

В.А. Плотников, Е. Ю. Гранкина, А.С. Грязнов

Деформационный гистерезис при термоупругих мартенситных превращениях в никелиде титана

Введение. Известно, что при проведении цикла термоупругих мартенситных превращений в никелиде титана траектории процессов прямого $B2 \rightarrow B19$ и обратного $B19 \rightarrow B2$ превращений в пространстве термодинамических параметров количество мартенситной фазы – температура не совпадают [1]. Такое несовпадение на зависимости концентрации мартенситной фазы от температуры (рис. 1) представлено в виде гистерезиса. На рисунке 1 показано, что в цикле термоупругих мартенситных превращений температура A_s (температура начала обратного превращения) превосходит температуру M_f (температура окончания прямого мартенситного превращения), а температура A_f (температура окончания обратного мартенситного превращения) превосходит температуру M_s (температура начала прямого мартенситного превращения). В этой связи в никелиде титана термоупругие мартенситные превращения относят к превращению первого типа по Тонгу и Вайману [2]. Превращения первого или второго типов по Тонгу и Вайману характеризуются меньшей или большей вытянутостью петли гистерезиса, причиной которых является структурная неоднородность, создаваемая в ходе мартенситных превращений. Структурная неоднородность исходной фазы обусловлена дефектностью структуры и внутренними полями напряжений. В этой связи обратное превращение протекает при повышенной энергии, так как происходит наследование структурных неоднородностей, например, дислокаций.

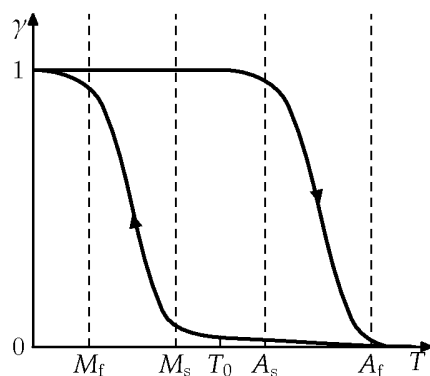


Рис. 1. Температурный гистерезис при термоупругих мартенситных превращениях в никелиде титана: M_s, M_f, A_s, A_f – критические температурные точки прямого и обратного превращений соответственно; T_0 – температура межфазного равновесия

Физическая природа гистерезиса заключается в производстве энтропии при охлаждении и нагреве сплава. Согласно квазиравновесному обобщению термодинамического потенциала Гиббса на неравновесный процесс производство энтропии осуществляется как внутри системы, так и на поверхности раздела система–среда [3]. В случае мартенситных превращений основной вклад в производство энтропии внутри системы вносят процессы на внутренних границах раздела, в первую очередь связанные с тепловыми потоками через межфазные границы.

Кроме того, при мартенситных превращениях наблюдается накопление структурных дефектов в результате релаксации микронапряжений, генерируемых на межфазной границе. Явление носит название фазового наклепа, приводящего к упрочнению сплава. Процесс пластической релаксации, представляющий собой генерирование полных дислокаций и накопление их в структуре сплава, в этой связи является неконсервативным процессом, сопровождающимся диссипацией энергии, что приводит к дополнительному уширению петли гистерезиса [4].

В работе рассмотрены гистерезисные эффекты при циклировании термоупругих мартенситных превращений в никелиде титана в условиях действия механических напряжений.

Материал и методика проведения экспериментов. В экспериментах использовали сплав $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$, для которого в таблице 1 приведены основные механические свойства и температурные точки мартенситных превращений. Сплав был выплавлен в НИИ медицинских материалов и имплантатов с памятью формы Сибирского физико-технического института при Томском государственном университете. Условия выплавки сплава и его термомеханическое поведение описаны в монографии [5]. Исходное структурное состояние сплава было сформировано отжигом при температуре 850 °C и охлаждением до максимальной температуры циклирования, равной 150 °C.

Эксперименты представляли собой циклирование мартенситных превращений при циклическом изменении температуры в интервале от 20 и до 150 °C в условиях механического нагружения образца. В ходе циклирования мартенситных превращений регистрировали температуру образца и полную деформацию. Регистрацию этих параметров осуществляли в одном временном масштабе, что позволяет сопоставлять эти

Таблица 1

Свойства сплава $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$

Температурные точки мартенситных превращений, °C				Напряжение мартенситного сдвига, МПа	Предел текучести, МПа
M_s , °C	M_f , °C	A_s , °C	A_f , °C		
45	37	45	55	35	215

параметры друг с другом. Экспериментальная установка была описана ранее в публикации [4].

Экспериментальные результаты. Охлаждение образца в условиях действия постоянной механической нагрузки сопровождается накоплением деформации ϵ (рис. 2) при $B2 \rightarrow B19$ мартенситном превращении.

