

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.3

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.010

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКТИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СПЛАВЕ $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$

Владимир Александрович Плотников<sup>1†</sup>, Анна Васильевна Гусева<sup>2</sup>,  
Александр Сергеевич Грязнов<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, 656049, Барнаул, Россия

<sup>3</sup> Алтайский государственный педагогический университет, ул. Молодежная, 55, 656031, Барнаул, Россия

<sup>1</sup> plotnikov@phys.asu.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>

<sup>2</sup> schannavac@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1671-1304>

<sup>3</sup> gryaznov-as@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0413-907X>

**Аннотация.** Исследование механических свойств материалов на основе никелида титана, возникающих в ходе термоупругих мартенситных превращений, в том числе реактивных напряжений представляют огромный интерес. Эффект генерации реактивных напряжений в материалах с памятью формы оказывает влияние на различные области техники. Так, в материалах с эффектом памяти формы, выступающих в качестве механических преобразователей энергии и в качестве силовых элементов приводов используются условия, при которых происходит фиксирование деформации. Данное использование предполагает стабильность свойств и рабочих параметров в такого типа устройствах. В работе были исследованы реактивные напряжения, возникающие в образцах сплавов на основе никелида титана при фиксировании деформации, которая препятствует осуществлению эффекта памяти формы в процессе циклирования мартенситных превращений. Предполагается, что циклирование мартенситных превращений может привести к изменению реактивных напряжений вследствие структурной перестройки материала, что в свою очередь повлияет на рабочие характеристики узлов и агрегатов из сплавов на основе никелида титана. Показано, что уровень реактивных напряжений, развиваемых в образце в цикле нагрев-охлаждение уменьшается в последующих циклах. Наблюдаемое упрочнение от цикла к циклу, в условиях действия реактивных напряжений может характеризовать явление фазового наклепа.

**Ключевые слова:** реактивные напряжения, никелид титана, термоупругие мартенситные превращения, эффект памяти формы, деформация.

**Для цитирования:** Плотников В.А., Гусева А.В., Грязнов А.С. Исследование реактивных напряжений в сплаве  $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$  // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 2. С. 221–226. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.010.

Original article

## INVESTIGATION OF REACTIVE STRESSES IN AN ALLOY $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$

Vladimir A. Plotnikov<sup>1†</sup>, Anna V. Guseva<sup>2</sup>, Alexander S. Gryaznov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Altai State University, Lenin Pr., 61, Barnaul, 656049, Russia

<sup>3</sup> Altai State Pedagogical University, Molodezhnaya Str., 55, Barnaul, 656031, Russia

<sup>1</sup> plotnikov@phys.asu.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>

<sup>2</sup> schannavac@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1671-1304>

<sup>3</sup> gryaznov-as@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0413-907X>

**Abstract.** The study of the mechanical properties of titanium nickelide-based materials arising during thermoelastic martensitic transformations, including reactive stresses, is of great interest. The effect of generating reactive stresses in materials with shape memory has an impact on various fields of technology. Thus, in materials with the shape memory effect, acting as mechanical energy converters and as power elements of drives, the conditions under which the deformation is fixed are used. This use assumes stability of properties and operating parameters in this

type of devices. In this work, reactive stresses arising in titanium nickelide-based alloy samples during the fixation of deformation, which prevents the implementation of the shape memory effect during the cycling of martensitic transformations, were investigated. It is assumed that cycling of martensitic transformations can lead to changes in reactive stresses due to structural adjustment of the material, which in turn will affect the performance characteristics of components and assemblies made of titanium nickelide-based alloys. It is shown that the level of reactive stresses developed in the sample in the heating-cooling cycle decreases in subsequent cycles. The observed hardening from cycle to cycle, under the action of reactive stresses, can characterize the phenomenon of phase hardening.

**Keywords:** reactive stresses, titanium nickelide, thermoelastic martensitic transformations, shape memory effect, deformation.

**For citation:** Plotnikov, V. A., Guseva, A. V. & Gryaznov, A. S. (2022). Investigation of reactive stresses in an alloy  $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$ . *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(19), 221–226. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.010.

## Введение

Функциональные свойства сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) обусловлены протеканием в них термоупругого мартенситного превращения. Способность таких сплавов совершать полезную работу позволяет решать широкий круг инженерных задач. Использование таких материалов в конструкции силовых приводов или двигателей позволяет создать компактные образцы устройств, которые по отношению развиваемая сила/габариты изделия превосходят классические электродвигатели. При работе привода рабочее тело из сплава с ЭПФ часто испытывает противодействие, перегрев и ограничение реализации эффекта памяти формы. Такие условия приводят к возникновению в материале механических напряжений реактивной природы [1].

