

**ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СЖАТИЯ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НИКЕЛИДА ТИТАНА****Остропико Е.С., Разов А.И.***Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия*  
es-ostropiko@mail.ru

Функциональные свойства никелида титана после динамического сжатия не были в достаточной мере исследованы. Можно вспомнить работы [1,2], в которых проводили исследование влияния разной скорости сжатия, но только при комнатной температуре (в мартенситном состоянии). Однако, там уже были обнаружены предпосылки к тому, что кратковременное динамическое сжатие может привести к улучшению функциональных свойств в отличие от квазистатического деформирования, но дальнейшего развития работа не получила. В более современных исследованиях преимущественно изучают механическое поведение и влияние на структуру [3].

Ранее были проведены аналогичные исследования о влиянии динамического растяжения на функциональные свойства, где, среди прочего, было показано, что высокая скорость деформирования не приводит к улучшению функциональных свойств по сравнению с квазистатическим растяжением [4].

Таким образом, цель этой работы - исследование функциональных свойств эквивалентного никелида титана после высокоскоростного и квазистатического сжатия при различных температурах. Цилиндрические образцы высотой 4 мм и диаметром 8 мм отжигали при 500°C в течение часа и охлаждали с печью. Характеристические температуры прямого и обратного мартенситных превращений были определены методом дифференциальной сканирующей колориметрии и имели следующие значения:  $M_f = 32^\circ\text{C}$ ,  $M_s = 74^\circ\text{C}$ ,  $A_s = 74^\circ\text{C}$ ,  $A_f = 98^\circ\text{C}$ .

Сжатие с различными скоростями проводили при температурах в интервале от 20 до 300°C, которые достигались нагревом от комнатной температуры. Высокоскоростное сжатие было проведено в Научно-исследовательском институте механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского на установке, реализующей метод Кольского для разрезных стержней Гопкинсона, скоростями деформирования составила около  $10^3\text{c}^{-1}$ . Квазистатическое сжатие проводили на универсальной испытательной машине Instron 5985, со скоростью деформирования порядка  $10^{-3}\text{c}^{-1}$ . После деформирования образцы термоциклировали и измеряли эффекты однократной (ЭПФ) и обратимой (ОПФ) памяти формы.

Особенность методики Кольского для разрезных стержней Гопкинсона не позволяет точно контролировать полную деформацию, не смотря на одинаковые параметры нагружения: массу и длину ударника, давление в баллоне газовой пушки. Различие полной деформации приводит к различиям в остаточной и необратимой деформации (та, что остается после реализации эффекта памяти формы). Поэтому, при анализе зависимостей ЭПФ от температуры испытания был использован коэффициент возврата деформации  $\epsilon_{sm}/\epsilon_{res}$ , где  $\epsilon_{sm}$  – деформация восстановления формы, связанная с эффектом памяти,  $\epsilon_{res}$  – остаточная деформация. Полученные зависимости были сопоставлены с аналогичными данными, полученными при исследовании влияния скорости предварительного **растяжения** на функциональные свойства эквивалентного сплава TiNi [4].

При испытаниях на растяжение было показано, что величина ЭПФ после квазистатики всегда выше, чем после динамики. Однако, при испытаниях на сжатия имеется два интервала температур. В первом интервале, до 60-88°C, величина ЭПФ после высокоскоростного сжатия выше либо близка к величине ЭПФ после квазистатического сжатия (рисунок 1.). При увеличении температуры испытания величина ЭПФ после динамического сжатия резко падает и соотношение меняется на противоположное – ЭПФ после квазистатики становится больше, чем после динамики.

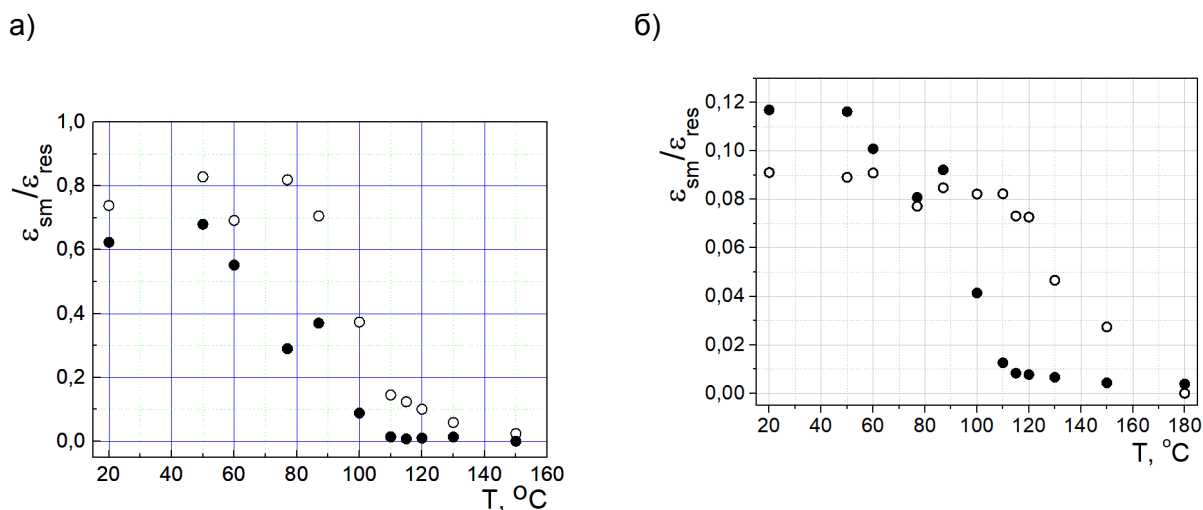


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента возврата от температуры предварительного деформирования (а) растяжением, (б) сжатием  
 O – квазистатика; ● – динамика.

