

Научная статья
1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)
УДК 539.3
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.004

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ И ВОЗВРАТА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ЦИКЛИРОВАНИИ В СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

**Владимир Александрович Плотников^{1†}, Анна Васильевна Гусева²,
Александр Сергеевич Грязнов³, Сергей Сергеевич Пругов⁴**

^{1, 2, 4} Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, 656049, Барнаул, Россия
³ Алтайский государственный медицинский университет, ул. Ленина, 40, 656038, Барнаул, Россия
¹ plotnikov@phys.asu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>
² schannavac@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1671-1304>
³ gryaznov-as@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0413-907X>
⁴ prugovs@mail.ru

Аннотация. Проведены исследования процесса накопления и возврата деформации при многократном циклировании мартенситных превращений в никелиде титана в условиях механического нагружения. Отмечено, что кроме обратимой деформации в каждом цикле отмечается накопление остаточной деформации. При этом, чем выше внешняя нагрузка, тем меньше величина обратимой деформации из-за накопления большой величины остаточной деформации. Накопление остаточной деформации свидетельствует о блокировке мартенситных кристаллов локальными полями механических напряжений (стабилизация мартенситной фазы), сформированными скоплениями полных дислокаций как результат фазового наклепа в сплаве на основе никелида титана. Эти мартенситные кристаллы уже не участвуют в циклах прямого и обратного превращения. Остаточная деформация ограничивает обратимый деформационный ресурс в условиях термомеханического нагружения.

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

Для цитирования: Плотников В.А., Гусева А.В., Грязнов А.С., Пругов С.С. Особенности накопления и возврата деформации при многократном циклировании в сплавах с памятью формы // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 2. С. 172–178. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.004.

Original article

FEATURES OF ACCUMULATION AND RETURN OF DEFORMATION DURING MULTIPLE CYCLING IN ALLOYS WITH SHAPE MEMORY

Vladimir A. Plotnikov^{1†}, Anna V. Guseva², Alexander S. Gryaznov³, Sergey S. Prugov⁴

^{1, 2, 4} Altai State University, Lenin Pr., 61, Barnaul, 656049, Russia
³ Altai State Medical University, Lenin Str., 40, Barnaul, 656038, Russia
¹ plotnikov@phys.asu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>
² schannavac@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1671-1304>
³ gryaznov-as@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0413-907X>
⁴ prugovs@mail.ru

Abstract. Studies of the process of accumulation and return of deformation during repeated cycling of martensitic transformations in titanium nickelide under mechanical loading conditions have been carried out. It is noted that in addition to reversible deformation, the accumulation of residual deformation is noted in each cycle. At the same time, the higher the external load, the smaller the amount of reversible deformation due to the accumulation of

a large amount of residual deformation. The accumulation of residual deformation indicates the blocking of martensitic crystals by local fields of mechanical stresses (stabilization of the martensitic phase) formed by clusters of complete dislocations as a result of phase hardening in an alloy based on titanium nickelide. These martensitic crystals no longer participate in the cycles of direct and reverse transformation. Residual deformation limits the reversible deformation life under thermomechanical loading conditions.

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

For citation: Plotnikov, V. A., Guseva, A. V., Gryaznov, A. S. & Prugov, S. S. (2024). Features of accumulation and deformation during multiple cecling in alloys with shape memory. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(2), 172–178. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.004.

Введение

Сплавы на основе никелида титана обладают уникальными свойствами, такими как эффект памяти формы и сверхэластичность, которые связаны с мартенситным механизмом накопления и возврата деформации в цикле термоупругих мартенситных превращений. В основе мартенситного механизма накопления и возврата деформации лежит движение мартенситных границ, представляющее собой кооперативный переход атомов из исходной фазы в конечную [1]. Этот согласованный (кооперативный) процесс перемещения атомов определяет кристаллографический обратимый деформационный ресурс, величина которого может достигать 27 %. Однако в экспериментах достигнутая величина обратимой деформации значительно ниже и составляет 9-10 %, причем наблюдается заметный недовозврат деформации [2]. Рассчитанное в [2] максимальное значение обратимой деформации обеспечено фактически деформацией формы и деформацией решетки (в работе [2] рассмотрены четыре вклада, но их можно свести к двум).

