

УДК 669.017.3

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА TiNi ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Остропико Е.С.¹, Разов А.И.¹, Моторин А.С.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты исследования влияния скорости деформирования при различных температурах на проявление однократной и обратимой памяти формы в сплаве TiNi. Предварительное высокоскоростное деформирование образцов проводили на установке, реализующей метод Кольского для разрезного стержня Гопкинсона со скоростью деформирования около 10^3с^{-1} . Предварительное квазистатическое деформирование проводили на универсальной испытательной машине Instron, со скоростью деформирования 10^{-3}с^{-1} . В работе показано, что высокая скорость деформирования в режиме растяжения не приводит к улучшению функциональных свойств никелида титана. Однако высокая скорость предварительного деформирования в режиме сжатия может привести к улучшению функциональных свойств. Приведены данные о том, что величины однократной памяти формы и обратимой памяти формы мартенситного типа после высокоскоростного сжатия в интервале температур 20-60°C выше, чем после квазистатического сжатия. Обратимая память формы аустенитного типа после высокоскоростного сжатия всегда больше, чем после квазистатического сжатия.

Ключевые слова: эффект памяти формы; обратимая память формы; никелид титана; высокоскоростное деформирование

FUNCTIONAL PROPERTIES OF TiNi ALLOY AFTER HIGH-STRAIN RATE DEFORMATION AT DIFFERENT TEMPERATURES

Ostropiko E.S.¹, Razov A.I.¹, Motorin A.S.²

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

The paper presents the results of a study of the effect of the strain rate at various temperatures on the one-way and a two-way shape memory effects in a TiNi alloy. Preliminary high-strain rate deformation was carried out according to the Kola method for the split Hopkinson rod with a strain rate of about 10^3s^{-1} . Preliminary quasistatic deformation was conducted using the Instron universal testing machine, with a strain rate of 10^{-3}s^{-1} . It is shown that the preliminary high-strain rate tension does not lead to an improvement in the functional properties of TiNi alloy. However, the preliminary high-strain rate compression can lead to improvement of functional properties of TiNi alloy. Presented results show that the values of the one-way shape memory effect and a two-way shape memory effect of the martensitic type after preliminary high-strain rate

compression in the temperature range 20-60°C are higher than after quasistatic compression. The two-way shape memory effect of the austenitic type after preliminary high-strain rate compression is always greater than after quasistatic compression.

Keywords: shape memory effect; two-way shape memory; TiNi alloy; high-strain rate

ВВЕДЕНИЕ

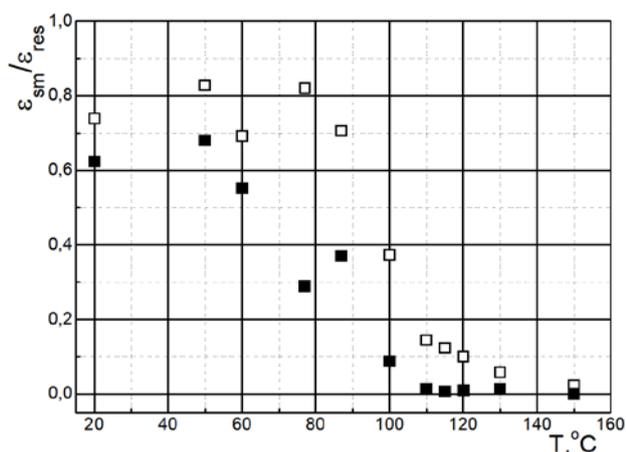
Известно, что функциональные и механические свойства материалов зависят от режима деформирования, разумеется, это касается и материалов с памятью формы. В научной литературе представлено большое количество исследований влияния различных скоростей и схем деформирования на свойства материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ), однако, подавляющее число исследований направлено на изучение влияния скорости деформирования на механические свойства, на псевдоупругость, на температуры мартенситных превращений. Функциональные же свойства никелида титана после динамического деформирования не были в достаточной мере исследованы. Одна из первых работ, посвященных изучению влияния скорости деформирования на свойства сплава TiNi, датируется 1988-м годом [1]. В ней были показаны зависимости механических свойств от скорости и температуры сжатия. В работе [2] авторы исследовали влияние скорости деформирования на проявление эффекта псевдоупругости. Если говорить об исследованиях, направленных именно на функциональные свойства, то, в первую очередь, стоит отметить работы В.А. Лихачева 1988-го года [3], где впервые была изучена обратимая память формы (ОПФ) после деформирования с различными скоростями и 1990-го [4], где было изучено влияние скорости деформирования на эффект памяти формы в никелиде титана. Деформирование проводилось при комнатной температуре. Если говорить о современных исследованиях, то они преимущественно направлены на структурные исследования мартенсита и аустенита и почти не затрагивают функциональные свойства, либо исследуют их после деформирования в узком интервале температур [5,6]. Стоит упомянуть работу [7], в которой проводили исследование влияния скорости сжатия при комнатной температуре на эффекты однократной и обратимой памяти формы. В этой работе были получены предпосылки к тому, что высокоскоростное деформирование в режиме сжатия может приводить к улучшению функциональных свойств, что, безусловно, вызывает интерес для более комплексного изучения этого вопроса. Таким образом, целью этой работы является исследование функциональных свойств никелида титана после высокоскоростного и квазистатического деформирования в режимах растяжения и сжатия при различных температурах. Данная работа является продолжением исследований, начатых несколько лет назад [8,9].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

