

УДК 539.3:669.018.6

## ВЛИЯНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ У НИКЕЛИДА ТИТАНА

Н. Н. Попов, И. В. Севрюгин, И. В. Большакова

Российский Федеральный Ядерный Центр -Всероссийский научно-исследовательский  
институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)  
Россия, 607188, г. Саров, пр.Мира, 37  
popov@astra.vniief.ru

К настоящему времени хорошо известно о значительном влиянии скорости нагружения на механические свойства металлов и сплавов. Однако анализ известной литературы показал недостаточную изученность данного вопроса применительно к сплавам с эффектом памяти формы (ЭПФ), в частности, никелида титана. Данная статья является продолжением работ [1, 2], выполняемых во ВНИИЭФ в настоящее время.

На данном этапе проведено исследование влияния квазистатического нагружения со скоростями деформации  $\dot{\epsilon} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ ;  $1,7 \cdot 10^{-3}$  и  $1,7 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$  при растяжении на характеристики ЭПФ и эффекта обратимой памяти формы (ЭОПФ) никелида титана.

Из сплава Ti – 45,8ат. %Ni – 2,8ат. %Fe изготавливали образцы с рабочей частью  $\varnothing 3$  мм и длиной 10 мм. Термообработку проводили по режиму: на первой стадии выдержка при 500 °С в течение часа и охлаждение на воздухе; на второй стадии выдержка при 450 °С в течение 30 минут и охлаждение на воздухе.

Для задания предварительной деформации образцам использовали испытательную машину, дополненную приспособлением, которое позволяло проводить растяжение образца с постоянной скоростью при температуре 77 К до величины остаточной пластической деформации от 1,7 до 10 %.

На основании диаграмм растяжения определяли величину коэффициента остаточной пластической деформации образца:

$$K_P = \frac{L_P - L_0}{L_0} \cdot 100 \%,$$

где  $L_0$  – исходная длина рабочей части образца, мм;  $L_P$  – длина рабочей части образца после растяжения, мм.

Коэффициент формовосстановления при проявлении ЭПФ определяли по формуле:

$$K_{\text{ЭПФ}} = \frac{\Delta l_{\text{ЭПФ}}}{L_0} \cdot 100 \%,$$

где  $\Delta l_{\text{ЭПФ}}$  – уменьшение длины рабочей части образца при проявлении ЭПФ.

Полученные в результате экспериментов зависимости величины  $K_{ЭПФ}$  от  $K_P$  при квазистатических скоростях деформации представлены на рис. 1. Как видно, несмотря на разброс экспериментальных данных, зависимости  $K_{ЭПФ}$  от  $K_P$  до  $K_P = 8\%$  близки к линейным. Это позволяет распространить известную закономерность [3] о линейной зависимости  $K_{ЭПФ}$  от  $K_P$  на диапазон скоростей деформации до  $\dot{\epsilon} = 1,7 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