Стоит отметить, что эффект сверхэластичности будет наблюдаться при деформировании никелида титана в интервале температур прямого мартенситного превращения и разгрузке в интервале температур обратного превращения. В этом случае, при нагружении происходит накопление деформации, а при разгрузке – её возврат [3].

При нагреве материала в интервале температур обратного превращения, который был деформирован в мартенситном состоянии, будет происходить процесс возврата деформации, то есть реализуется однократный эффект памяти формы. Если осуществлять термоциклирование материала в условиях внешнего нагружения, то помимо накопления деформации при прямом $B2 \rightarrow B19'$ и ее возврата при обратном превращении будет наблюдаться ее недовоз-

врат [4]. Этот недовозврат деформации может быть связан с эффектами фазового наклёпа и стабилизацией мартенситной фазы [5].

Как уже было сказано, в ходе мартенситных превращений в условиях действия внешнего напряжения происходит накопление и возврат деформации. Эта деформация (мартенситная деформация) проявляется тем отчетливее, чем менее выражены сопутствующие процессы, не связанные с самой природой мартенситных превращений (такие процессы как: пластическая деформация (пластическая релаксация напряжений)). В отличие от мартенситной деформации, которая полностью обратима в результате изотермической разгрузки или нагрева до температуры окончания обратного мартенситного превращения, пластическая деформация необратима и наследуется в цикле мартенситных превращений [6].

Целью работы является исследование закономерностей накопления и возврата деформации в ходе циклирования термоупругих мартенситных превращений в никелиде титана в условиях внешнего механического нагружения. Циклирование мартенситных превращений путем осуществления термоциклов в условиях внешней нагрузки образца никелида титана фактически является осуществлением термодинамических циклов, позволяющих проследить эволюцию структурно-фазовых состояний при изменении температуры и механического напряжения. С другой стороны, накопление и возврат деформации в силовых элементах на основе никелида титана требует учета особенностей реализации эффекта памяти формы в этих устройствах.

Материалы и методы

Для исследования деформационных особенностей был выбран образец сплава $Ti_{50}Ni_{49.9}Mo_{0.1}$ (геометрия образца: $h = 50$ мм, $a = 2,5$ мм, $b = 1$ мм), где h – длина образца, a –

высота, b – ширина). С образцом проводилось четыре серии экспериментов до 11 температурных циклов в интервале температур, содержащем температурный интервал мартенситных превращений. Перед каждым экспериментом образец отжигался при температуре 650 °С для приведения его в исходное структурное состояние. После отжига образец охлаждался до комнатной температуры и затем происходил нагрев образца до 200 °С и его нагружение для создания сдвиговой деформации и последующее охлаждение до комнатной температуры. То есть охлаждение образца до комнатной температуры под нагрузкой являлось началом первого цикла, в котором осуществлялось прямое $B2 \rightarrow B19'$ превращение. Последующий нагрев до 200 °С завершал первый цикл, в ходе которого осуществлялось $B19' \rightarrow B2$ превращение.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 показан процесс накопления и возврата деформации во втором цикле термоупругих мартенситных превращений в $Ti_{50}Ni_{49,9}Mo_{0,1}$ при внешнем напряжении 86 МПа. Как видно, в полуцикле охлаждения от 200 °С идет процесс накопления деформации, обусловленный превращением $B2 \rightarrow B19'$. В полуцикле нагрева образца наблюдается возврат деформации, который происходит за счет обратного мартенситного превращения $B19' \rightarrow B2$. При этом величина обратимой деформации (3) меньше деформации, накапливаемой в полуцикле охлаждения (2) на величину прироста остаточной деформации (4).

