

## ВЛИЯНИЕ БАРОКРИОДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИКЕЛИДА ТИТАНА

Хаймович П.А.<sup>1</sup>, Бурховецкий В.В.<sup>2</sup>, Шульгин Н.А.<sup>1</sup>, Андреев В.А.<sup>3,4</sup>,  
Вьюненко Ю.Н.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

<sup>2</sup>Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк,

<sup>3</sup>ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН,  
Москва, Россия

<sup>5</sup>ООО «ОПТИМИКСТ ЛТД», Санкт-Петербург, Россия, 6840817@mail.ru

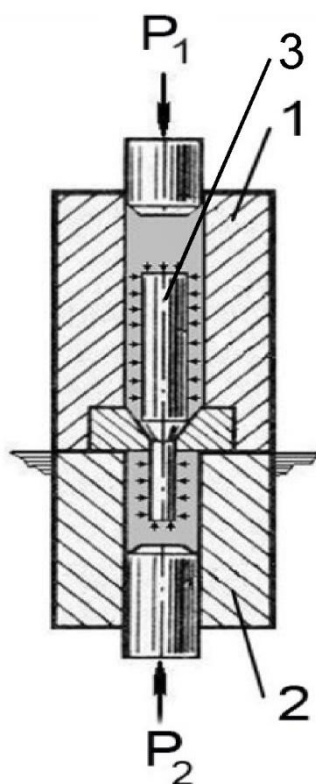


Рисунок 1 –  
Схема действия  
установки для  
барокрио-  
деформирования:  
1 – подающая камера,  
2 – принимающая камера,  
3 – заготовка  
деформируемого  
материала,  
 $P_1$  – давление в камере 1,  
 $P_2$  – противодавление в  
камере 2

Исследования влияния термомеханической обработки никелида титана при температуре жидкого азота показали, что в результате в условиях растяжения разрушение материала может происходить при деформации  $\varepsilon \sim 5-7\%$  [1]. По опубликованным в [2] сведениям лишь монокристаллы сплава TiNi во время деформирования вдоль направления  $\langle \bar{1}11 \rangle$  могут вытягиваться на 25 % без разрушения. Растяжение вдоль осей  $\langle \bar{1}39 \rangle$  и  $\langle 001 \rangle$  приводит к разрушению монокристаллов при  $\varepsilon < 10\%$ . Однако при деформировании никелида титана квазигидроэкструдированием при 77 K по приведенной на рис.1 схеме удалось добиться удлинения образцов на  $\sim 20\%$ . Для этого как в подающей, так и в принимающей камерах приходилось создавать гидростатическое давление.

Заготовки для барокриодеформирования были получены из прутка Ti - 55,15 вес.% Ni. Из горячекатанного прутка диаметром 20 мм ротационной ковкой при  $\sim 1070$  K получали цилиндр диаметром 12 мм. Затем при 670 K доводили диаметр прутка до 10 мм по той же технологии. В подающую камеру помещали заготовку из никелида титана высотой 25 мм. В качестве среды, передающей давление, использовали индий. Для защиты материала от растрескивания в принимающей камере создавали давление 8 кбар. Вытягивание заготовки проводили при давлении в подающей камере 14 кбар. После барокриодеформирования из цилиндрической заготовки для проведения исследований в растровом электронном микроскопе JSM-6490LV и дифференциальном сканирующем калориметре METTLER TOLEDO 822E электроискровым методом были вырезаны образцы в виде параллелепипедов (2x1,5x1 мм). Аналогичные образцы были изготовлены из исходного кованого прутка. Развитие эффекта памяти формы изучали на стержне 22x1,5x1 мм.

На рис.2 приведены фотографии структуры никелида титана исходного состояния послековки (рис.2, а) и после барокриодеформирования (рис.2, б). На первой фотографии структурные неоднородности располагаются случайным образом. После квазигидроэкструзии при температуре жидкого азота неоднородности выстроены в вертикальные цепочки. Линии цепочек совпадают с направлением квазигидроэкструзии.