Исследование реактивных напряжений в условиях фиксирования образца представляет достаточный интерес, так как в связи с этим могут возникнуть дополнительные изменения в структуре материала. Кроме изменений в кристаллах наблюдается генерирование полных дислокаций при достижении механических напряжений или в окрестности мартенситных кристаллов предела текучести сплава. Эти дислокации накапливаются в кристаллах, упрочняя сплав. Данное явление называется фазовый наклеп [2]. Процесс циклирования мартенситных превращений при изменении температуры в цикле приведет к эволюции процесса генерации реактивных напряжений, а также будет способствовать тому, что фазовый наклеп выйдет на насыщение.

## Материалы и методы

Для исследования процесса генерации и релаксации реактивных напряжений был выбран тройной сплав  $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$ . Образец спла-

ва имеет геометрию:  $h = 40$  мм,  $a = 2,4$  мм,  $b = 1,6$  мм ( $h$  – длина образца,  $a$  – высота,  $b$  – ширина).

Сплав был выплавлен в НИИ медицинских материалов и имплантатов с памятью формы Сибирского физико-технического института при Томском государственном университете. Данный сплав обладает различными механическими, морфологическими и кинетическими свойствами, хорошо изучен и широко используется на практике [3]. Поэтому его выбор дает возможность глубоко изучить явление возникновения реактивных напряжений в сплавах, которым присущи термоупругие мартенситные превращения.

Перед проведением эксперимента образец из сплава  $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$  отжигался при температуре  $800$  °С и охлаждался до температуры  $200$  °С, затем производилось механическое нагружение. В первой серии нагрузка составляла около  $40$  МПа, во второй около  $67$  МПа, в третьей –  $107$  МПа и в четвертой серии –  $186$  МПа. Согласно схеме эксперимента дальнейшее охлаждение происходило до комнатной температуры, при этом осуществлялось прямое  $B2 \rightarrow B19'$  превращение под заданной нагрузкой [4, 5]. После завершения охлаждения деформация фиксировалась, и происходил нагрев образца до температуры  $200$  °С. При нагреве в его объеме происходит образование аустенитной фазы. По причине фиксирования деформации изменение формы невозможно, однако развиваемые реактивные напряжения удастся регистрировать с помощью тензодатчика. Они возникают из-за реакции системы на стремление материала восстановить предварительно накопленную деформацию. Основной вклад в рост реактивных напряжений вносит обратное мартенситное превращение [6].

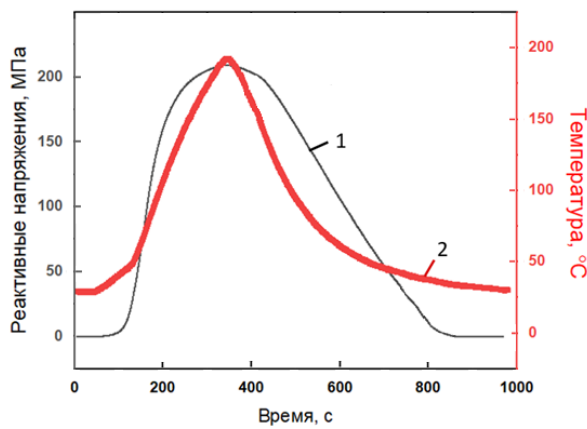
В начале эксперимента рассчитывается значение напряжения, возникающее в образце при кручении согласно формуле [1]:

$$\sigma = \frac{mg \cdot r_{\text{шкифа}}}{(0,325a - 0,15072b) \cdot b^2} \cdot \quad (1)$$

Таким образом, из расчёта по формуле (1) находятся значения реактивных напряжений для каждого цикла в сериях эксперимента.

### Результаты и их обсуждение

На рисунке представлен график генерации и релаксации реактивных напряжений в цикле.