В материалах с эффектом памяти формы можно наблюдать два типа обратимой памяти формы: мартенситного и аустенитного типа[5]. ОПФ мартенситного типа наблюдается после деформирования сплава, находящегося в мартенситном состоянии, а изменение деформации при прямом превращении происходит сонаправлено с направлением приложенной нагрузки, с условно «положительным» знаком. Эффект обратимой памяти формы аустенитного типа возникает в материале, деформированном в аустенитном состоянии, а деформации при прямом превращении изменяется разнонаправленно с предварительным деформированием, то есть «отрицательным» знаком.

Подобно тому, как при анализе зависимостей ЭПФ от температуры испытания был использован коэффициент возврата деформации  $\epsilon_{sm}/\epsilon_{res}$ , для избавления от неоднородности остаточных деформаций при анализе зависимостей величины обратимой памяти формы от температуры предварительного деформирования, было использовано отношение  $\epsilon_{twsm}/\epsilon_p$ . Здесь  $\epsilon_{twsm}$  – величина деформации ОПФ,  $\epsilon_p$  – необратимая пластическая деформация ( $\epsilon_p = \epsilon_{res} - \epsilon_{sm}$ ).

На следующем рисунке 2 приведены зависимости отношения величины эффекта обратимой памяти формы к необратимой пластической деформации  $\epsilon_{twsm}/\epsilon_p$  от температуры предварительного нагружения.

Обратимая память формы мартенситного типа проявляется подобно однократному эффекту памяти формы. В случае испытаний на растяжение предварительное высокоскоростное деформирование при любой температуре не приводит к улучшению ОПФ мартенситного типа. В случае испытаний на сжатие наблюдается аналогичная ЭПФ особенность: в определенном интервале температур (до 60°C) предварительное высокоскоростное сжатие влечет более существенную ОПФ мартенситного типа, чем квазистатическое сжатие, с увеличением температуры испытания соотношение меняется на противоположное.

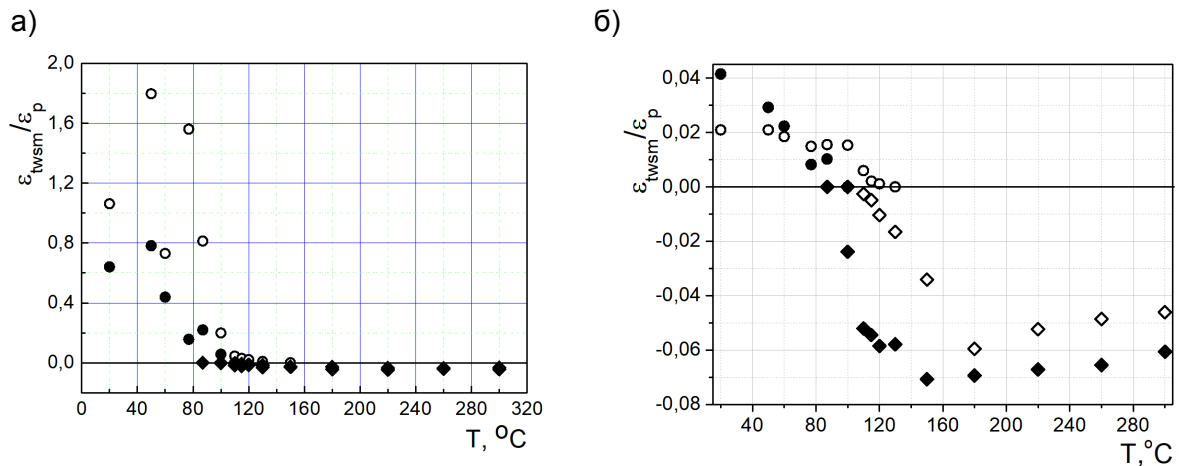


Рисунок 2 - Зависимость отношения  $\epsilon_{\text{twsm}}/\epsilon_p$  от температуры предварительного деформирования (а) растяжением, (б) сжатием

○, □ – ОФФ мартенситного типа; ◇, ◆ – ОФФ аустенитного типа.  
○, ◇ – квазистатика; □, ◆ – динамика.

Величина обратимой памяти формы аустенитного типа после высокоскоростного сжатия всегда больше, чем после квазистатического сжатия, более того, величина обратимой памяти формы аустенитного типа по модулю больше, чем величина обратимой памяти формы мартенситного типа. Обратимая память формы аустенитного типа после сжатия проявляется, при более низких температурах испытания, чем после растяжения.

Результаты работы показали, что высокоскоростное сжатие может приводить к улучшению функциональных свойств. Так величина ЭПФ после высокоскоростного сжатия в интервале температур 20-60°C выше, чем после квазистатического сжатия. Аналогично, ОФФ мартенситного типа после высокоскоростного сжатия в интервале температур 20-60°C выше, чем после квазистатического сжатия. ОФФ аустенитного типа после высокоскоростного сжатия всегда больше, чем после квазистатического сжатия.

#### Список литературы:

- 1) 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. - V.394-395. - P.337-340.
- 2) Shi S.-q., Chen 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. - V.21. - N 3. - P. 168-172.
- 3) Jiang Shu-yong, Zhang Yan-qiu, Microstructure evolution and deformation behavior of as-cast NiTi shape memory alloy under compression// Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012. - V 22. - P. 90-96
- 4) 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. V. 738-739. P. 326-331.
- 5) 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.