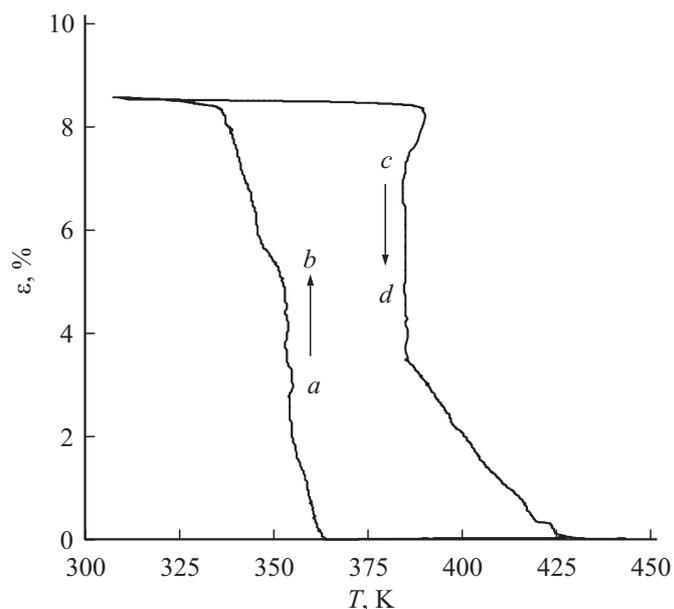


Рис. 1. Кривая термоупругого гистерезиса сплава Cu — 13.5 wt.% Al — 4.0 wt.% Ni при постоянном напряжении 100 МПа. Стрелками указано направление ускоренного изменения деформации.

с температурой T и напряжением σ в соответствии с основными соотношениями теории РМП [4]

$$\varphi_M = \frac{1}{1 + \exp(\Delta U/kT)}. \quad (1a)$$

Здесь $\Delta U = \omega \Delta u$ — изменение свободной энергии сплава при образовании в нем зародыша новой фазы объемом ω ,

$$\Delta u = q \frac{T - T_c}{T_c} - \varepsilon_m \sigma + W_{el}, \quad (1b)$$

Δu — объемная плотность свободной энергии фазового перехода, q — теплота перехода, ε_m — деформация решетки при ее структурной перестройке, T_c — характеристическая температура превращения, k —

постоянная Больцмана, $W_{el} = \sigma_{el}(\varphi)\varepsilon_m$ — связанная с переходом межфазная энергия, где

$$\sigma_{el}(\varphi_M) = \Delta E \varepsilon_m \varphi_M (1 - \varphi_M) \quad (1c)$$

— межфазные напряжения, ε_m — упругие деформации при структурной перестройке решетки, ΔE — разница модулей упругости мартенситной и аустенитной фаз. Из уравнения (1c) следует, что в однофазных состояниях $\varphi_M = 0$ (аустенит) и $\varphi_M = 1$ (мартенсит) межфазные напряжения и межфазная энергия

$$W_{el}(\varphi_M) = \Delta E \varepsilon_m^2 \varphi_M (1 - \varphi_M) \quad (2)$$

обращаются в нуль, а при $\varphi_M = 1/2$ достигают максимума. Уравнения (1) описывают равновесие аустенитной и мартенситной фаз в зависимости от температуры, напряжения и величины межфазных напряжений.

Подставляя энергию (2) в (1a) и преобразуя результат, получаем с учетом межфазных напряжений зависимость напряжения от температуры и мартенситной деформации сплава $\varepsilon = \varepsilon_m \varphi$

$$\sigma = \sigma_m \left[\frac{T - T_c + \Delta T}{T_c} - a \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_M} \right) + \frac{1}{\omega} \ln \left(\frac{\varepsilon/\varepsilon_m}{1 - \varepsilon/\varepsilon_m} \right) \right], \quad (3)$$