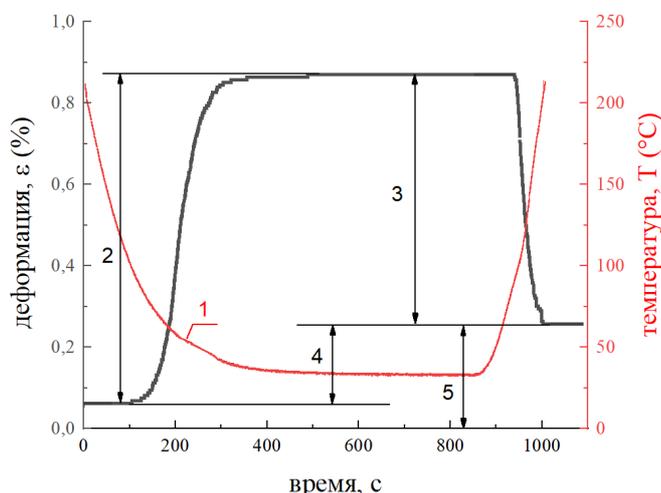


Рис.1. Накопление и возврат деформации в цикле термоупругих мартенситных превращений в $Ti_{50}Ni_{49,9}Mo_{0,1}$ при внешнем напряжении 86 МПа: 1 – температура в цикле охлаждение–нагрев образца; 2 – накопление деформации при охлаждении образца; 3 – возврат деформации при нагреве образца (обратимая деформация); 4 – прирост остаточной деформации в цикле; 5 – остаточная деформация, накопленная в циклах превращений

Fig.1. Accumulation and return of deformation in the cycle of the martensitic transformations in $Ti_{50}Ni_{49,9}Mo_{0,1}$ at an stress of 86 МПа: 1 – temperature in the cooling-heating cycle of the sample; 2 – accumulation of deformation during cooling of the sample; 3 – return of deformation during heating of the sample (reversible deformation); 4 – increase in residual deformation in the cycle; 5 – residual deformation accumulated in transformation cycles

Таким образом, в каждом цикле наблюдается накопление остаточной деформации (5), величина которой растёт от цикла к циклу на величину прироста деформации 4 в цикле.

Результаты обработки серий экспериментов представлены на рисунке 2 как зависимости деформационных мод от номера цикла.

Как видно из рисунка 2, при постоянном приложенном механическом напряжении в ходе цикла охлаждение-нагрев происходит увеличение остаточной деформации. При низких

механических напряжениях обратимая деформация сначала растёт, а затем снижается, пройдя точку максимума (цикл 5 на рис.2). При больших напряжениях наблюдается только снижение обратимой деформации, остаточная – монотонно растёт в серии циклов. Можно отметить тенденцию в поведении обратимой и остаточной деформаций – и обратимая деформация и остаточная деформация выходят на насыщение при многократном циклировании мартенситных превращений. Также стоит отме-

тить, что при низких механических нагрузках наблюдается преобладание обратимой деформации над остаточной деформацией, напротив,

в случае высоких механических нагрузок остаточная деформация превосходит обратимую деформацию.