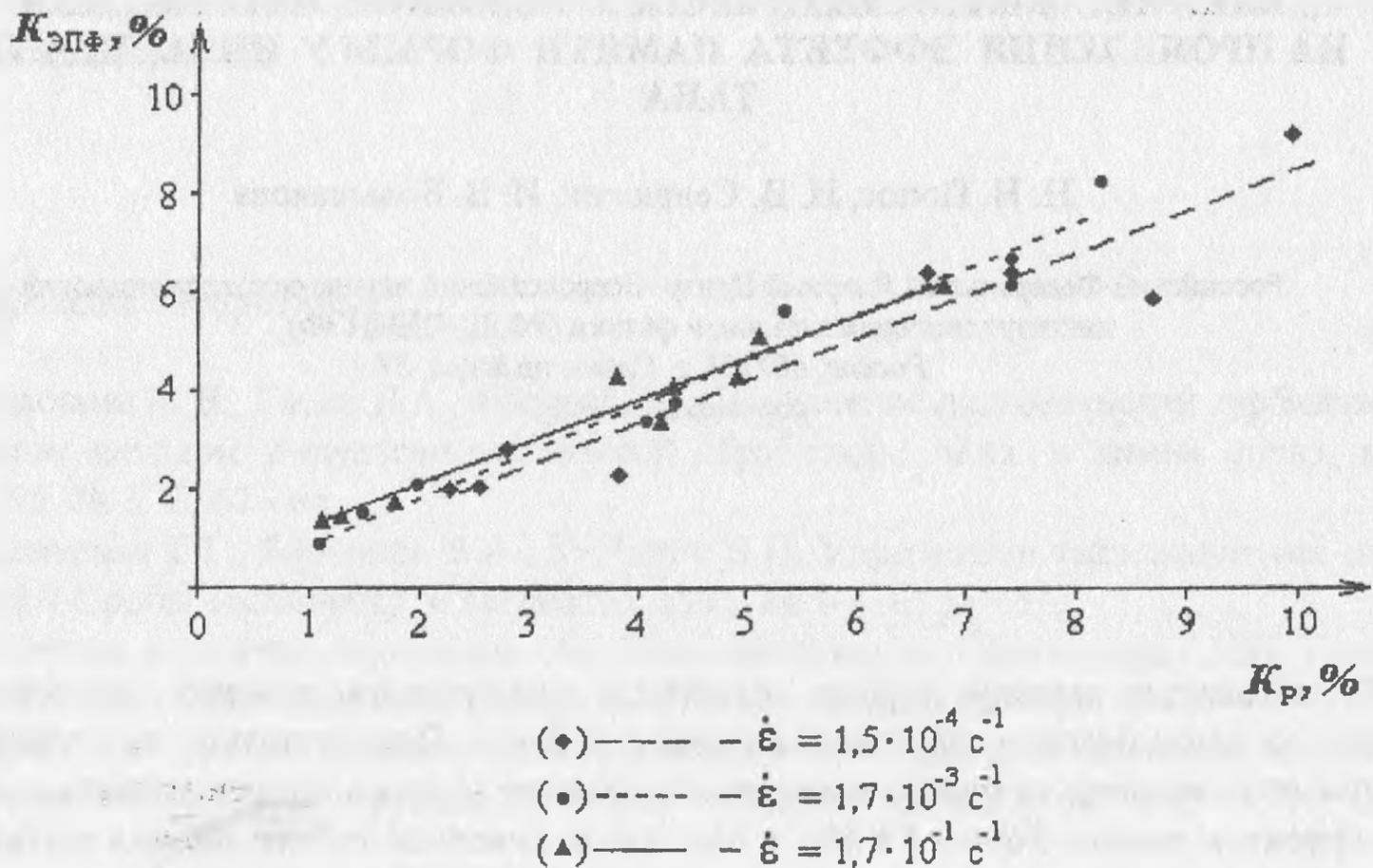


Рис. 1. Зависимости эффекта памяти формы от величины задаваемой пластической деформации в квазистатическом диапазоне скоростей задания формы.

Полученные методом наименьших квадратов уравнения линий регрессий имеют вид:

$$\text{при } \dot{\epsilon} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1} \quad K_{ЭПФ} = 0,85 \cdot K_P - 0,064, \quad r = 0,96; \quad (1)$$

$$\text{при } \dot{\epsilon} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1} \quad K_{ЭПФ} = 0,92 \cdot K_P + 0,01, \quad r = 0,98; \quad (2)$$

$$\text{при } \dot{\epsilon} = 1,7 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1} \quad K_{ЭПФ} = 0,85 \cdot K_P + 0,4, \quad r = 0,98; \quad (3)$$

где  $r$  — коэффициент корреляции.