На калориметрических кривых (рис.3) представлены данные об эндотермических процессах при нагреве и тепловыделении во время охлаждения. Скорость изменения

температуры была равной 10 К/мин. В исходном состоянии материала в интервалах температур обратного и прямого мартенситного фазового перехода имеются экстремумы, соответствующие поглощению и выделению скрытой теплоты превращения. Температурные интервалы трансформации кристаллической решетки, в соответствии с методикой их определения на ДСК, составили при нагреве ~ 20 К, а при охлаждении около 24 К.

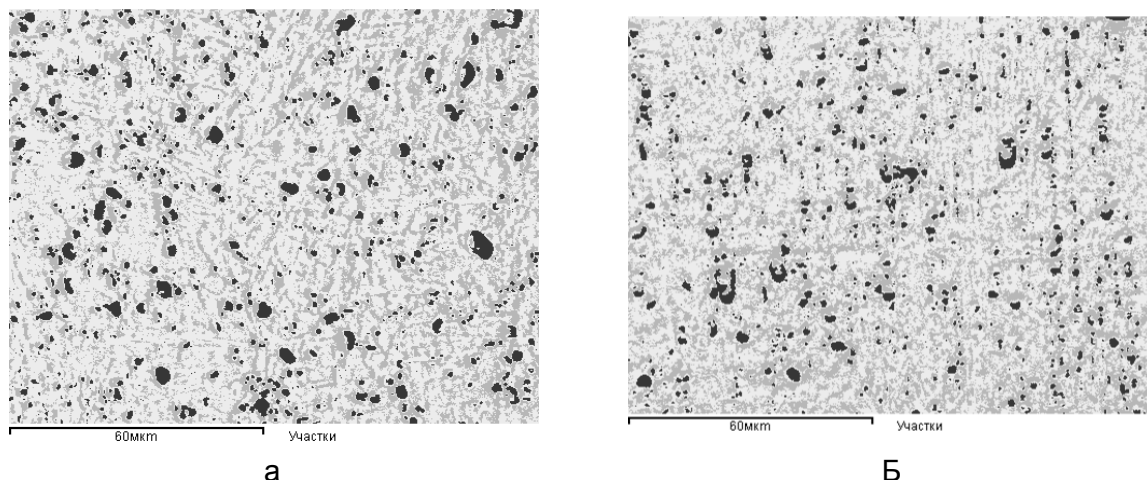


Рисунок 2 - Структура никелида титана в исходном состоянии – кованный пруток (а), после барокриодеформирования (б)

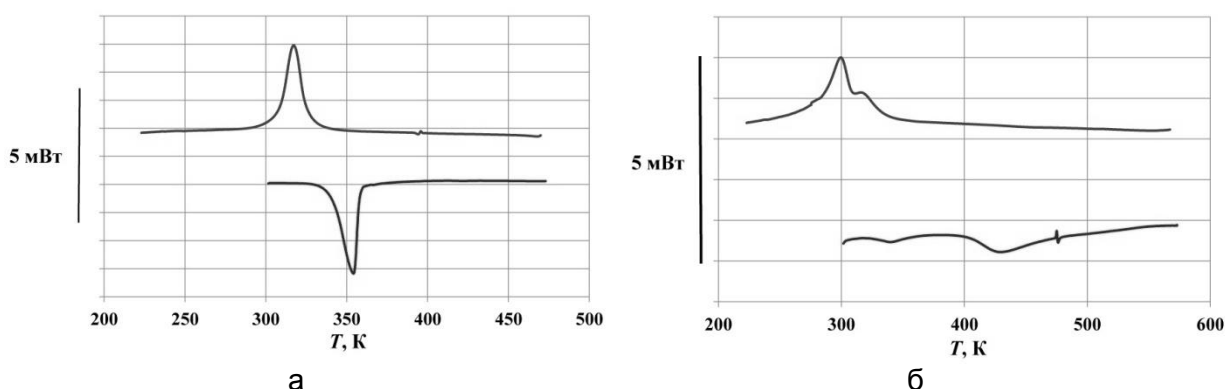


Рисунок 3 - Калориметрические характеристики исходного материала (а), после барокриодеформирования (б)

После барокриодеформирования эндотермический процесс при нагреве идет в два этапа. Первая стадия протекает в интервале температур от ~ 320 К и до ~ 360 К. Вторая стадия начинается приблизительно через 40 К и длится до 500 К. На первом этапе идет поглощение тепла в размере 1 Дж/г, на втором – 10 Дж/г. Во время охлаждения на калориметрической кривой наблюдаем сдвоенный пик (рис.3, б). При этом меньший максимум очень близок по своему положению на температурный шкале аналогичному экстремуму исходного материала.