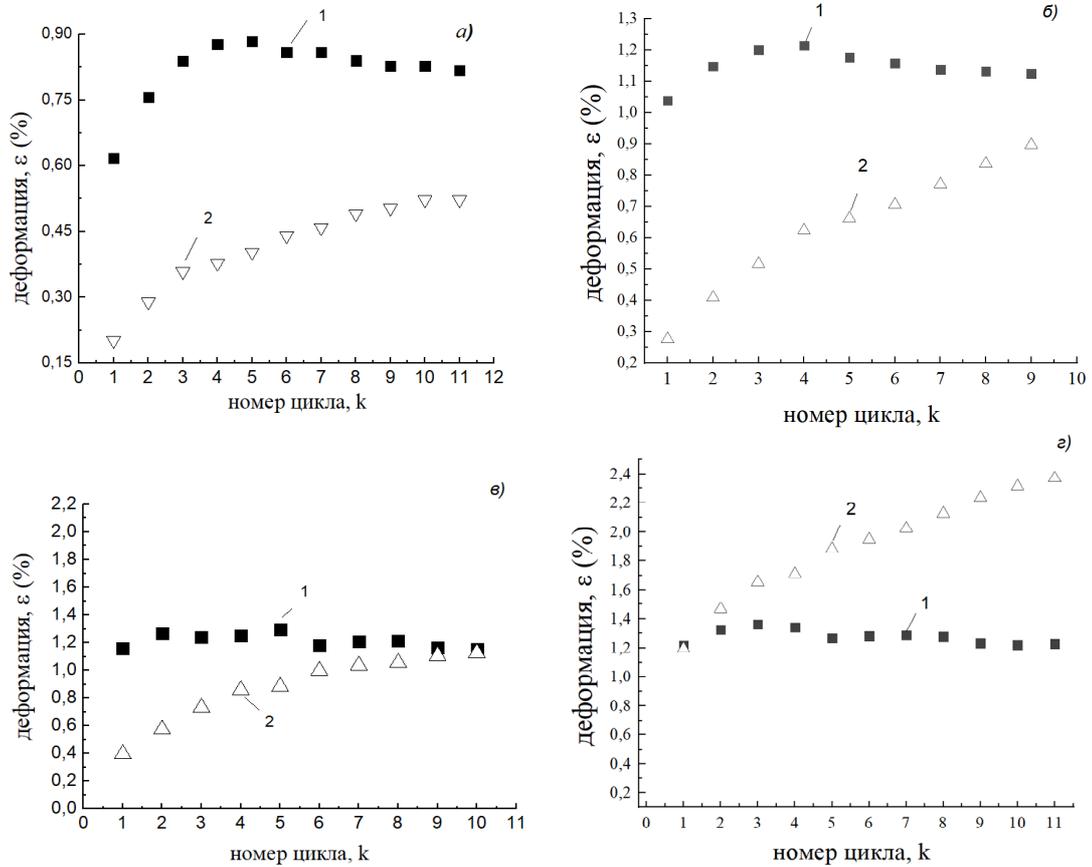
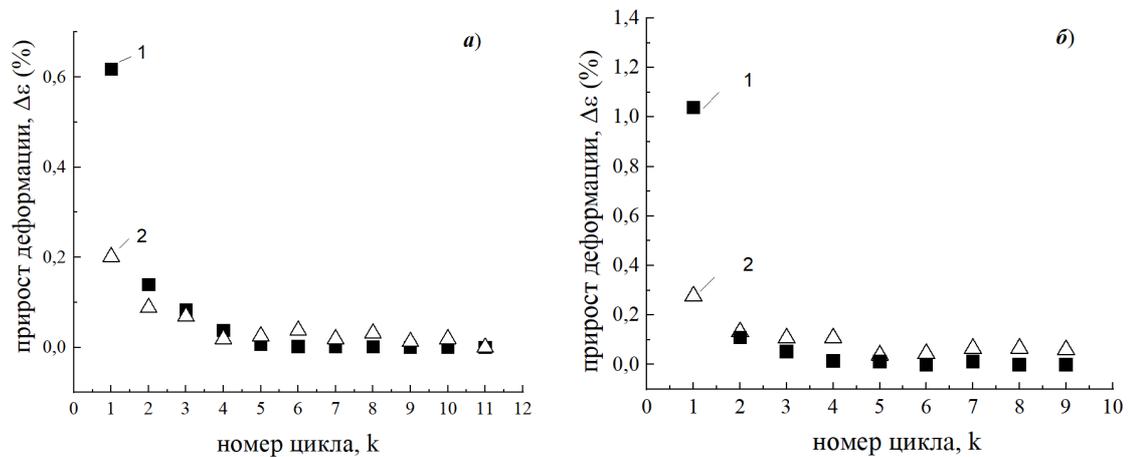


Рис.2. Зависимость деформации сплава Ti₅₀Ni_{49.9}Mo_{0.1} от номера цикла: а) при 86 МПа; б) при 119 МПа; в) при 152 МПа; г) при 252 МПа: 1 – обратимая деформация, 2 – остаточная деформация

Fig.2. Dependence of the deformation of Ti₅₀Ni_{49.9}Mo_{0.1} alloy on the cycle number: а) at 86 MPa; б) at 119 MPa; в) at 152 MPa; г) at 252 MPa: 1 – reversible deformation, 2 – residual deformation

На рисунке 3 показана зависимость прироста деформации сплава Ti₅₀Ni_{49.9}Mo_{0.1} от но-

мера цикла термоупругих мартенситных превращений.