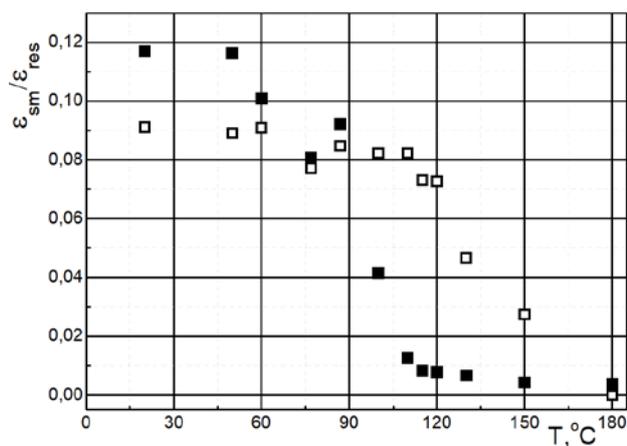
Для высокоскоростного и квазистатического растяжения были использованы цилиндрические образцы с рабочей частью диаметром 5 мм и длиной 10 мм. Образцы изготавливали из горячекатаных прутков экваторного никелида титана, которые после отжига при 500°C в течение 1 часа и последующего охлаждения с печью обладали следующими характеристическими температурами мартенситного превращения: $M_f = 32^\circ\text{C}$,

$M_s = 74^\circ\text{C}$, $A_s = 74^\circ\text{C}$, $A_f = 98^\circ\text{C}$. В качестве объектов исследования при сжатии использовали цилиндрические образцы из того же материала высотой 4 мм и диаметром 8 мм.

Высокоскоростное деформирование образцов проводили на установке, реализующей метод Кольского для разрезного стержня Гопкинсона со скоростью деформирования около 10^3c^{-1} в Научно-исследовательском институте механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Квазистатическое деформирование проводили на универсальной испытательной машине Instron со скоростью деформирования 10^{-3}c^{-1} . Температуры испытаний: $20\text{-}300^\circ\text{C}$ – достигались нагревом от комнатной температуры. Такой выбор температур позволил рассмотреть проявление функциональных свойства сплава после деформирования в мартенситном, аустенитном и смешанном состоянии. После деформирования образцы были дважды термоциклированы через интервалы температур прямого и обратного мартенситного превращения со скоростью порядка 2 К/мин. По полученным зависимостям деформации от температуры была измерена величина эффекта памяти формы ε_{sm} при первом нагреве, и величина обратимой памяти формы ε_{twsm} при втором нагреве.