**Рис.1.** Генерация и релаксация реактивных напряжений в цикле нагрев-охлаждение:

1 – генерация и релаксация реактивных напряжений; 2 – температура в цикле нагрев-охлаждение образца

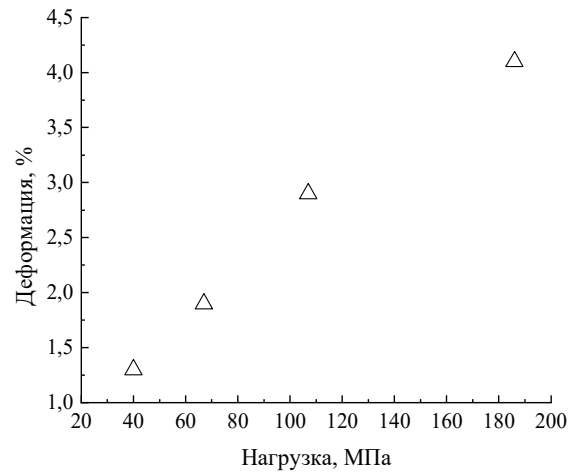
**Fig.1.** Generation and relaxation of reactive stresses in the heating-cooling cycle: 1 – generation and relaxation of reactive stresses; 2 – temperature in the heating-cooling cycle of the sample

Из рис.1 следует, что рост реактивных напряжений осуществляется при обратном мартенситном превращении, сопровождающемся ростом аустенитной фазы. В процессе охлаждения же происходит релаксация реактивных напряжений до нуля.

На рис.2 представлены значения накопленных деформаций в сериях эксперимента. Как видно из рисунка, с увеличением приложенной нагрузки к образцу увеличивается и значение накопленной деформации, очевидно, что тем самым будет увеличиваться и значение реактивных напряжений.

Результаты вычислений полученных значений реактивных напряжений по формуле (1) представлены на рис.3 как зависимость макси-

мальных значений реактивных напряжений от номера цикла в сериях эксперимента.

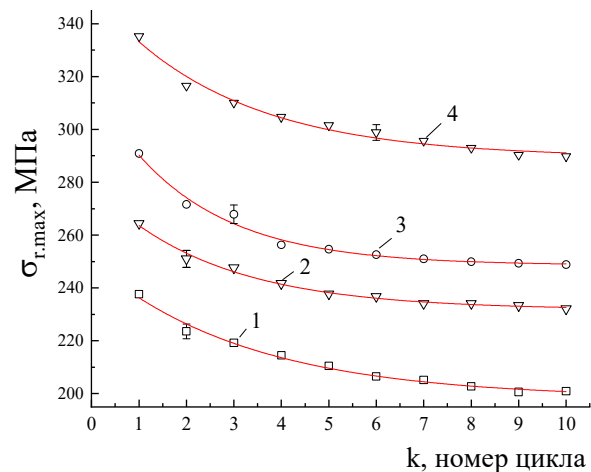


**Рис.2.** График зависимости накопленной деформации в сериях эксперимента при нагрузках 40 МПа, 67 МПа, 107 МПа, 186 МПа

**Fig.2.** Graph of the dependence of accumulated deformation in the experimental series at loads of 40 MPa, 67 MPa, 107 MPa, 186 MPa

Зависимость реактивных напряжений от номера цикла можно проанализировать экспоненциальной функцией для получения характеристик кривых [5]

$$\sigma(k) = \sigma_0 + \sigma_A \cdot \exp(-\beta \cdot k) \cdot \quad (2)$$



**Рис.3.** Зависимость реактивных напряжений от номера цикла в серии экспериментов и аппроксимация функцией (2): 1 – при 40 МПа; 2 – при 67 МПа; 3 – при 107 МПа; 4 – при 186 МПа

**Fig.3.** The dependence of reactive voltages on the cycle number in a series of experiments and approximation by function (2): 1 – 40 MPa; 2 – 67 MPa; 3 – 107 MPa; 4 – 186 MPa

Как видно из рис.3, в первом цикле серий достигается максимальное значение реактивных напряжений, в последующих же циклах идет уменьшение максимальных в цикле значе-

ний реактивных напряжений. Результаты анализа данных для реактивных напряжений, изображенных на рисунке 3 формулой (2) представим в таблице 1.

**Таблица 1.** Параметры аппроксимации уравнением (2)

**Table 1.** Approximation parameters by equation (2)

Нагрузка, МПа	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_A$ , МПа	$\beta$	$R^2$
40 МПа	199+1,62	51,5+2,12	0,36+0,03	0,989
67 МПа	232+0,94	47,5+2,41	0,37+0,05	0,990
107 МПа	249+1,21	67,9+4,81	0,37+0,03	0,986
186 МПа	290+1,97	62,6+3,84	0,35+0,05	0,982

Характеристикой зависимости является коэффициент в показателе экспоненты –  $\beta$ . Как видно из таблицы 1 значения коэффициента  $\beta$  говорят о плавном экспоненциальном спаде максимального реактивного напряжения в цикле мартенситных превращений в сплаве Ti<sub>50</sub>Ni<sub>40</sub>Cu<sub>10</sub>.