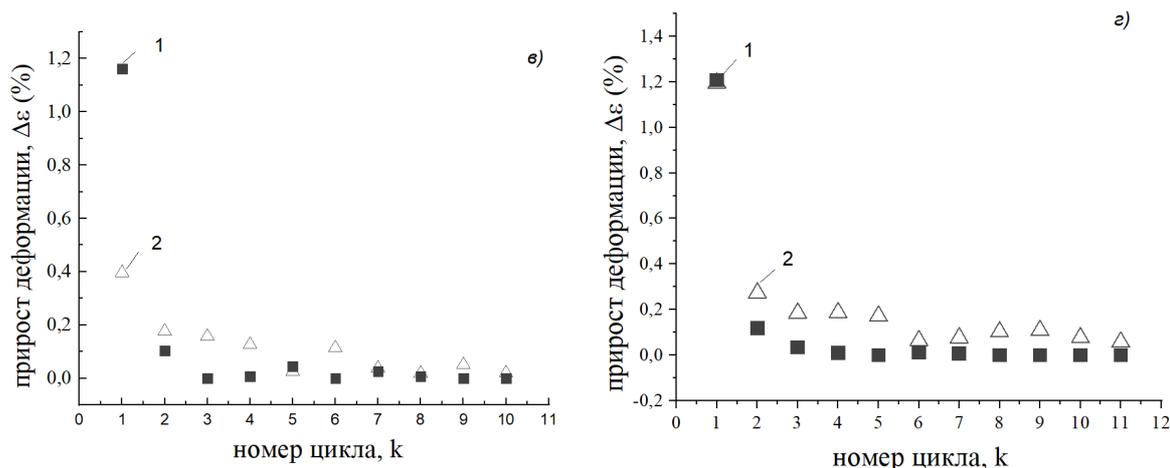


Рис.3. Зависимость прироста деформации сплава $Ti_{50}Ni_{49,9}Mo_{0,1}$ от номера цикла: а) при 86 МПа; б) при 119 МПа; в) при 152 МПа; г) при 252 МПа: 1 – обратимая деформация, 2 – остаточная деформация

Fig.3. Dependence of the increase in deformation of the $Ti_{50}Ni_{49,9}Mo_{0,1}$ on the cycle number: а) at 86 МПа; б) at 119 МПа; в) at 152 МПа; д) at 252 МПа: 1 – reversible deformation, 2 – residual deformation

Зависимость прироста деформации (обратимой и остаточной) от номера цикла проанализируем экспоненциальной функцией (1) для получения характеристик кривых:

$$\Delta \varepsilon_k = \varepsilon_0 \cdot \exp(-\beta \cdot k) + \varepsilon_n, \quad (1)$$

где ε_n – уровень насыщения прироста деформации; ε_0 – значение деформации в нулевом цикле; β – коэффициент в показателе экс-

поненты (1), характеризующий скорость снижения прироста деформации, k – номер цикла мартенситных превращений.

В таблицах 1 и 2 приведены параметры функции, аппроксимирующей зависимость прироста обратимой и остаточной деформации сплава $Ti_{50}Ni_{49,9}Mo_{0,1}$ от номера цикла.

Таблица 1. Параметры аппроксимации уравнением (1) кривых обратимой деформации

Table 1. Parameters of approximation by equation (1) of curves of reversible deformation

Сплав	Нагрузка, МПа	ε_0 , %	ε_n , %	β	R^2
$Ti_{50}Ni_{49,9}Mo_{0,1}$	86	$2,39 \pm 0,29$	$0,007 \pm 0,006$	$1,37 \pm 0,16$	0,991
	119	$9,9 \pm 1,87$	$0,009 \pm 0,008$	$2,26 \pm 0,27$	0,998
	152	$14,49 \pm 2,93$	$0,01 \pm 0,006$	$2,53 \pm 0,29$	0,998
	252	$12,35 \pm 0,93$	$0,006 \pm 0,003$	$2,33 \pm 0,31$	0,999