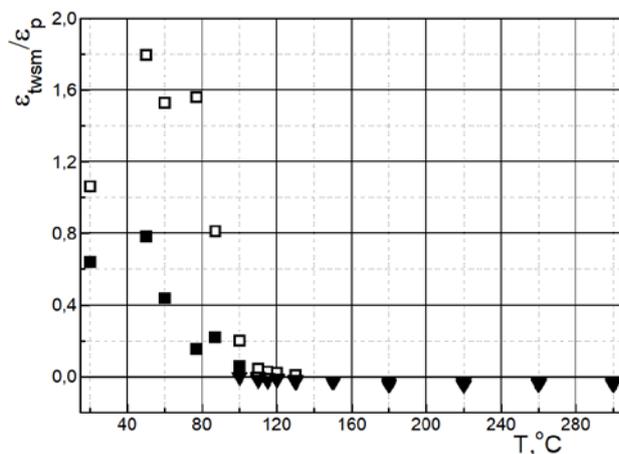
а



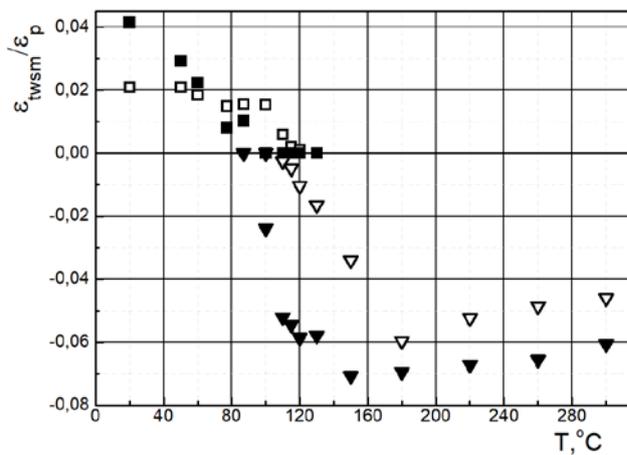
б

Рис.1. Зависимость коэффициента возврата деформации ($\varepsilon_{sm}/\varepsilon_{res}$) от температуры предварительного деформирования растяжением (а), сжатием (б): □ – квазистатическое деформирование; ■ – высокоскоростное деформирование.

Разброс величины полной деформации, полученной в результате высокоскоростного деформирования, приводил к различиям в остаточной и необратимой деформации. С целью снизить влияние этого разброса при анализе зависимостей величины эффекта памяти формы от температуры испытания было использовано классическое соотношение $\varepsilon_{\text{twsm}}/\varepsilon_{\text{res}}$ (коэффициент возврата), где ε_{res} – величина остаточной деформации (рис.1.).



а



б

Рис.2. Зависимость отношения $\varepsilon_{\text{twsm}}/\varepsilon_p$ от температуры деформирования растяжением (а) и сжатием (б): □, ■ – ОПФ мартенситного типа; ▽, ▼ – ОПФ аустенитного типа; □, ▽ – квазистатическое нагружение; ■, ▼ – высокоскоростное нагружение.

Эффект памяти формы как в относительных к остаточной деформации, так и в абсолютных величинах, после растяжения больше, чем после сжатия, и с ростом температуры предварительного деформирования уменьшается с убыванием количества мартенсита, что очевидно. ЭПФ, инициированный высокоскоростным нагружением, с ростом температуры испытания уменьшается быстрее, чем инициированный квазистатическим нагружением в обоих случаях. При испытаниях на растяжение видно, что величина ЭПФ после квазистатического деформирования всегда выше, чем после высокоскоростного. Однако при испытаниях на сжатие видно, что предварительное высокоскоростное сжатие в интервале температур 20-60°C проявляет себя выгоднее с точки зрения

реализации эффекта памяти формы, чего не наблюдается в экспериментах на растяжение.

В материалах с памятью формы наблюдается два типа обратимой памяти формы: «положительная» мартенситного типа и «отрицательная» аустенитного типа [10].

