

М.А.Хусанов, В.А.Андреев, О.В.Летенков, А.Б.Бондарев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПСЕВДОУПРУГОСТИ СПЛАВА Ti-50,56ат.%Ni

The experimental investigation of the effect of the Ni-alloy pseudoelasticity has been conducted. It is shown that the flag diagram revealing the complete pseudoelastic cycle, is observed under the positive temperatures, 13 to 17°C. At lowering the temperature, the character of pseudoelastic behavior is changed, the flag pseudoelasticity type disappears. Under temperatures below 0°C, the pseudoelasticity effect is only revealed in the range of strain strength.

Известно [1,2], что в сплавах, испытывающих термоупругие мартенситные превращения (МП), эффект псевдоупругости проявляется при температуре ниже  $M_d^*$ . Такое соотношение температур чаще всего реализуется в сплавах, когда температура  $A_s$  начала обратного мартенситного превращения меньше температуры  $M_s$  начала прямого МП. В этих условиях наведенный приложенной нагрузкой деформационный мартенсит после разгрузки оказывается термодинамически неустойчивым, в результате чего появляются химические силы возврата, которые приводят к упругому восстановлению формы. В ряде работ [2-4] показано, что максимальная псевдоупругость наблюдается в области как отрицательных, так и положительных температур. При увеличении содержания никеля до 51 ат.% температурный интервал превращения смещается в область низких температур от  $-20^\circ\text{C}$  до  $-90^\circ\text{C}$ . Эти сплавы являются наиболее предпочтительными для использования в медицине и технике, поскольку при комнатной температуре и выше нее находятся в псевдоупругом состоянии. Однако обеспечить высокую псевдоупругость в достаточно широком интервале температур, например от  $20^\circ\text{C}$  до  $-30^\circ\text{C}$ , достаточно сложно.

В данной работе осуществлена попытка реализации эффекта псевдоупругости при температурах ниже и выше  $0^\circ\text{C}$ . Одновременно обсуждаются особенности проявления эффекта псевдоупругости на разных этапах кривой нагружения сплава.

Исследования проводились на сплаве  $\text{Ti}_{49,44}\text{Ni}_{50,56}$  (плавка 41) с температурами МП:  $M_s = -26^\circ\text{C}$ ,  $M_f = -34^\circ\text{C}$ ,  $A_s = -21^\circ\text{C}$ ,  $A_f = -16^\circ\text{C}$  после горячего волочения и отжига при  $450^\circ\text{C}$ , 15 мин. Деформирование образцов с размерами  $l_0 \times d = 100 \times 1$  мм осуществляли растяжением на разрывной машине типа FPZ-10/1.

На рис.1 представлены диаграммы растяжения сплава Ti-50,56ат.%Ni при температурах выше  $A_f$ . Видно, что кривые состоят из нескольких участков, свидетельствующих об изменении свойств мартенситной неупругости и псевдоупругости. На участке *a-b* материал деформируется упруго, вслед за чем следует пластическое течение (участок *b-в*). При достижении точки *в* нагрузка резко возрастает, вследствие нарастающего деформационного упрочнения.

Разгрузка на любом этапе нагружения происходит по упругому закону, т.е. проявляется эффект псевдоупругости, при котором имеет место полный или частичный возврат деформации. При снятии нагрузки на этапе левее точки *в* происходит восстановление формы вплоть до полного исчезновения деформации (рис.1, петли 1, 2, 3). Такое поведение объясняется тем, что эффективная температура в некоторых объемах металла понижается, в результате этого термический аустенит превращается в мартенсит напряжения. При разгрузке движущие силы возврата деформации вызывают полное формовосстановление, обусловленное силами химического происхождения.

\* $M_d$  — температура, ниже которой мартенсит может возникнуть не только вследствие понижения температуры, но и под действием механического напряжения.