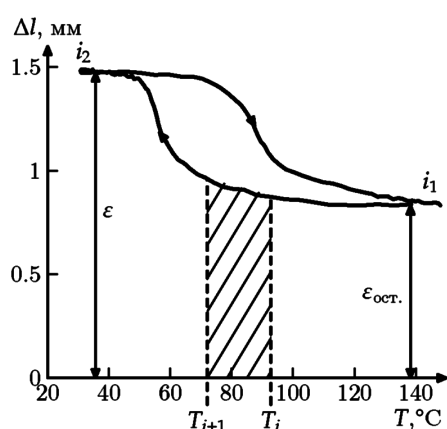


Рис. 2. Зависимость мартенситной деформации от температуры цикла мартенситных превращений

При нагреве образца наблюдается возврат деформации в результате протекания обратного мартенситного превращения $B19 \rightarrow B2$. При этом наблюдается несовпадение траектории накопления деформации и траектории возврата деформации: температура начала возврата деформации выше, чем температура окончания накопления. Такое соотношение температур накопления и возврата деформации приводит к формированию петли деформационного гистерезиса, характеризующего механические потери при проведении цикла мартенситных превращений. Циклирование мартенситных превращений сопровождается накоплением остаточной деформации – $\epsilon_{ост.}$.

Для анализа механических потерь в цикле мартенситных превращений рассчитаем площадь гистерезиса. Для этого определим работу по накоплению деформации при охлаждении:

$$A_{12} = \frac{\sigma \cdot s}{T_0} \sum_{i=i_1}^{i_2} \Delta l_i (T_{i+1} - T_i), \quad (1)$$

здесь T_i , T_{i+1} – начальная и конечная температура в элементарном интервале температур от i до $i+1$; s – площадь поперечного сечения образца; Δl_i – деформация образца в i -й точке; $\sigma \cdot s$ – сила, приложенная к образцу, сечением s ; $T_0 = \frac{1}{2}(M_s + A_s)$ – температура термодинамического равновесия.

Работа по возврату деформации при нагреве образца A_{21} определяется аналогично.

Разность этих работ и будет определять площадь петли гистерезиса

$$W = A_{21} - A_{12}. \quad (2)$$

В таблице 2 приведены данные по величине механических потерь при циклировании мартенситных превращений в условиях нагружения нагрузкой в 25,8 и 62,5 МПа.

Как следует из данных таблицы 2, площадь петли гистерезиса при циклировании мартенситных превращений уменьшается. На рисунке 3 показано, что наблюдается снижение энергии потерь по нелинейному закону с выходом на насыщение при увеличении номера цикла превращений.

Зависимость площади петли гистерезиса от номера цикла мартенситных превращений с достаточной точностью можно аппроксимировать экспоненциальной функцией типа

$$W = W_n + W_0 \exp(-\alpha n). \quad (3)$$

W_n – уровень насыщения энергии потерь; W_0 – площадь петли гистерезиса в нулевом цикле; α – коэффициент в показателе экспоненты (3), характеризующий скорость снижения энергии потерь в цикле мартенситных превращений, n – номер цикла мартенситных превращений.

В таблице 3 приведены параметры аппроксимации экспериментальных зависимостей функцией (3)

Обсуждение результатов. Несмотря на обратимый характер накопления и возврата деформации, в тер-

Таблица 2

Энергия потерь в циклах мартенситных превращений в условиях нагружения

Нагрузка, МПа	Площадь гистерезиса в циклах мартенситных превращений, 10^{-3} Дж										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
25,8	1,5	2,00	1,74	1,83	1,2	1,71	1,2	1,41	1,48	1,50	1,49
62,5	9,07	6,57	6,37	4,91	5,13	4,38	5,41	4,4	5,32	5,4	5,3

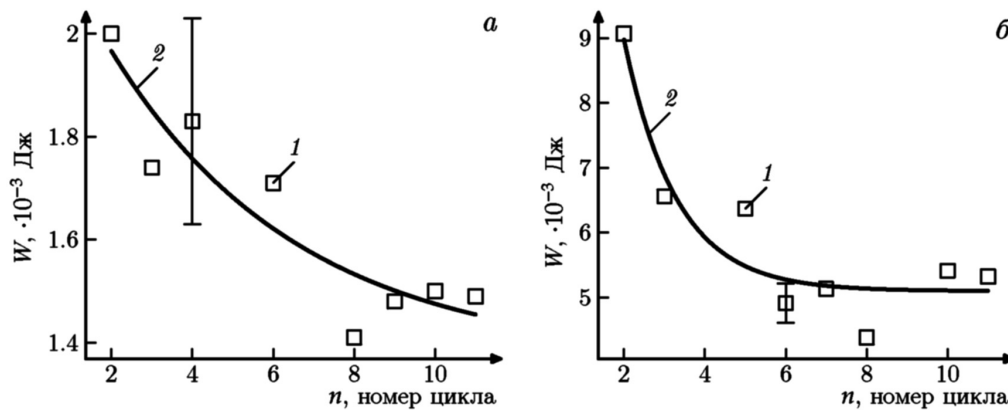


Рис. 3. Зависимость энергии потерь от номера цикла мартенситных превращений под действием постоянного механического напряжения: а – 25,8 МПа; б – 62,5 МПа; 1 – экспериментальные точки; 2 – аппроксимация функцией (3)