При анализе зависимостей величины обратимой памяти формы от температуры предварительного деформирования (рис.2.) для избавления от разброса остаточных деформаций было использовано еще одно классическое отношение $\varepsilon_{\text{twsm}}/\varepsilon_p$. Здесь ε_p – необратимая пластическая деформация ($\varepsilon_p = \varepsilon_{\text{res}} - \varepsilon_{\text{sm}}$).

Обратимая память формы мартенситного типа ведет себя аналогично однократному эффекту памяти формы в обоих случаях. После предварительного сжатия наблюдается аналогичная особенность: предварительное высокоскоростное сжатие в интервале температур 20-60°C приводит к более сильному проявлению ОПФ мартенситного типа.

Высокоскоростное растяжение при температурах 90-130°C приводит к более сильному проявлению ОПФ аустенитного типа, чем после квазистатического растяжения, однако квазистатическое растяжение позволило достичь тех же величин ОПФ аустенитного типа, только при более высоких температурах. Стоит заметить, что после растяжения величина ОПФ аустенитного типа крайне мала по сравнению с ОПФ мартенситного типа. После высокоскоростного сжатия величина ОПФ аустенитного типа всегда больше, чем после квазистатического сжатия. Максимальная величина ОПФ аустенитного типа почти в два раза больше, чем максимальная величина ОПФ мартенситного типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В испытаниях на растяжение высокая скорость деформирования не приводит к улучшению функциональных свойств никелида титана. Однако высокая скорость предварительного деформирования в режиме сжатия может привести к улучшению функциональных свойств.

Эффект памяти формы после высокоскоростного сжатия в интервале температур 20-60°C больше, чем после квазистатического сжатия. Предварительное квазистатическое сжатие при более высоких температурах инициирует больший эффект памяти формы, чем высокоскоростное сжатие.

Аналогично эффекту памяти формы обратимая память формы мартенситного типа после высокоскоростного сжатия в интервале температур 20-60°C выше, чем после квазистатического сжатия.

Величина обратимой памяти формы аустенитного типа после высокоскоростного сжатия всегда больше, чем после квазистатического сжатия, более того, величина обратимой памяти формы аустенитного типа больше, чем величина обратимой памяти формы мартенситного типа, чего не наблюдается в испытаниях на растяжение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ogawa K. *Characteristics of shape memory alloy at high strain rate* / Proc. of the Int. Conf. on Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic

- Loading (DYMAT-88), Sept. 19-23, 1988, Ajaccio, France – J. Phys. IV. – 1988. – Coll.C3. (Suppl. J. Phys. III, Vol.49, No.11). – Pp.115-120.
2. Nemat-Nasser S., Guo W.-G. *Superelastic and cyclic response of NiTi SMA at various strain rates and temperatures* // Mechanics of Materials. – 2006. – Vol.38. – Pp.463-474.
 3. Лихачев В.А., Шиманский С.Р. *Влияние скорости деформирования на обратимую память формы никелида титана* // Пробл. прочности. – 1988. – №2. – С.65-68.
 4. Лихачев В.А., Патрикеев Ю.И. *Эффект памяти формы в никелиде титана после статического и ударного деформирования* // Механика прочности материалов с новыми функциональными свойствами. Рубежное. – 1990. – С.128-129.
 5. Jiang S.-Y., Zhang Y.-Q. *Microstructure evolution and deformation behavior of as-cast NiTi shape memory alloy under compression* // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2012. – Vol.22. – Pp.90-96.
 6. Ying Q., Young M.L., Nie X. *High Strain Rate Compression of Martensitic NiTi Shape Memory Alloy at Different Temperatures* // Metallurgical and Materials Transactions. A. – 2017. – Vol.48. – Pp.601-608.
 7. Belyaev S.P., Morozov N.F., Razov A.I., Volkov A.E., Wang L., Shi S., Gan S., Chen J., Dong X. *Shape Memory Effect in Titanium-Nickel after Preliminary Dynamic Deformation* // Materials Science Forum. – 2002. – Vol.394-395. – Pp.337-340.
 8. Bragov A., Galieva A., Grigorieva V., Danilov A., Konstantinov A., Lomunov A., Motorin A., Ostropiko E., Razov A. *Functional properties of TiNi shape memory alloy after high strain rate loading* // Materials Science Forum. – 2013. – Vol.738-739. – Pp.326-331.
 9. Shi S.-Q., Cheng J.-Y., Dong X.-L., Wang L.-L., Belyaev S.P., Volkov A.E., Morozov N.F., Razov A.I. *Study on shape memory effect of TiNi alloy after impact deformation* // Explosion and Shock Waves. – 2001. – Vol.21. – Iss.3. – Pp.168-172.
 10. Хачин В.Н., Гюнтер В.Э., Чернов Д.Б. *Два эффекта обратимого изменения формы в никелиде титана* // ФММ. – 1976. – Т.42. – Вып.3. – С.658-661.

