

4. Показано, что применение параметрического принципа оценки показателей, характеризующих качество текстильных материалов, для анализа реализации случайного значения исследуемого параметра позволяет достоверно провести анализ и сопоставление полученных результатов имитационного моделирования.

Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность имитационного моделирования как метода исследования механических свойств текстильных материалов при полцикловых испытаниях на растяжение. Результаты проведенных исследований можно рекомендовать для прогнозирования изменения прочностных показателей при наличии различных вариаций (неровноты) по механическим свойствам и строению текстильных нитей и волокон.

### Список литературы

1. Ольшанский В.И., Махаринский Е.И., Кузнецов А.А. Методика оценки показателей деформационных свойств текстильных нитей по результатам полциклового испытания на растяжение. / ВГТУ – Витебск, 2001 – 19 с.
2. Перепелкин К.Е. Дефектность и технологическая работоспособность нитей – основные факторы стабильности процессов их получения и переработки. // Вестник Московской государственной текстильной академии. Вып. 1. / МГТА – Москва, 1994 – С.139-151.

УДК 669.24'295

## ВЛИЯНИЕ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЦЕССЫ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ПАМЯТИ ФОРМЫ В TiNi

Беляев С. П., Рубаник В. В.\* , Рубаник В. В.\* мл.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

*\* Институт технической акустики, Витебск, Беларусь*

*[ita@vitebsk.by](mailto:ita@vitebsk.by)*

Исследованию физических свойств материалов, обладающих эффектом памяти формы, в последние годы уделяется значительное внимание, что связано с их широким внедрением и использованием в современной технике и медицине. Специфика фазовых превращений этих материалов обуславливает проявление новых уникальных свойств, не характерных для обычных металлов и сплавов, таких как пластичность превращения и эффект памяти формы. Поскольку реальные материалы, составляющие основу всевозможных конструкций и изделий, подвержены, в той или иной мере, воздействию внешних механических усилий, они непрерывно изменяют свои свойства. Учитывая высокую зависимость свойств материалов с памятью от внешних напряжений, следует ожидать и изменения в их поведении при реализации эффектов пластичности превращения и памяти формы.

Действительно, в работах [1, 2] было подтверждено, что воздействие ультразвуковых колебаний на образцы сплава TiNi вызывает ускорение обратного фазового пре-

вращения [1] или полный возврат предварительно наведенной деформации [2]. Это обусловлено как действием переменных механических напряжений, так и разогревом материала в результате диссипации ультразвуковой энергии. Воздействие ультразвука на этапе охлаждения через интервал прямого мартенситного превращения может вызвать как ускорение превращения [1], так и возврат деформации [2]. Для объяснения такого поведения TiNi в поле акустических колебаний предложена модель эффекта иницирования памяти формы в ультразвуковом поле, учитывающая воздействие на материал тепловой и силовой составляющих ультразвука. Тепловая составляющая действует эквивалентно механизму термического иницирования. Силовая составляющая вызывает в материале знакопеременные механические напряжения, которые изменяют условия фазового равновесия в материале, понижая силу сопротивления движению фазовой границы. Из модели следует, что силовая составляющая ультразвука должна стимулировать мартенситные превращения и проявляться в изменении температур термоупругого фазового превращения.

В соответствии с предложенной моделью, ультразвуковое воздействие малой амплитуды ( $\varepsilon \approx 5 \cdot 10^{-5}$ ) непродолжительное время [1] обуславливает за счет знакопеременных механических напряжений ускорение прямого мартенситного превращения, ультразвукового разогрева при этом не происходит. В случае воздействия амплитудой  $5 \cdot 10^{-4}$  и более доминирует тепловая составляющая, которая повышает температуру образования и вызывает возврат накопленной деформации [2].

Целью данной работы является изучение деформационных свойств сплава TiNi, обладающего памятью формы, в области температур фазового перехода в условиях воздействия низкочастотных знакопеременных механических напряжений, исключая этим влияние тепловой составляющей.

Для проведения экспериментов использовали образцы TiNi с длиной рабочей части 30 мм и диаметром 4 мм, которые предварительно подвергали отжигу при температуре 723 К в течение 120 минут. Характеристические температуры превращений в материале составляли:  $M_s = 348$  К,  $M_f = 320$  К,  $A_s = 358$  К,  $A_f = 390$  К. Эксперименты проводили в режиме кручения образцов. Напряжения в наружном волокне цилиндрического образца вычисляли по формуле

$$\tau = \frac{1,5M}{\pi \cdot r^3},$$

где  $M$  – крутящий момент,  $r$  – радиус образца. Деформацию кручения вычисляли по формуле

$$\gamma = \frac{r}{l} \cdot \varphi,$$

где  $l$  – длина рабочей части образца,  $\varphi$  – угол закручивания образца. Температуру регистрировали при помощи термопары хромель-копель.