В условиях термоциклирования мартенситных превращений сплавов на основе никелида титана близкого к эквиатомному составу характерным является экспоненциальное снижение различных параметров, например, накопление фазового наклепа в ходе многократного циклирования мартенситных превращений. Этому снижению могут соответствовать различные факторы, влияющие на динамику структурного состояния образца, такие как фазовый наклёп и стабилизация мартенситной фазы. Внешнее механическое усилие может существенным образом влиять на динамику структурного состояния образца, например, усиливая влияние фазового наклёпа [7].

Со стабилизацией мартенситной фазы в условиях действия внешних механических напряжений связан недовозврат деформации, состоящий из необратимой деформации, связанной с фазовым наклёпом и обратимой, но только при высоких температурах, сопряженный с разблокировкой мартенситных кристаллов [8].

Возврат деформации при кратковременном отжиге путем нагрева до 800 °С обусловлен как отжигом дислокационной структуры фазового наклепа, так и увеличением термодинамической силы при высокой температуре. Более высокие значения заневоленной деформации неизбежно приведут к стабилизации мартенситной фазы [9].

### Заключение

Усилия, создаваемые сплавом на основе никелида титана, возникают благодаря развитию в сплаве реактивных напряжений при условии внешнего противодействия восстановлению исходной формы. Эти напряжения зависят от фазового состава и структурного состояния сплава, а также от условий механического и температурного воздействия на образец. Циклирование мартенситных превращений при циклическом изменении температуры может привести к эволюции процесса генерации реактивных напряжений вследствие структурных изменений в материале.

Циклирование мартенситных превращений в условиях действия реактивных напряжений позволяет сделать вывод о том, что существует стабилизация мартенситной фазы в цикле. Этот эффект оказывает влияние на величину мартенситной, то есть обратимой деформации [10].

Стоит отметить, что при генерации реактивным напряжениям свойственен упругий характер. Когда происходит процесс достижения напряжения мартенситного сдвига, реактивные напряжения релаксируют. При этом наблюдается переориентация мартенситных кристаллов в поле упругих напряжений [11]. Пластическая деформация материала возникает, когда реактивные напряжения достигают предела текучести.

В экспериментах по циклированию мартенситных превращений в условиях заневоливания образца отмечается эффект генерации реактивных напряжений в ходе обратного мартенситного превращения, возникающий при фиксировании деформации в никелиде титана.

При достижении некоторого значения фиксированной деформации, когда обратимая деформация выходит на насыщение начинает проявляться эффект стабилизации мартенситной фазы механическими напряжениями, локализованными на единичных мартенситных кристаллах [12]. Чем выше реактивные напряжения в цикле, тем выше эффект стабилизации. Под стабилизацией мартенситной фазы понимается снижение содержания мартенситных кристаллов при проведении циклов мартенситного превращения.

### Список литературы

1. Гусев Д.Е., Коллеров М.Ю., Шаронов А.А., Гуртовой С.И. Исследование реактивных напряжений, генерируемых имплантатами из сплавов на основе никелида-титана. Титан 1. 2015. С. 42–45.
2. Грязнов А.С., Плотников В.А., Макаров С.В. Регистрация и обработка экспериментальных данных при исследовании методом акустической эмиссии // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2019. Т. 3, № 1. С. 138–143.
3. Солдатова М.И., Ходоренко В.Н., Гюнтер В.Э. Физико-механические и прочностные свойства сплавов на основе никелида титана (ТН-10, ТН-20, ТН-1В) // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322, № 2. С. 135–139.
4. Регистратор данных АЦП – (dotScope): свид. гос. рег. прогн. ЭВМ № 2008612034 / В.А. Плотников, А.С. Грязнов; заявитель и правообладатель Алтайский государственный университет. № 2008610809; Заявл. 28.02.08. Оpubл. 23.04.2008.
5. «Регистратор данных АЦП» – dotScope opensource project [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sf.net/p/dotscope/>, свободный.
6. Плотников В.А., Грязнов А.С. Аномальный акустический эффект при термоупругих мартенситных превращениях в никелиде титана в условиях фиксированной деформации // Материаловедение. 2009. № 3. С. 2–6.
7. Гюнтер В.Э. Эффект памяти формы и их применение в медицине. Новосибирск: Наука, 1992. 742 с.
8. Плотников В.А., Монасевич Л.А., Паскаль, Ю.И. Исследование фазового наклепа и его отжига в сплавах на основе TiNi методом

акустической эмиссии // ФММ. 1986. Т. 61, № 4. С. 769–773.

9. Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н., Чекалкин Т.Л., и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Медицинские материалы с памятью формы. Т. 1. Томск: Изд-во МИЦ, 2011. 534 с.

10. Беляев С.А., Волков А.Е., Ермолаев В.А., Каменцева З.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Хайров Р.Ю. Материалы с эффектом памяти формы. Т. 2. Санкт Петербург, Россия: Издательство Санкт-Петербургского университета. 1998. 474 с.

11. Егоров С.А. Влияние реактивных напряжений на теплоту мартенситных превращений в никелиде титана // Журнал Технической Физики. 2006. 76(1). С. 37–41.

12. Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В. В. Никелид титана: Структура и свойства. Москва, СССР: Наука. 1992. 161 с.

### Информация об авторах

*В. А. Плотников – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета.*

*А. В. Гусева – аспирант кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета.*

*А. С. Грязнов – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технологических дисциплин Алтайского государственного педагогического университета.*

### References

1. Gusev, D. E., Kollerov, M. Yu., Sharonov, A. A. & Gurtovoy, S. I. (2015). Investigation of reactive stresses generated by implants made of nickel-titanium alloys. Titan 1. P. 42–45. (In Russ.).
2. Gryaznov, A. S., Plotnikov, V. A. & Makarov, S. V. (2019). Registration and processing of experimental data in the study by acoustic emission method. *High-performance computing systems and technologies*, 1(13), 138–143. (In Russ.).
3. Soldatova, M. I., Khodorenko, V. N. & Gunter, V. E. (2013). Physico-mechanical and strength properties of alloys based on titanium nickelide (TN-10, TN-20, TN-1B). *Izvestiya Tomsk Polytechnic University*, 2(322), 135–139. (In Russ.).

4. ADC data recorder (dotScope): svid. gos. reg. progr. Computer No. 2008612034 / V. A. Plotnikov, A. S. Gryaznov; applicant and copyright holder Altai State University. No. 2008610809. Application 28.02.08. Published 23.04.2008. (In Russ.).
5. «ADC Data Logger» – dotScope opensource project [Electronic resource]. – Access mode: <https://sf.net/p/dotscope/>, free. (In Russ.).
6. Plotnikov, V. A. & Gryaznov, A. S. (2009). Anomalous acoustic effect during thermoelastic martensitic transformations in titanium nickelide under conditions of fixed deformation. *Materials Science*, 3, 2–6. (In Russ.).
7. Gunter, V. E. (1997). Shape memory effect and their application in medicine. Novosibirsk: Nauka. P. 742. (In Russ.).
8. Plotnikov, V. A., Monasevich, L. A. & Pascal, Yu. I. (1986). Investigation of phase hardening and its annealing in TiNi-based alloys by acoustic emission method. *FMM*, 4(61), 769–773. (In Russ.).
9. Gunter, V. E., Khodorenko, V. N. & Chekalkin, T. L., et al. (2011). Medical materials and implants with shape memory. Medical materials with form memory. Vol. 1. Tomsk: Publishing House of MIT. P. 534. (In Russ.).
10. Belyaev, S. A., Volkov, A. E., Ermolaev, V. A., Kamentseva, Z. P., Kuzmin, S. L., Likhachev, V. A. & Khayrov, R. Yu. (1998). Materials with shape memory effect. Vol. 2. Saint Petersburg, Russia: St. Petersburg University Press. P. 474. (In Russ.).
11. Egorov, S. A. (2006). Influence of reactive stresses on the heat of martensitic transformations in titanium nickelide. *Journal of Technical Physics*, 76(1), 37–41. (In Russ.).
12. Khachin, V. N., Pushin, V. G., & Kondratiev, V. V. (1992). Titanium Nickelide: Structure and properties. Moscow, USSR: Nauka. P. 161. (In Russ.).

#### **Information about the authors**

*V. A. Plotnikov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of General and Experimental Physics, Altai State University.*

*A. V. Guseva – Postgraduate student of the Department of General and Experimental Physics, Altai State University.*

*A. S. Gryaznov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Disciplines, Altai State Pedagogical University.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 25.04.2022; одобрена после рецензирования 02.05.2022; принята к публикации 10.05.2022.

The article was received by the editorial board on 25 Apr. 22; approved after reviewing on 02 May. 22; accepted for publication on 10 May.22.