REFERENCES

1. Ogawa K. *Characteristics of shape memory alloy at high strain rate*. Proc. of the Int. Conf. on Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loading (DYMAT-88), Sept. 19-23, 1988, Ajaccio, France. J. Phys., IV, 1988, Coll.C3 (Suppl. J. Phys. III, Vol.49, No.11), Pp.115-120.
2. Nemat-Nasser S., Guo W.-G. *Superelastic and cyclic response of NiTi SMA at various strain rates and temperatures*. Mechanics of Materials, 2006, Vol.38, Pp.463-474.
3. Lihachev V.A., Shimanskij S.R. *Vliyanie skorosti deformirovaniya na obratimuyu pamyat' formy nikelida titana [Influence of strain rate on two-way shape memory effect in TiNi alloy]*. Problemy prochnosti, 1988, No.2, Pp.65-68.
4. Lihachev V.A., Patrikeev Yu.I. *Ehffekt pamyati formy v nikelide titana posle staticheskogo i udarnogo deformirovaniya [The shape memory effect after quasistatic and impact deformation]*. Mekhanika prochnosti materialov s novymi funktsional'nymi svojstvami. Rubezhnoe, 1990, Pp.128-129.

5. Jiang S.-Y., Zhang Y.-Q. *Microstructure evolution and deformation behavior of as-cast NiTi shape memory alloy under compression*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, Vol.22, Pp.90-96.
6. Ying Q., Young M.L., Nie X. *High Strain Rate Compression of Martensitic NiTi Shape Memory Alloy at Different Temperatures*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, Vol.48, Pp.601-608.
7. Belyaev S.P., Morozov N.F., Razov A.I., Volkov A.E., Wang L., Shi S., Gan S., Chen J., Dong X. *Shape Memory Effect in Titanium-Nickel after Preliminary Dynamic Deformation*. Materials Science Forum, 2002, Vol.394-395, Pp.337-340.
8. Bragov A., Galieva A., Grigorieva V., Danilov A., Konstantinov A., Lomunov A., Motorin A., Ostropiko E., Razov A. *Functional properties of TiNi shape memory alloy after high strain rate loading*. Materials Science Forum, 2013, Vol.738-739, Pp.326-331.
9. Shi S.-Q., Cheng J.-Y., Dong X.-L., Wang L.-L., Belyaev S.P., Volkov A.E., Morozov N.F., Razov A.I. *Study on shape memory effect of TiNi alloy after impact deformation*. Explosion and Shock Waves, 2001, Vol.21, Iss.3, Pp.168-172.
10. Hachin V.N., Gyunter V.E., Chernov D.B. *Dva effekta obratimogo izmeneniya formy v nikelide titana [Two types of TWSM in TiNi alloy]*. FMM, 1976, Vol.42, Iss.3, Pp.658-661

Поступила в редакцию 15 сентября 2019 года.

Сведения об авторах:

Остropико Евгений Сергеевич – к.ф.-м.н., н.с., Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: es-ostropiko@mail.ru

Разов Александр Игоревич – д.т.н., с.н.с, проф., Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: a.razov@spbu.ru

Моторин Александр Сергеевич – к.ф.-м.н., асс., Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: as.motorin@yandex.ru