

*В. А. Плотников, М. В. Морева*

**Деформационный гистерезис при термоупругих мартенситных превращениях в никелиде титана в условиях механического нагружения\***

*V. A. Plotnikov, M. V. Moreva*

**Deformation Hysteresis under Thermoelastic Martensitic Transformations In Nitinol due to Mechanical Loading**

Сплав ТН-1В является интерметаллическим соединением, для которого характерны термоупругие мартенситные превращения, следствием чего являются свойства памяти формы и сверхэластичности. Деформационный гистерезис при мартенситных превращениях в никелиде титана есть фундаментальное явление. Основная и наиболее значимая причина его проявления — диссипативные процессы и производство энтропии. Рассмотрены особенности гистерезиса в никелиде титана ТН-1В, склонного к фазовому наклепу. Описана природа гистерезиса превращения, изучена структура диссипации энергии. Выявлены два конкурирующих вклада в производство энтропии превращения — термодинамический (рассеивание тепловых потоков) и механический (дефектность структуры). Особое внимание уделено площади петли гистерезиса нагруженного образца, поскольку именно деформационный гистерезис является характеристикой диссипации энергии в цикле термоупругих мартенситных превращений при нагружении образца. Сделана оценка величины механических потерь энергии, сопоставлены результаты расчетов для различной величины нагружения.

**Ключевые слова:** никелид титана, эффект памяти, деформационный гистерезис, фазовый наклеп, мартенситные превращения.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-50

**Введение.** Известно, что при проведении цикла термоупругих мартенситных превращений в никелиде титана траектории прямого  $B2 \rightarrow B19'$  и обратного  $B19' \rightarrow B2$  превращений в пространстве термодинамических параметров, количество мартенситной фазы — температура, не совпадают [1, с. 45]. На зависимости концентрации мартенситной фазы от температуры можно наблюдать петлю гистерезиса, характеризующуюся несовпадением критических температур мартенситного превращения.

Alloy ТН-1В is an intermetallic compound characterized by thermoelastic martensitic transformation, shape memory, and superelasticity. Deformation hysteresis of martensitic transformations in titanium nickelide is a fundamental phenomenon. The most significant reasons for its development are dissipative processes and entropy production. In the paper, peculiar features of the hysteresis in titanium nickelide ТН-1В prone to phase hardening are investigated. The nature of transformation hysteresis and structure of the energy dissipation are studied.

Thermodynamic (dissipation of heat fluxes) and mechanical (structure imperfection) are identified as two competing contribution to production of the entropy of transformation. Area of hysteresis loop of sample under loading is investigated in depth due to the hysteresis being the characteristic of energy dissipation in a cycle of thermoelastic martensitic transformations under loading.

Magnitude of mechanical energy loss is evaluated and compared with results of calculations for different values of loading.

**Key words:** nitinol, memory effect, strain hysteresis, phase hardening, martensitic transformation.

Согласно нелокальному неравновесно-термодинамическому описанию мартенситных состояний [2, с. 74–78] и акустической эмиссии при мартенситных превращениях [3, с. 72–79] гистерезис в цикле превращений имеет сложную природу.

Во-первых, площадь петли гистерезиса обусловлена процессом производства энтропии вследствие действия источников-стоков тепла, локализованных на межфазных (мартенситных) границах раздела, движущихся со скоростью, близкой к скорости распространения сдвиговых волн. В связи с высокой

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-02-98026), а также при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218.

скоростью перемещения границы возникает температурный фронт с высоким температурным градиентом, что требует дополнительного локального переохлаждения при прямом  $B2 \rightarrow B19'$  или локального перегрева при обратном  $B19' \rightarrow B2$  превращениях.

Во-вторых, при мартенситных превращениях наблюдается накопление структурных дефектов — явление фазового наклепа. Процесс пластической релаксации, представляющий собой продуцирование полных дислокаций при достижении напряжениями на межфазной границе предела текучести сплава, сопровождается диссипацией энергии, что приводит к дополнительному уширению петли гистерезиса [3, с. 72–79].

В-третьих, площадь петли гистерезиса связана со специфическим рассеянием энергии — акустической эмиссией, обусловленной динамикой мартенситной границы. Динамика мартенситной границы существенно связана со скоростью ее движения и взаимодействием с другими границами, т. е. множественностью возникновения (исчезновения) мартенситных кристаллов, где характер взаимодействия мартенситных кристаллов связан со степенью коррелиро-

ванности образования (исчезновения) их в объеме и во времени процесса (в широком смысле со степенью когерентности в системе мартенситных кристаллов) [2, с. 74–78].