Эксперименты проводили следующим образом: образец нагревали до 420 К, затем к образцу прикладывали постоянную нагрузку, соответствующую напряжениям  $\tau$ , равным 20, 30 и 50 МПа. После этого образец начинали охлаждать до комнатной температуры. В процессе охлаждения к образцу прикладывали переменное напряжение  $\tau_{\text{вар}}$ , значение амплитуды которого составляло 2,5; 5 и 7,5 МПа. Затем образец снова нагревали до 420 К, прикладывая к нему переменное напряжение при нагреве. Частота колебаний дополнительного напряжения составляла 0,25 Гц.

Полученные экспериментальные результаты показали, что, если температура, при которой происходит дополнительное нагружение образца не лежит в интервале температур прямого или обратного превращения, оно не оказывает влияния на величину де-

формации. Наложение переменного напряжения при температурах, соответствующих обратному мартенситному превращению, вызывает возврат деформации. При температурах, соответствующих прямому превращению, действие дополнительного напряжения способствует росту деформации (рис. 1).

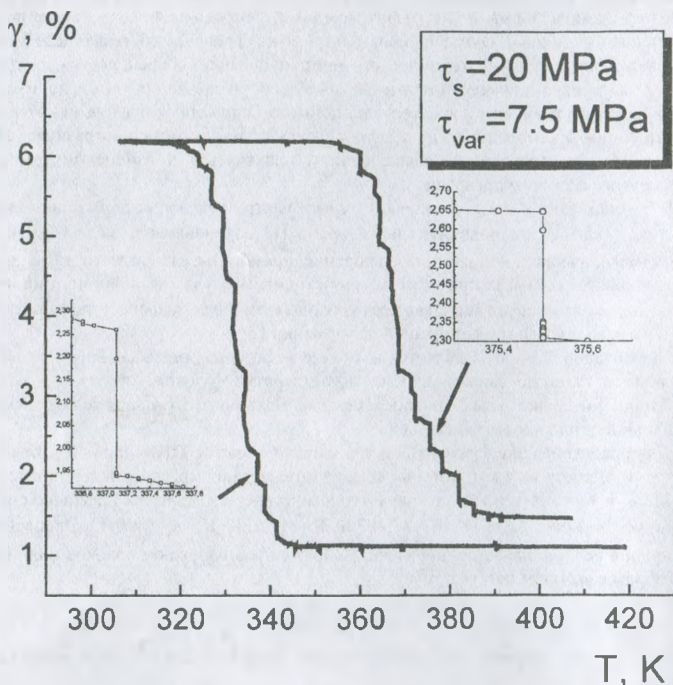


Рис. 1. Зависимость накапливаемой деформации от температуры TiNi образца под напряжением  $\tau_s = 20$  МПа (кручение) и действием переменного напряжения амплитудой  $\tau_{var} = 7,5$  МПа.

Из экспериментов также следует, что изменение относительной деформации при переменном нагружении имеет максимум внутри температурного интервала  $M_s - M_f$  при охлаждении и внутри интервала  $A_s - A_f$  при нагреве (рис. 2). На рис. 2. (а, в, д) представлены зависимости изменения напряжения от температуры при прямом превращении, а на рис. 2. (б, г, е) – в процессе обратного превращения.

Зависимость величины эффекта пластичности превращения  $\gamma_{пл}$  от величин переменных напряжений  $\tau_{var}$  при различных значениях статических напряжений  $\tau_s$  представлены на рис. 3.