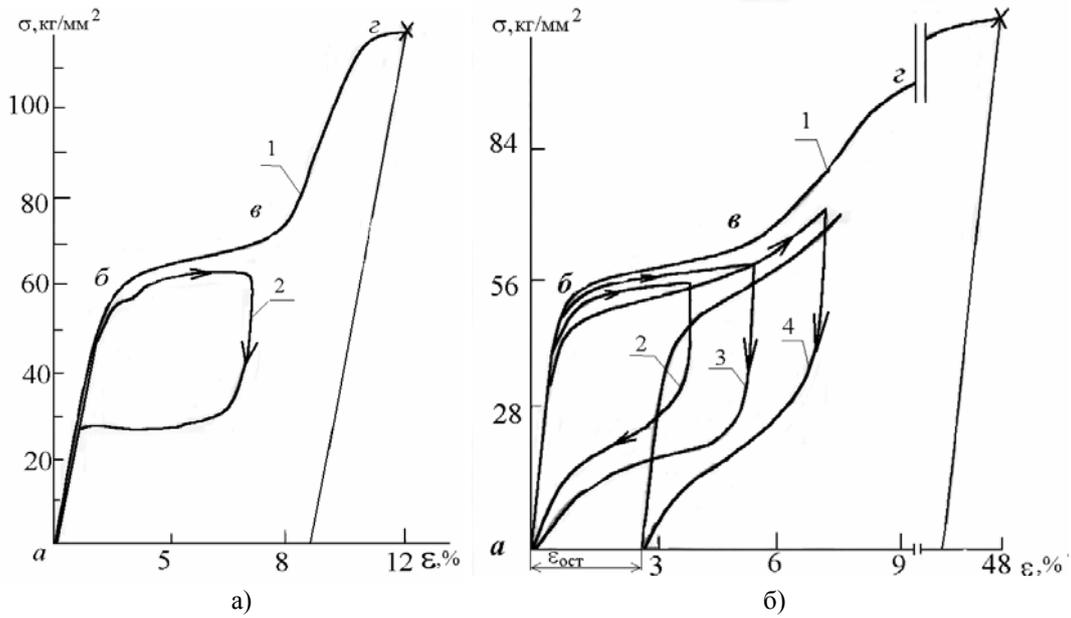


Рис.1. Диаграммы псевдоупругости при  $T = 17^{\circ}\text{C}$  (а) и  $T = 5^{\circ}\text{C}$  (б): 1 — кривая растяжения; 2,3 — флажковая диаграмма; 4 — петля псевдоупругости гистерезиса на участке фазовой текучести при постоянном коэффициенте деформационного упрочнения

Участок  $в-г$  отличается от участка  $б-в$  нарастающим эффектом деформационного упрочнения. Разгрузка на участке правее точки  $в$  изменяет траекторию кривой псевдоупругого возврата деформации. Упругая деформация на данном этапе вследствие фазового и дислокационно-пластического течения полностью не исчезает, имеет место остаточная деформация (рис.1б, кривая 4). Здесь пластичность обусловлена, как полагают авторы [2], образованием и движением границ между различными вариантами мартенсита.

Характерные петли псевдоупругого гистерезиса при  $T = 13^{\circ}\text{C}$  приведены на рис.2а. Видно, что псевдоупругость, сформированная на участке фазовой текучести, имеет выраженную флажковую форму. При повторении циклов нагружение — разгрузка наблюдается полный псевдоупругий возврат. Следует обратить внимание лишь на то, что фазовый предел текучести от цикла к циклу снижается и стабилизируется на 7-10 циклах (рис.2а).

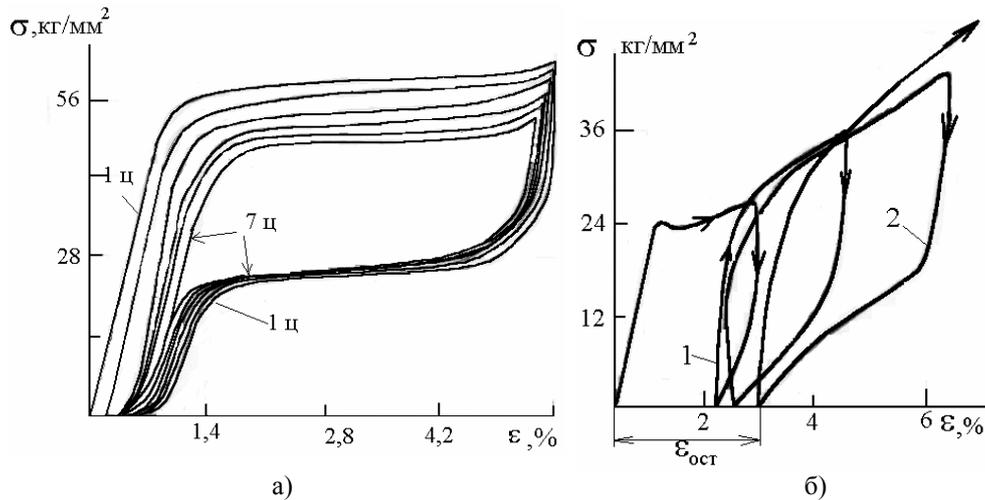


Рис.2. Петли псевдоупругости сплава Ti-50,56ат.%Ni при  $T = 13^{\circ}\text{C}$  (а) и  $T = -20^{\circ}\text{C}$  (б)

Деформирование при температурах  $\leq A_s$ , как правило, приводит к снижению фазового предела текучести и уменьшению протяженности участка фазовой пластичности (рис.2б). На участке фазовой текучести псевдоупругий возврат близок к нулю. Однако на больших базах деформации псевдоупругий возврат усиливается (рис.2б, петля 2). Наблюдается частичный возврат деформации, наведенный превращением. Это значит, что при нагружении возникают силы только механического происхождения, которые при деформировании вблизи  $A_s$  очень малы и не способны обеспечить высокую псевдоупругость.

#### Выводы

1. Петли псевдоупругого гистерезиса более совершенны и замкнуты при деформировании в области фазовой пластичности.
2. При деформировании сплава в окрестности температуры  $A_s$  полный цикл нагрузка — разгрузка приводит к остаточной деформации.
3. Установлено, что псевдоупругость исследуемого сплава реализуется только при температурах выше  $0^\circ\text{C}$ . Расширение интервала проявления псевдоупругости возможно, видимо, при увеличении содержания в сплаве никеля до 51 ат. %.

- 
1. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л.: ЛГУ, 1987. 216 с.
  2. Оцука К., Симидзу К., Судзуки К. и др. Сплавы с эффектом памяти формы / Под ред. Х.Фикакубо. Пер. с яп. М.: Металлургия, 1990. С.41-75.
  3. Кузьмин С.Л., Лихачев В.А. // ФММ. 1982. Т.53. Вып. 5. С.886-891.
  4. Некман М. Hornbogen // Phys. France. 2003.V.112. P.831-834.