Обращает на себя внимание совпадение с хорошей точностью коэффициентов при  $K_P$  в формулах (1), (2), (3), говорящее о том, что  $K_{ЭПФ}$  растет с ростом  $K_P$  с практически одинаковой скоростью при различных скоростях деформации. Свободный член в уравнениях (1) и (2) близок к 0, что также хорошо вписывается в рамки известных закономерностей поведения сплавов с ЭПФ [3].

Коэффициент формовосстановления при проявлении ЭОПФ определяли по формуле.

$$K_{ЭОПФ} = \frac{\Delta l_{ЭОПФ}}{L_0} \cdot 100\%,$$

где  $\Delta l_{ЭОПФ}$  — уменьшение длины рабочей части образца при проявлении ЭОПФ.

Полученные в результате экспериментов зависимости величины ЭОПФ от  $K_P$  при исследованных скоростях деформации описываются следующими уравнениями:

при $\dot{\epsilon} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$	$K_{\text{ЭОПФ}} = 0,09 \cdot K_p + 0,8,$	$r = 0,7;$
при $\dot{\epsilon} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$	$K_{\text{ЭОПФ}} = 0,13 \cdot K_p + 0,47,$	$r = 0,8;$
при $\dot{\epsilon} = 1,7 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$	$K_{\text{ЭОПФ}} = 0,18 \cdot K_p + 0,51,$	$r = 0,6.$

Малое значение коэффициента при  $K_p$ , а также величина коэффициента корреляции, говорят о более слабой функциональной зависимости между наблюдаемыми величинами, чем в случае с величиной  $K_{\text{ЭПФ}}$ . Полученные результаты распространяют известные закономерности  $K_{\text{ЭОПФ}} = f(K_p)$  [4] на весь исследованный диапазон скоростей задания предварительной деформации.

По диаграмме проявления ЭПФ методом касательных определяли температуры начала и конца обратного мартенситного перехода  $A_s$  и  $A_f$ .

Полученные в результате экспериментов зависимости  $A_s$  и  $A_f$  от  $K_p$  описываются следующими линейными уравнениями:

при $\dot{\epsilon} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$	$A_s = 2,9 \cdot K_p + 194$	$r = 0,75,$
	$A_f = 2,2 \cdot K_p + 212$	$r = 0,87;$
при $\dot{\epsilon} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$	$A_s = 2,8 \cdot K_p + 195$	$r = 0,66,$
	$A_f = 1,9 \cdot K_p + 212$	$r = 0,6;$
при $\dot{\epsilon} = 1,7 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$	$A_s = 0,75 \cdot K_p + 209$	$r = 0,2,$
	$A_f = 1,14 \cdot K_p + 217$	$r = 0,4.$

По приведенным уравнениям видно снижение коэффициентов корреляции и регрессии с ростом  $\dot{\epsilon}$ . Причем при достижении скорости  $\dot{\epsilon} = 1,7 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$  теснота функциональной связи между температурами  $A_s$ ,  $A_f$  и величиной  $K_p$  резко падает.

Измерения температур  $A_s$  и  $A_f$  при втором цикле нагрев – охлаждение образцов в свободном состоянии (рис. 2), когда реализуется ЭОПФ, показали их нечувствительность (в пределах погрешностей измерений) ни к величине предварительной пластической деформации, ни к скорости задания ее ( $\dot{\epsilon} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ ;  $1,7 \cdot 10^{-3}$  и  $1,7 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ ).