Таблица 2. Параметры аппроксимации уравнением (1) кривых остаточной деформации

Table 2. Parameters of approximation of residual deformation curves by equation (1)

Сплав	Нагрузка, МПа	ε_0 , %	ε_n , %	β	R^2
$Ti_{50}Ni_{49,9}Mo_{0,1}$	86	$0,41 \pm 0,07$	$0,018 \pm 0,005$	$0,82 \pm 0,47$	0,978
	119	$0,49 \pm 0,14$	$0,055 \pm 0,017$	$0,83 \pm 0,27$	0,937
	152	$0,67 \pm 0,17$	$0,047 \pm 0,023$	$0,88 \pm 0,21$	0,911
	252	$6,22 \pm 1,67$	$0,108 \pm 0,017$	$1,75 \pm 0,13$	0,98

Основной характеристикой зависимости является коэффициент β в показателе экспоненты. Как видно из таблицы 2, значения коэффициента β для остаточной деформации увеличиваются при увеличении нагрузки в сплаве $Ti_{50}Ni_{49,9}Mo_{0,1}$. Увеличение значения коэффициента в показателе экспоненты указывает на более интенсивные деформационные процессы в сплаве при повышенных нагрузках. Фазовый наклеп, как один из факторов, влияющих на деформационные процессы, может вносить свой вклад в увеличение β . Это может означать, что фазовый наклеп способствует более интенсивной деформации материала при циклических нагрузках.

Наблюдаемый прирост остаточной деформации в циклах свидетельствует о перераспределении обратимого деформационного ресурса между остаточной и обратимой деформациями в циклах мартенситных превращений в пользу остаточной, особенно заметный при высоких механических нагрузках, где прирост остаточной деформации превышает прирост обратимой. Вовлечение аккомодационных мартенситных кристаллов при увеличении напряжения в мартенситную деформацию и перераспределение ее в остаточную может быть связано с фиксацией некоторой доли мартенситных кристаллов в полях напряжений, локализованных в окрестности этих кристаллов.

В ряде работ [4, 5, 10] указано, что при совершении цикла мартенситных превращений происходит изменение кристаллической структуры материала. Это изменение сопровождается образованием структурных дефектов, таких как полные дислокации. Эти дефекты не могут полностью восстанавливаться и остаются в материале после превращений. Накопление структурных дефектов, включая полные дислокации, может привести к упрочнению сплава. Дислокации являются местами концентрации напряжений и препятствуют движению дефектов и пластической деформации. Это делает материал более прочным и устойчивым к деформации.

Очевидно, фазовый наклеп может приводить к стабилизации мартенситной фазы, то есть являться фактором, влияющим на деформационные процессы в циклах мартенситных превращений.

Заключение

В экспериментах по термомеханическому циклированию сплава $Ti_{50}Ni_{49,9}Mo_{0,1}$ для исследования закономерностей накопления и возврата деформации установлено, что кроме обратимой деформации в каждом цикле отмечается

накопление остаточной деформации, величина которой растёт от цикла к циклу на величину прироста остаточной деформации в цикле. Накопление остаточной деформации, очевидно, осуществляется как за счёт фазового наклепа, так и за счёт стабилизации мартенситных кристаллов, заблокированных структурными дефектами, генерируемыми при протекании прямого-обратного мартенситных превращений.

Фазовый наклеп связан с накоплением полных дислокаций в кристаллической структуре материала в процессе мартенситных превращений. Этот процесс приводит к накоплению необратимой деформации, которая не может быть сведена к нулевому значению даже высокотемпературным отжигом.

С другой стороны, образование структурных дефектов, таких как полные дислокации, может быть следствием неоднородности превращений внутри материала. Эти дефекты могут долговременно оставаться в материале и стать местами стабилизации мартенситных кристаллов.