Циклирование мартенситных превращений при циклическом изменении температуры приводит к эволюции процесса накопления и рассеяния энергии, т. е. к эволюции петли гистерезиса [2, с. 74–78; 3, с. 72–79].

Но наибольший интерес, как теоретический, так и практический, представляет собой исследование гистерезиса при циклировании мартенситных превращений под нагрузкой.

**Материал и методика проведения экспериментов.** В экспериментах использовали сплав ТН-1В, для которого в таблице приведены основные механические характеристики 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 сплавов и их термомеханическое поведение описаны в монографии [4, с. 57].

Свойства сплавов на основе никелида титана

Сплав	Температура мартенситных превращений, °C				Напряжение мартенситного сдвига, МПа	Предел текучести, МПа
	Ms	Mf	As	Af		
ТН-1В	85	35	105	180	180	400

Исходное структурное состояние сплава было сформировано отжигом при температуре 850 °C и охлаждением до максимальной температуры циклирования, равной 200 °C.

Эксперименты представляли собой циклирование мартенситных превращений при циклическом изменении температуры в интервале от 20 и до 200 °C в условиях механического нагружения образца. Нагрузка, приложенная к образцу, в одной серии циклов мартенситных превращений была постоянной. Величина нагрузки в сериях циклов менялась от 20 до 218 МПа. Для сплава ТН-1В изменение механического напряжения от серии к серии осуществлялось с шагом примерно 20 МПа. В ходе циклирования мартенситных превращений регистрировали температуру образца и деформацию. Регистрацию этих параметров осуществляли в одном временном масштабе, что позволяет сопоставить эти параметры друг с другом. Экспериментальная установка была описана ранее в публикации [5, с. 113–117].

**Экспериментальные результаты.** В сплаве ТН-1В как накопление деформации, так и ее возврат представляют собой монотонный процесс, что может свидетельствовать о кинетике медленного роста (сокращения) мартенситных кристаллов в цикле превращений.

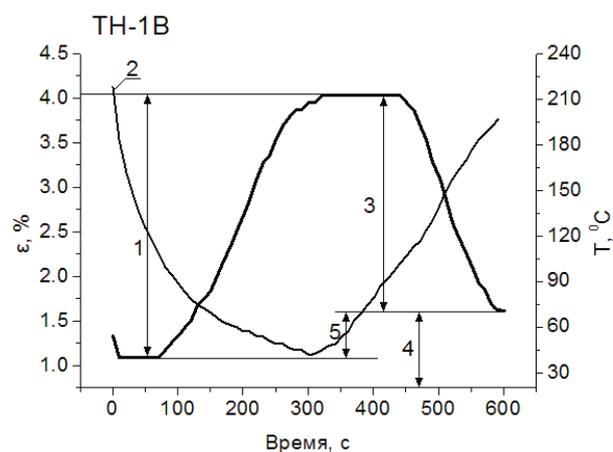


Рис. 1. Накопление и возврат деформации в цикле термоупругих мартенситных превращений в ТН-1В при внешнем напряжении 36 МПа: 1 — накопление деформации при охлаждении образца; 2 — температура в цикле охлаждения — нагрев образца; 3 — возврат деформации при нагреве образца; 4 — остаточная деформация, накопленная в циклах превращений; 5 — прирост остаточной деформации в цикле

Из приведенных на рисунке 1 данных величина накопленной деформации в цикле превышает величину возврата на величину остаточной деформации: в сплаве ТН — 1В на 0,5%, т. е. в цикле термоупругих мартенситных превращений в условиях механического нагружения сплава наблюдается недовозврат деформации.

Если построить зависимость накопления и возврата деформации как функцию температуры, то в цикле термоупругих мартенситных превращений можно наблюдать петлю деформационного гистерезиса (рис. 2), свидетельствующую о несовпадении траектории накопления и возврата деформации и потерях энергии в цикле, а недовозврат деформации приводит к незамкнутой петле в температурном интервале циклирования превращений.