На рис.4 представлены результаты изучения процесса формовосстановления во время нагрева изогнутых образцов. Кривая 1 показывает развитие эффекта памяти формы в стержне из материала, подвергнутого барокриодеформированию. Перед нагревом при температуре ~ 270 К стержень был изогнут. Деформация наружного слоя  $\epsilon$  достигала величины ~ 4,5 %. После снятия внешней нагрузки стержень частично восстановил свою форму. Остаточная деформация была равна 2,5 %. В процессе нагрева отклонение изогнутого стержня от вертикали  $\Delta$  уменьшалось. Однако вернуть прямолинейную форму стержню не удалось.

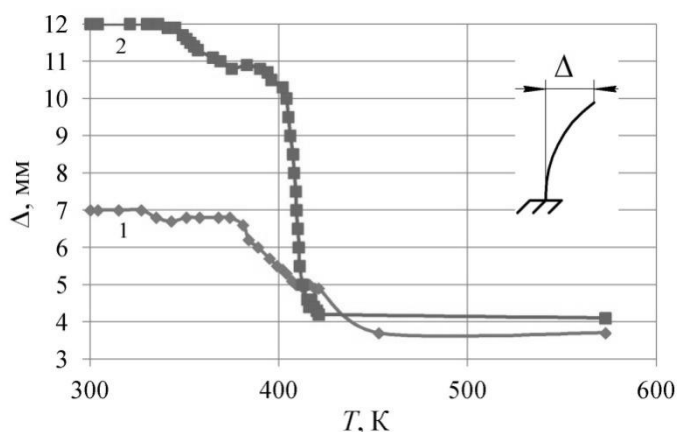


Рисунок 4 - Развитие эффекта памяти формы:  
1 – образец после барокриодеформирования,  
2 – образец, отожженный при 820 К в течении 20 мин

После этого стержень отожгли при 820 К в течение 20 мин. Образцу была возвращена первоначальная прямолинейная форма при указанной температуре в начале термообработки. Затем его закалили погружением в воду с температурой 295 К. При 270 К стержень был вновь изогнут до  $\epsilon \approx 4,5\%$ . Однако в этом случае после снятия нагрузки на образец остаточная деформация оказалась равной  $\sim 3,8\%$ . Кривая 2 на рис.4 показывает как развивалось формовосстановление в отожженном материале.

Приведенные данные позволяют сделать следующие выводы. Барокриодеформирование существенно повышает в никелиде

титана предел упругости. Однако это не позволило повысить степень формовосстановления продеформированного образца.

Судя по фотографиям и калориметрическим данным в процессе барокриодеформирования изменилась структура материала. По-видимому уменьшен размер зерен и повышена плотность внутренних дефектов. В результате накопленной потенциальной энергии полей упругих напряжений меняется скрытая теплота превращения.

Значительно расширяется интервал температур перестройки кристаллической решетки. При этом наблюдается двустадийность в развитии эндотермической реакции и в деформационном процессе восстановления формы.

Во время прямого превращения раздвоение пика тепловыделения может быть связано с трансформацией аустенита в мартенсит через R-фазу. При этом нельзя исключать возможности разделения термодинамических условий превращения в объеме образца. В результате таких явлений могут изменяться интервалы температур перестройки кристаллической решетки и происходить разделение этого процесса на два этапа в разных температурных интервалах.

*Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н Ресниной Н.Н. за содействие в калориметрических исследованиях.*

#### Список литературы

1. Беляев С.П., Волков А.Е., Ермолаев В.А., Каменцева З.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Мозгунов В.Ф., Разов А.И., Хайров Р.Ю. Материалы с эффектом памяти формы. Т.1. / под ред. В.А. Лихачева. – Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ, 1997. – 424с.
2. Пушин В.Г., Прокошкин С.Д., Валиев Р.З. и др. Сплавы никелида титана с памятью форм. Ч.1. Структуры, фазовые превращения и свойства. / под ред. В.Г. Пушина. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 438с.