где $\sigma_m = q/\varepsilon_m$, $\bar{\omega} = \omega q/kT_c$, $a = \sigma_e/\sigma_m$, $\sigma_e = \Delta E \varepsilon_m^2$, $\varphi = \varphi_M$. Уравнение (3) описывает кривую псевдоупругой деформации сплава с ЭПФ. Параметр a определяет относительное влияние межфазных напряжений на вид кривых псевдоупругой деформации. Как показано в [2,3], при достаточной его величине ($a > 0.2$) на кривых сжатия кристаллов сплава Ni–Fe–Ga–Co появляются участки снижения напряжения с отрицательным значением коэффициента мартенситного упрочнения: $d\sigma/d\varepsilon < 0$. Можно предполагать, что и наблюдаемый в настоящей работе необычный вид гистерезисных кривых термоупругой деформации $\varepsilon(T)$ кристаллов сплава Cu–Al–Ni на рис. 1 также связан с влиянием на них межфазных напряжений.

Принимая во внимание соотношения (1) и (2), имеем следующую систему уравнений для моделирования влияния межфазных напряжений на форму кривых термоупругой деформации $\varepsilon(T, \sigma)$ при прямом и

обратном мартенситном переходе в условиях действия постоянного приложенного к кристаллу напряжения σ :

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} = \frac{1}{1 + \exp(\Delta U(\varepsilon)/kT)}, \quad (4a)$$

$$\Delta U(\varepsilon, T, \sigma) = \omega \left[q \frac{T - T_c \pm \Delta T}{T_c} - \varepsilon_m \sigma \mp W_e(\varepsilon) \right], \quad (4b)$$

$$W_{el}(\varepsilon) = \Delta E \varepsilon_m^2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \right). \quad (4c)$$

В (4b) $2\Delta T$ — величина гистерезиса термоупругой деформации в отсутствие межфазных напряжений, знак „плюс“ относится к прямому мартенситному переходу, знак „минус“ — к обратному.

Поскольку в (4a) деформация ε входит в левую и правую части, с учетом трансцендентного характера уравнения его решение может быть получено только численным методом для каждого значения деформации. Для этого уравнение (4a) удобнее записать в безразмерных деформациях $\bar{\varepsilon} = \varepsilon/\varepsilon_m$ и температурах $t = T/T_c$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{1 + \exp(\Delta U(\bar{\varepsilon})/ktT_c)}, \quad (5a)$$

$$\Delta U(\bar{\varepsilon}, t, \sigma) = \bar{\omega} [t - 1 \pm \Delta t - \sigma/\sigma_m \mp a\bar{\varepsilon}(1 - \bar{\varepsilon})], \quad (5b)$$

где $\Delta t = \Delta T/T_c$, а параметры $\bar{\omega}$, σ_m и a имеют тот же смысл, что и в уравнении (3). На рис. 2 приведены результаты решения уравнений (5) применительно к исследуемому в настоящей работе сплаву Cu–Al–Ni. Пунктирные кривые на этом рисунке — результат решения указанных уравнений в отсутствие межфазных напряжений ($a = 0$). Видно, что кривые прямого и обратного мартенситных переходов в отсутствие указанных напряжений имеют обычный непрерывный вид.

Сплошные кривые 1 на рис. 2 демонстрируют влияние межфазных напряжений при их относительно малой величине ($a = 0.1$) на ход прямого и обратного мартенситных переходов. Видно, что по сравнению с пунктирными кривыми линии 1 заметно прогнуты в средней части, образуя эффект „рюмочности“, но остаются при этом непрерывными. Увеличение параметра a до значения 0.2 приводит к появлению на кривых термоупругой деформации (кривые 2) скачков напряжения ab и cd ,

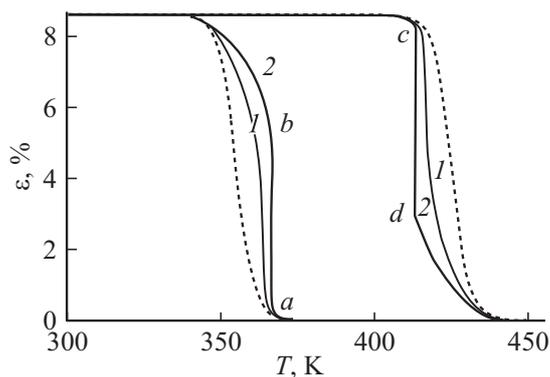


Рис. 2. Кривые термоупругого гистерезиса сплава Cu–Al–Ni согласно соотношениям (5) при напряжении 100 МПа и относительной величине межфазных напряжений $a = \sigma_e / \sigma_m$: 0 (пунктирные кривые), 0,1 (1) и 0,2 (2).