Таблица 3

Параметры аппроксимации экспериментальных зависимостей функцией (3)

Нагрузка, МПа	$W_n, \cdot 10^{-3}$ Дж	$W_0, \cdot 10^{-3}$ Дж	α	R^2
25,8	$1,4 \pm 0,2$	$0,9 \pm 0,2$	$0,21 \pm 0,18$	0,896
62,5	$5,1 \pm 0,3$	18 ± 13	$0,77 \pm 0,35$	0,885

модинамическом смысле эти процессы необратимы. И при охлаждении (при прямом превращении $B2 \rightarrow B19$), и при нагреве (при обратном превращении $B19 \rightarrow B2$) происходит рассеяние (диссипация) энергии. Проанализируем причину возникновения деформационного гистерезиса в цикле мартенситных превращений. Как было уже сказано выше [3], физическая природа такого гистерезиса заключается в производстве энтропии при охлаждении и нагреве сплава.

Рассмотрим потенциал Гиббса, обобщенный на неравновесный процесс термоупругих мартенситных превращений [3]

$$\Phi = U - TS + pV. \quad (4)$$

Из приведенного соотношения следует, что в цикле мартенситных превращений наблюдается

$$d\Phi = -SdT + V\sigma d\varepsilon - T(dS_{pr} + dS_{pr}^{нов}). \quad (5)$$

Здесь dS_{pr} – элементарная энтропия, произведенная необратимыми процессами внутри системы; $dS_{pr}^{нов}$ – элементарная энтропия, произведенная необратимыми процессами на поверхности раздела система среда; $V\sigma d\varepsilon$ – работа, совершаемая средой над системой при приложении механического напряжения σ .

Таким образом, производство энтропии обусловлено как необратимыми процессами внутри системы, так и на поверхности раздела со средой. В случае мартенситных превращений основной вклад в производство энтропии вносят процессы на межфазной границе, в первую очередь связанные с тепловыми потоками через внутренние (межфазные) границы, площадь внешних границ образца не менее чем на порядок меньше площади внутренних границ, поэтому ими

можно пренебречь [4]. Кроме того, при мартенситных превращениях наблюдается накопление структурных дефектов в результате релаксации микронапряжений, генерируемых на межфазной границе. Накопление дефектов также сопровождается производством энтропии.

Таким образом, площадь петли гистерезиса уменьшается и выходит на насыщение в ходе многократного циклирования мартенситных превращений за счет насыщения фазового наклепа и прекращения в этой связи генерации дефектов, а также за счет уменьшения производства энтропии на межфазных границах. Так как сплав $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$ не склонен к пластической релаксации и фазовому наклепу, то производство энтропии, связанное с генерацией дефектов, исключено. Следовательно, снижение площади гистерезиса при циклировании мартенситных превращений может быть обусловлено снижением производства энтропии за счет снижения плотности границ в цикле превращений. Снижение числа границ в цикле превращений возможно, если уменьшается объем фазы, участвующей в мартенситных превращениях.

О снижении числа мартенситных границ может свидетельствовать увеличение скорости выхода на насыщение площади гистерезиса с 0,21 до 0,77 при увеличении механического напряжения с 25, 8 до 62,5 МПа. Косвенно об этом может свидетельствовать и накопление остаточной деформации, которая растет от цикла к циклу.

Заключение. Проведенное исследование деформационного гистерезиса показало, что в ходе много-

кратного циклирования мартенситных превращений в условиях механического нагружения никелида титана наблюдается экспоненциальное снижение площади петли гистерезиса до насыщения. Снижение площади гистерезиса свидетельствует об уменьшении

рассеяния энергии в цикле превращений (диссипации энергии), что может быть связано с уменьшением объема мартенситной фазы, участвующей в циклах термоупругих мартенситных превращений в условиях механического нагружения.

Библиографический список

1. Паскаль, Ю.И. Необратимые явления при мартенситном превращении никелида титана / Ю.И. Паскаль, Л.А. Монасевич // Изв. вузов. Физика. – Томск, 1980.

2. Tong, H.C. Characteristic temperature and order properties of thermoelastic martensites / H.C. Tong, C.M. Wayman // Acta met. – 1974. – Vol. 22, №7.

3. Паскаль, Ю.И. Нелокальное неравновесно-термо-

динамическое описание мартенситного превращения / Ю.И. Паскаль // Изв. вузов. Физика. – 1981. – №11.

4. Потекаев, А.И. Акустическая диссипация энергии при термоупругих мартенситных превращениях / А.И. Потекаев, В.А. Плотников. – Томск, 2004.

5. Гюнтер, В.Э. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / Гюнтер В.Э. и др. – Томск, 1998.