Список литературы

1. Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В. Никелид титана: Структура и свойства. М.: Наука, 1992. 160 с.
2. Борисова С.Д., Монасевич Л.А., Паскаль Ю.И. Кристаллографический расчет обратимой деформации при эффектах памяти формы никелида титана // Металлофизика. 1983. Т. 5, № 2. С. 66–70.
3. Гюнтер Э.В., Ходоренко В.Н., Ясенчук Ю.Ф. и др. Никелид титана. Томск: Изд-во МИЦ, 2006. 296 с.
4. Паскаль Ю.И., Ерофеев В.Я., Монасевич Л.А. Кинетика мартенситного превращения в сплавах на основе $TiNi$ под постоянной внешней нагрузкой // Металлофизика. 1984. Т. 6, № 6. С. 36–40.
5. 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.
6. Плотников В.А., Грязнов А.С. Акустическая эмиссия при термоупругих мартенситных превращениях в условиях фиксированной деформации // Известия вузов. Физика. 2009. Т. 52, № 3. С. 12–18.
7. 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.

8. 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.

9. Регистратор данных АЦП (dotScope): свид. гос. рег. прогр. ЭВМ №2008612034 / В. А. Плотников, А. С. Грязнов; заявитель и правообладатель Алтайский государственный университет. № 2008610809; заявл. 28.02.08 опубл. 23.04.2008.

10. Клопотов А.А., Ясенчук Ю.В., Голобиков Н.Н. и др. Рентгеноструктурные исследования мартенситных превращений в никелиде титана под действием внешней нагрузки // ФММ. 2000. Т. 90, № 4. С. 59–62.

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 физики и информатики Алтайского государственного медицинского университета.

С. С. Пругов – аспирант кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета.

References

1. Khachin, V. N., Pushin, V. G. & Kondratiev, V. V. (1992). Titanium nickelide: Structure and properties. M.: Nauka. P. 160. (In Russ.).

2. Borisova, S. D., Monasevich, L. A. & Pascal, Yu. I. (1983). Crystallographic calculation of reversible deformation under the shape memory effects of titanium nickelide. *Metallophysics*, 5(2), 66–70. (In Russ.).

3. Gunter, E. V., Khodorenko, V. N., Yasenchuk, Yu. F. et al. (2006). Titanium nickelide. Tomsk: Publishing House of MIT. P. 296. (In Russ.).

4. Pascal, Yu. I., Yerofeev, V. Ya. & Monasevich, L. A. (1984). Kinetics of martensitic transformation in TiNi-based alloys under constant

external load. *Metallophysics*, 6(6), 36–40. (In Russ.).

5. 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*, 61(4), 769–773. (In Russ.).

6. Plotnikov, V. A. & Gryaznov, A. S. (2009). Acoustic emission during thermoelastic martensitic transformations under fixed temperature conditions deformations. *Izvestiya vuzov. Physics*, 52(3), 12–18. (In Russ.).

7. 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*, 322(2), 135–139. (In Russ.).

8. Gunter, V. E., Khodorenko, V. N., Chekalkin, T. L. et al. (2011). Medical materials and implants with shape memory. Tomsk: Publishing House of MIT. P. 534. (In Russ.).

9. Plotnikov, V. A. & Gryaznov, A. S. (2008). ADC data logger (dotScope): свид. state reg. prog. Computer No. 2008612034. *Applicant and copyright holder Altai State University*, 2008610809.

10. Klopotov, A. A., Yasenchuk, Yu. V., Golobikov, N. N. et al. (2000). X-ray diffraction studies of martensitic transformations in titanium nickelide under the action of an external load. *FMM*, 90(4), 59–62. (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 of the Altai State University.

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

A. S. Gryaznov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Associate Professor of the Department of Physics and Informatics of the Altai State Medical University.

S. S. Prugov – Postgraduate student of the Department of General and Experimental Physics of the Altai State University.

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

Статья поступила в редакцию 12.04.2024; одобрена после рецензирования 06.05.2024; принята к публикации 20.05.2024.

The article was received by the editorial board on 12 Apr. 24; approved after reviewing 06 May 24; accepted for publication 20 May 24.