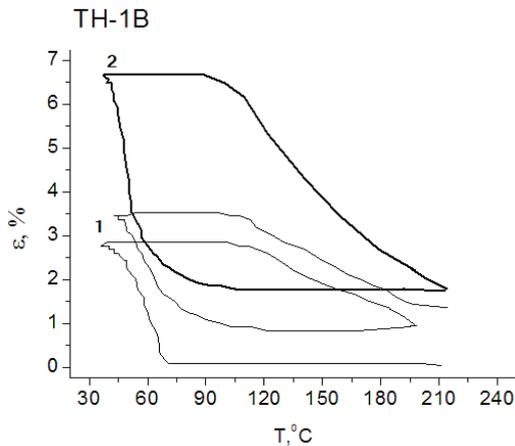


Рис. 2. Петля деформационного гистерезиса при циклировании мартенситных превращений в сплавах ТН-1В при внешнем напряжении 36: 1 — первый и второй циклы; 2 — цикл насыщения

В результате многократных циклов нагрев — охлаждение наблюдается эволюция петли гистерезиса. В сплаве ТН-1В петля гистерезиса смещается к большим деформациям, характеризуя, с одной стороны, накопление остаточной деформации до 2% при выходе на насыщение, с другой — увеличение максимального значения накапливаемой в цикле деформации. Кроме того, наблюдается рост площади петли при циклировании. Следует отметить, что петля гистерезиса в первом цикле была незамкнутой и величина «разрыва» определяла величину остаточной деформации. С последующими циклами эта величина уменьшалась, и в цикле насыщения петля гистерезиса становится замкнутой.

**Анализ площади петли гистерезиса в циклах термоупругих мартенситных превращениях в условиях механического нагружения.** Для анализа механических потерь в цикле мартенситных превращений рассчитаем площадь петли гистерезиса, используя

модифицированное уравнение Клапейрона-Клаузиуса для фазовых переходов [4, с. 57; 5, с. 113–117]

$$d\sigma = \frac{\Delta H}{T_0 \cdot \varepsilon_i \cdot V_0} dT = \frac{\Delta S}{\varepsilon_i \cdot V_0} dT. \quad (1)$$

где  $\Delta \hat{I} = \Delta S \cdot T_0$  — скрытая теплота превращения (энтальпия превращения);  $\Delta S$  — прирост энтропии;  $\varepsilon_M$  — максимальное значение мартенситной деформации в цикле мартенситных превращений;  $T_0$  — температура термодинамического равновесия.

Рассчитаем работу, совершенную в ходе мартенситного превращения при действии постоянной нагрузки на исследуемый образец, а также учитывая для условий нашего эксперимента, т. е. при условии постоянного механического напряжения в интервале температур мартенситного превращения  $\Delta T$  и изменение деформации образца:

$$W = \int \frac{\Delta \hat{I}}{T_0} \cdot dT = \int \frac{\sigma \cdot V_0 \cdot \Delta \varepsilon}{T_0} \cdot dT = \frac{\sigma \cdot V_0 \cdot \Delta \varepsilon}{T_0} \cdot \Delta T. \quad (2)$$

В экспериментах для определения механических потерь в цикле, как показано на рисунке 3, нужно определить работу по накоплению деформации при охлаждении  $W_{12}$  и работу по возврату деформации при нагреве  $W_{21}$ . Площадь петли будет равна разности работ  $W_{21}$  и  $W_{12}$ , т. е.:

$$\Delta W = W_{21} - W_{12}. \quad (3)$$

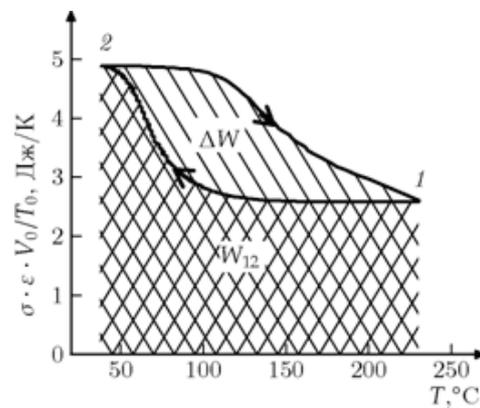


Рис. 3. Расчет площади петли гистерезиса

Алгоритм вычисления работ, например работы по накоплению деформации  $W_{12}$ , определяется суммированием элементарных работ по всем точкам разбиения температурного интервала мартенситных превращений:

$$W_{12} = \frac{\sigma \cdot V_0}{T_0} \sum_{i=i_1}^{i_2} \varepsilon_i (T_{i+1} - T_i), \quad (4)$$

где  $T_i, T_{i+1}$  — начальная и конечная температура в элементарном интервале регистрируемых значений от  $i$

до  $i + 1$ ;  $V_0$  — начальный объем образца;  $\varepsilon_i$  — деформация образца в  $i$ -й точке. Температуру термодинамического равновесия  $T_0$  будем рассчитывать по формуле [6, с. 887–895]:

$$T_0 = \frac{M_s + A_s}{2}. \quad (5)$$

Экспериментальные результаты по расчету площади петли гистерезиса сплава в зависимости от номера цикла для всех механических напряжений приведены на рисунке 4.