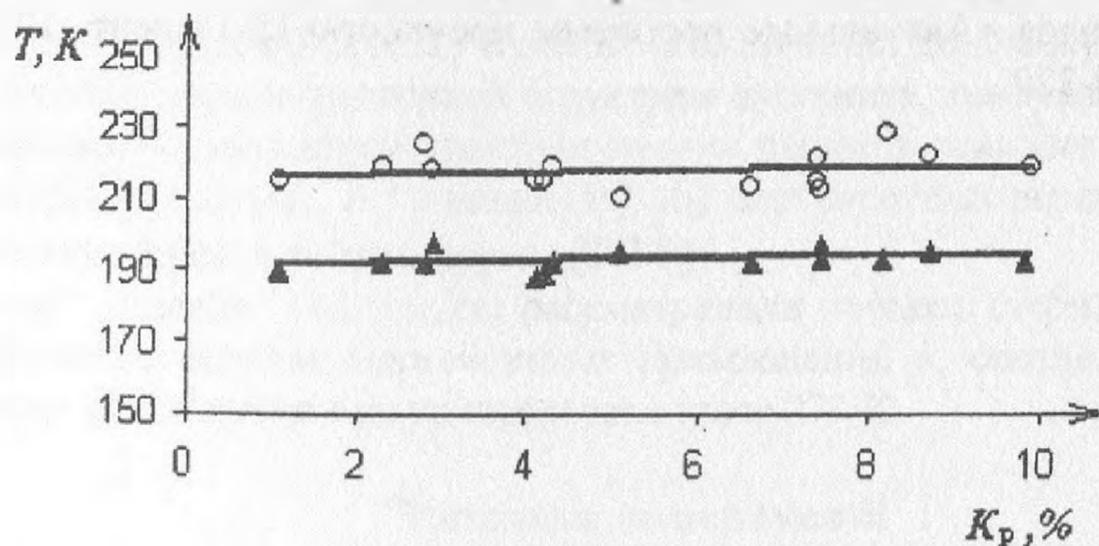


Рис. 2. Зависимости температур  $A_s$  (▲) и  $A_f$  (○) при проявлении ЭОПФ от величины задаваемой пластической деформации при квазистатических скоростях задания формы.

Данный факт позволяет распространить сделанное в работе [5] наблюдение о независимости характеристических температур  $A_s$  и  $A_f$  ЭОПФ от предварительной пластической деформации на криогенный сплав  $Ti - 45,8 \text{ ат. \% Ni} - 2,8 \text{ ат. \% Fe}$  в исследованных скоростях задания ее.

Таким образом, проведенные исследования показали слабую чувствительность указанного сплава к скорости задания деформации в квазистатическом диапазоне скоростей деформирования. При этом сохраняется линейная зависимость эффекта памяти формы от степени предварительной пластической деформации ( $K_p \leq 8\%$ ). Отмечено значительное снижение влияния степени деформации на характеристические температуры  $A_s$  и  $A_f$  при росте  $\dot{\epsilon}$  от  $1,5 \cdot 10^{-4}$  до  $1,7 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ . При проявлении ЭОПФ характеристические температуры  $A_s$  и  $A_f$  не изменяются при вариации степени предварительной пластической деформации и скорости задания ее в исследованном диапазоне величин.

### Список литературы

1. Popov N. N., Sevryugina N. D., Sevryugin I. V., Derkach N. V. Study into the influence of the shape setting rate on memory effect manifestation in titanium nickelide // Proc. of the Int. Symp. on Shape Memory Materials (SMM'99), May 19-21, 1999, Kanazawa, Japan / Trans Tech Pub. - 1999. -Vol. 327-328. - P. 187-190.
2. Попов Н. Н., Севрюгина Н. Д., Севрюгин И. В. Эффект обратимой памяти в никелиде титана после динамического задания формы // Материалы XXXV семинара «Актуальные проблемы прочности» 15-18 сент. 1999 г., Псков. - Ч. II. - С. 79-84.
3. Лихачев В. А., Кузьмин С. Л., Каменцева З. П. Эффект памяти формы. - Л.: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1987. - 216 с.
4. Материалы с эффектом памяти формы: Справ. изд. В 3 т. /Под ред. Лихачева В. А. - СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998. - Т.2. - 374 с.
5. Волков А. Е., Евард М. Е., Лагоудас Д., Миллер Д., Старосельцева Е. А. Влияние пластической деформации на эффект обратимой памяти формы // Материалы XXXV семинара «Актуальные проблемы прочности» 15-18 сент. 1999 г., Псков. - Ч. II. - С. 326-329.