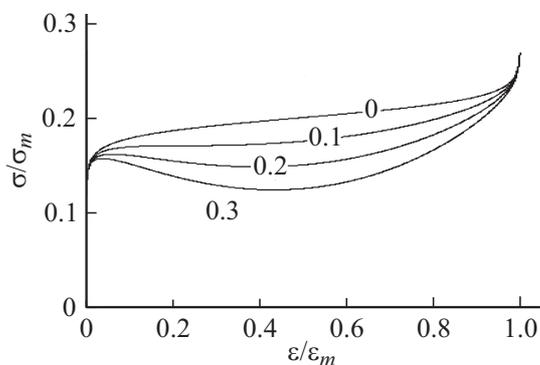


Рис. 3. Кривые псевдоупругой деформации сплава Cu–Al–Ni при 330 К согласно уравнению (3) в координатах $\sigma / \sigma_m - \varepsilon / \varepsilon_m$. Числа около кривых — относительная величина межфазных напряжений $a = \sigma_e / \sigma_m$.

тем более продолжительных по деформации, чем больше значение этого параметра, т.е. величина межфазных напряжений. При дальнейшем росте параметра a „рюмочность“ петли гистерезиса увеличивается. На рис. 3 приведены результаты расчета кривых псевдоупругой деформации

исследуемого сплава согласно уравнению (3) для нескольких значений параметра a при тех же значениях остальных параметров ($T_c = 300$ К, $\Delta T = 30$ К, $\bar{\omega} = 100$, $\varepsilon_m = 8.6\%$, $\sigma_m = 400$ МПа), что и при расчете кривых на рис. 2. Видно, что при значениях этого параметра 0 и 0.1 кривые псевдоупругой деформации не содержат спада напряжения, а при $a \geq 0.2$ это снижение имеет место.

Таким образом, результаты работы показывают, что предположение о существовании межфазных напряжений вполне удовлетворительно объясняет наблюдаемый при однократном циклическом изменении температуры аномальный вид кривых термоупругой деформации сплава Cu–Al–Ni с эффектом памяти формы. Обнаруженные в работе участки ускоренного изменения термоупругой деформации указывают на возможность значительного увеличения быстродействия силовых приводов и датчиков на основе сплавов с ЭПФ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-19-00129).

Список литературы

- [1] Николаев В.И., Якушев П.Н., Малыгин Г.А., Аверкин А.И., Чикиряка А.В., Пульнев С.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 3. С. 57–63.
- [2] Николаев В.И., Якушев П.Н., Малыгин Г.А., Пульнев С.А. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 19. С. 83–90.
- [3] Николаев В.И., Якушев П.Н., Малыгин Г.А., Аверкин А.И., Пульнев С.А., Зограф Г.П., Кустов С.Б., Чумляков Ю.И. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 8. С. 18–27.
- [4] Малыгин Г.А. // УФН. 2001. Т. 171. № 2. С. 187–212.
- [5] Salzbrenner R.J., Cohen M. // Acta Met. 1979. V. 27. N 8. P. 739–748.
- [6] Panchenko E., Chumlyakov Yu., Maier H.J., Timofeeva E., Karaman I. // Intermetallics. 2010. V. 18. Iss. 12. P. 2458–2463.
- [7] Recarte V., Perez-Landazábal J.I., Rodríguez P.P., E.H. Bocanegra P.P., Nó M.L., San Juan J. // Acta Mater. 2004. V. 52. N 13. P. 3941–3948.