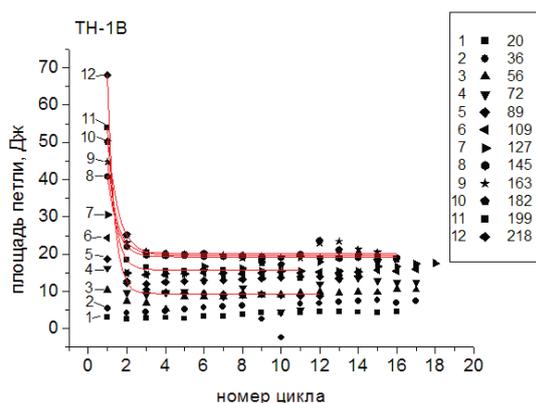


Рис. 4. Зависимость площади петли деформационного гистерезиса от номера цикла мартенситных превращений при разных механических нагрузках: в таблицах указано механическое напряжение и номер серии циклов

Как следует из рисунка 4, в сплаве ТН-1В при низких напряжениях от 20 до 109 МПа площадь петли увеличивается при возрастании номера цикла и при повышении механического напряжения в цикле.

Однако при более высоких напряжениях, начиная примерно со 109 МПа, характер зависимости меняется. Площадь петли становится существенно больше, а зависимость от номера цикла свидетельствует не о росте, а об уменьшении площади петли гистерезиса при циклировании мартенситных превращений.

Рассмотрим зависимость площади петли гистерезиса от величины механического напряжения в цикле (рис. 5), где можно наблюдать особенности гистерезиса в первых циклах и в циклах насыщения.

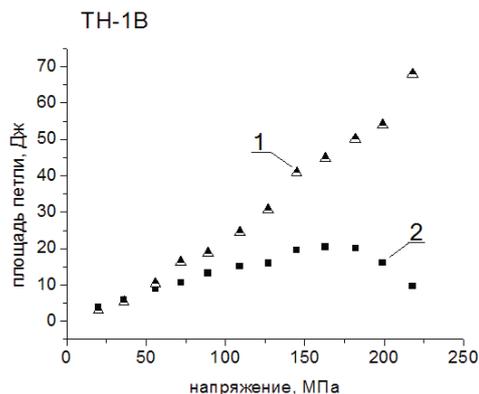


Рис. 5. Зависимость площади петли гистерезиса от величины нагрузки: 1 — гистерезис в первом цикле; 2 — гистерезис в цикле насыщения

Для сплава ТН-1В зависимость площади петли гистерезиса первых циклов от нагрузки имеет выраженный максимум, который приходится на напряжение примерно 182 МПа.

Все это отражает как характерные особенности накопления и возврата деформации, так и свидетельствует о двух конкурирующих процессах диссипации энергии при циклировании обратимых мартенситных превращений в никелиде титана.

**Заключение.** Термомеханический гистерезис при циклировании термоупругих мартенситных превращений в условиях механического нагружения обусловлен производством энтропии при действии стоков — истоков тепла и генерировании кристаллографических дефектов. Характерной особенностью деформационного гистерезиса в циклах мартенситных превращений является его рост при увеличении механического напряжения в цикле, что обусловлено рассеянием энергии при генерировании кристаллографических дефектов. В то же время снижение площади гистерезиса насыщения при достижении критического напряжения, очевидно, связано с уменьшением доли мартенситных кристаллов, участвующих в прямом — обратном превращении в связи со стабилизацией части мартенситной фазы, следствием чего является уменьшение числа источников — стоков тепла, локализованных на межфазных границах, и уменьшением рассеяния тепла. Эти эффекты играют существенную роль при практическом использовании эффекта памяти формы и сверхэластичности.

## Библиографический список

1. Паскаль Ю.И., Монасевич Л.А. Необратимые явления при мартенситном превращении никелида титана // Известия вузов. Физика. — Томск, 1980. — Деп. в ВИНТИ. — № 1667–80.

2. Паскаль Ю. И. Нелокальное неравновесно-термодинамическое описание мартенситного превращения // Известия вузов. Физика. — 1981. — № 11.

3. Плотников В. А., Потекаев А. И., Паскаль Ю. И. Мезоскопический уровень акустической эмиссии при мартенситных превращениях // Известия вузов. Физика. — 1999. — № 9.

4. Гюнтер В. Э. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. — Томск, 1998.

5. Wollants P., De Bonte M., Roos, J. R. A Thermodynamic Analysis of the Stress-Induced Martensitic Transformation in a Single Crystal. *Z. Metallkde.* — 1979. — № 70.

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