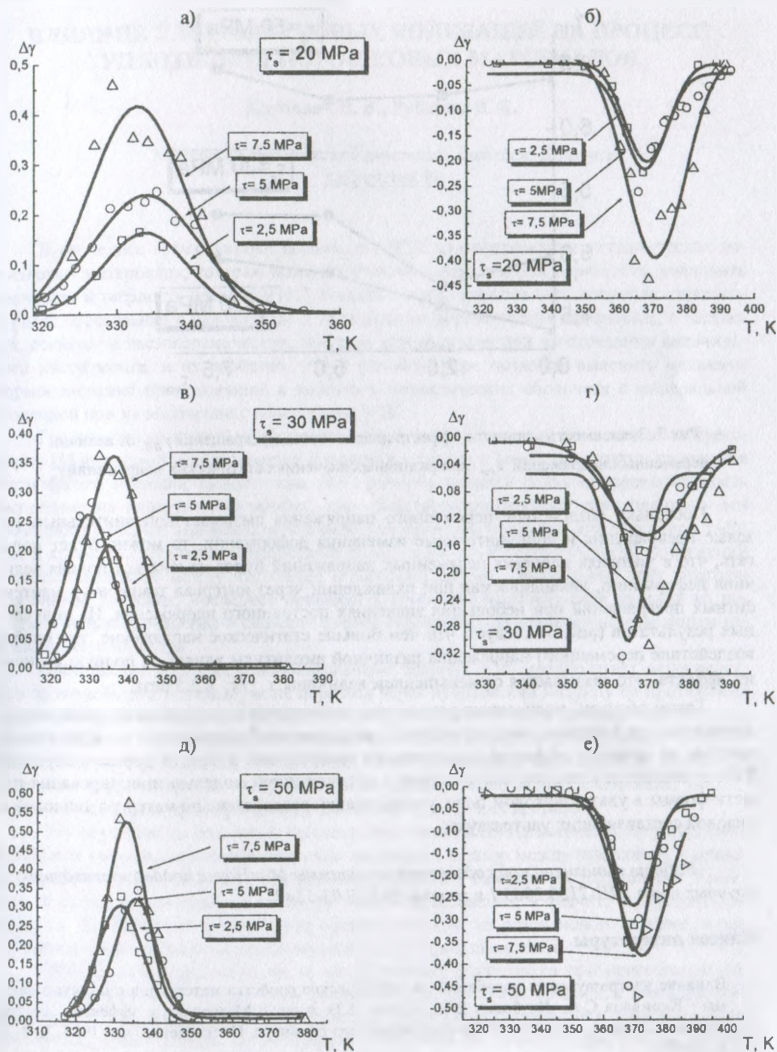
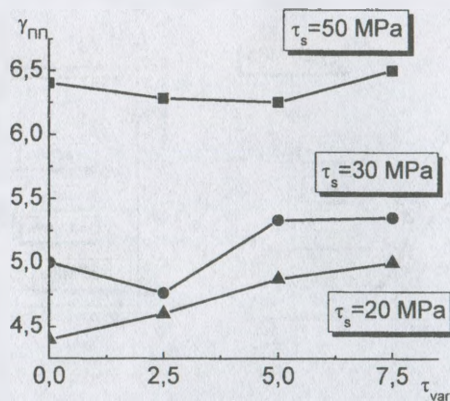


Рис.2. Зависимость изменения напряжения от температуры при прямом (а, в, д) и обратном (б, г, е) фазовом превращении.



**Рис.3.** Зависимость величины эффекта пластичности превращения  $\gamma_{пл}$  от величин переменных напряжений  $\tau_{var}$  при различных значениях статических напряжений  $\tau_s$ .

Поскольку воздействие переменного напряжения вызывает дополнительные фазовые превращения и дополнительные изменения деформации, то можно будет полагать, что в условиях действия переменных напряжений будет изменяться полная величина деформации, накапливаемая при охлаждении через интервал температур мартенситных превращений при небольших значениях постоянного напряжения. Из полученных результатов (рис. 3) следует, что чем больше статическое напряжение, тем слабее воздействие переменного напряжения различной амплитуды влияет на полную величину эффекта. Это связывается с уменьшением величины  $\tau_{var}/\tau_s$  в 2,5 раза.

Таким образом, полученные результаты согласуются с проводимыми ранее исследованиями по влиянию знакопеременных механических напряжений ультразвуковой частоты на кинетику эффектов пластичности превращения и памяти формы в образцах TiNi и находятся в полном соответствии с предложенной моделью инициирования памяти формы в ультразвуковом поле, учитывающей воздействие на материал тепловой и силовой составляющих ультразвука/

*Работа выполнена при содействии программы МинНауки поддержки ведущих научных школ НИИ-2180.2003.1 и гранта INTAS 03-5547.*

### Список литературы

1. Влияние ультразвуковых колебаний на пластические свойства материалов с памятью формы / Кириллов С.А., Клубович В.В., Козлов А.В. и др. // Материалы с эффектом памяти формы: Сб. докл. I-го Российско-Американского семинара. Санкт-Петербург, 1995, Ч. 1. – С. 81-84.
2. Рубаник В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. (мл.) Формирование малых петель в TiNi при фазовом превращении за счет наложения ультразвука // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности: Сб. тез., СПб., 12–14 марта 2003 г. – СПб., 2003. – С. 261–262.