

05;12

## Влияние деформации на силовые характеристики эффектов памяти формы в сплавах на основе никелида титана

© Т.Ю. Малеткина, В.Э. Гюнтер

Медико-инженерный центр имплантантов с памятью формы, 634034 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 2 сентября 1997 г.)

Описаны исследования влияния пластической деформации и температуры деформирования на зависимость от температуры величины развиваемых усилий в сплавах никелида титана, обладающих свойствами памяти формы.

Сплавы на основе никелида титана обладают уникальными свойствами памяти формы, сверхэластичности и пластичности. Применение в медицине в качестве имплантантов конструкций и устройств из никелида титана часто связано с преодолением материалом внешнего сопротивления в ходе восстановления формы при нагреве после предварительной деформации. Внешнее сопротивление ограничивает восстановление формы и вызывает развитие в материале внутренних напряжений. В предельной ситуации жестко заневоленного образца восстановление формы полностью предотвращается, внутреннее напряжение достигает наибольших значений и близко к критическому напряжению интенсивного развития мартенситной деформации при температуре ниже  $M_d$  и к пределу текучести выше  $M_d$  (рис. 1, *b*, кривая 1) [1]. А при величине предварительной деформации 2–6% температурная зависимость развиваемых напряжений  $\sigma - T$  ниже температуры  $M_d$  полностью совпадает с температурной зависимостью критического напряжения мартенситной деформации [2].

Так как силовые и деформационные эффекты в никелиде титана тесно связаны, то информация, полученная из кривой температурной зависимости развиваемых напряжений, позволяет сделать качественную, а в некоторых случаях и количественную оценку характеристик эффектов памяти формы и сверхэластичности.

Цель настоящей работы — исследовать влияние пластической деформации и температуры деформирования на температурную зависимость развиваемых усилий в сплавах никелида титана на примере сплава марки ТН-10, который является одним из наиболее широко используемых в медицине. Сплав ТН-10 характеризуется высокими физико-механическими свойствами и имеет удобный для использования температурный интервал восстановления формы.

Как в исходном недеформированном состоянии, так и после деформации в выбранном сплаве последовательно происходят два мартенситных превращения: при температуре  $T_R = 20^\circ\text{C}$  из высокотемпературной  $B2$ -фазы в  $K$ -фазу, затем при температуре  $M_H = -5^\circ\text{C}$  в фазу  $B19'$ .

На универсальной машине УПР, работающей в условиях деформации растяжением, при температурах  $-196$ ,  $-150$ ,  $-50$ ,  $0$ ,  $25$ ,  $50$ ,  $100^\circ\text{C}$ , проводили деформацию

образцов на величины 1.5, 4, 8, 12 и 16%, каждая из которых соответствует разным стадиям развития мартенситной и пластической составляющих деформации. Величину деформирования определяли по диаграмме  $\sigma - \varepsilon$ , снятой при комнатной температуре до разрыва. Для изучения характеристик развиваемых напряжений продолженные и неразгруженные образцы в заневоленном в установке состоянии нагревали электропечью до температуры 200–250°C с одновременной записью диаграммы  $\sigma - T$ . Релаксацию напряжений исследовали после деформации образцов при температурах 0, 50, 100, 150, 200°C, охлаждая заневоленный материал с одновременной записью диаграммы  $\sigma - T$ .

На рис. 1, *b* представлена температурная зависимость внутренних напряжений при нагреве (кривая 1) и последующем охлаждении (кривая 2) после деформации на 4% в мартенситном состоянии. В процессе непрерывного нагрева с прохождением интервала мартенситных превращений в заневоленном сплаве наблюдается эффект релаксации и генерации напряжений. Минимальное значение напряжения мартенситного сдвига  $\sigma_{\min}$  на диаграмме  $\sigma - T$  (рис. 1, *b*, кривая 1) соответствует приблизительно температуре  $M_{\text{int}}$  начала образования

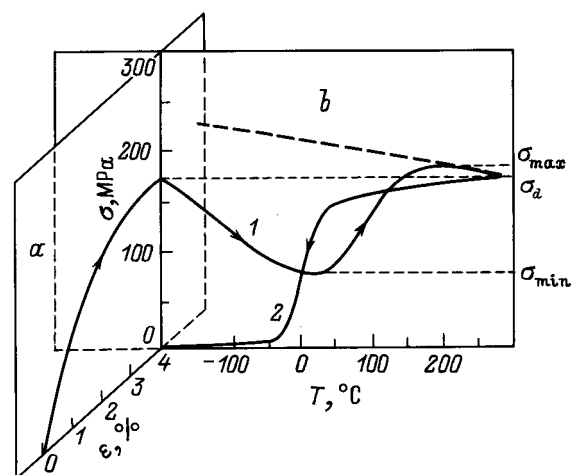


Рис. 1. Нагружение (*a*) и последующее изменение внешнего напряжения (*b*) при непрерывном нагреве (1) и охлаждении (2) сплава ТН-10.

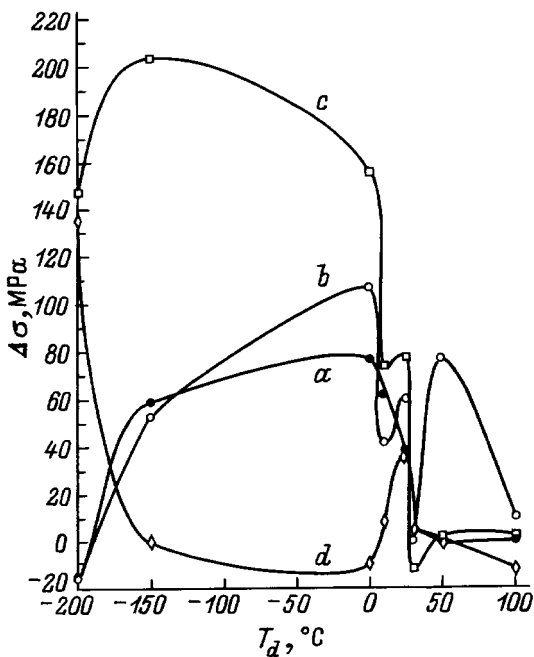


Рис. 2. Зависимость  $\Delta\sigma = |\sigma_{\max} - \sigma_{\min}|$  от температуры деформации для разной величины предварительной деформации материала.  $\varepsilon$ , %:  $a - 1.5$ ,  $b - 4$ ,  $c - 8$ ,  $d - 12$ .

термического мартенсита  $B19'$ . При температуре  $M_d$  напряжения достигают предела текучести и имеют максимальные значения  $\sigma_{\max}$ . Последующий нагрев ведет к релаксации напряжений путем пластического сдвига, сопротивление которому соответствует пределу текучести и определяется на диаграмме  $\sigma-T$  некоторой экстраполяционной кривой от высоких температур к низким (рис. 1,  $b$ , штриховая линия). Значение предела текучести при всех температурах ниже  $M_d$  близки к максимальному значению напряжения мартенситного сдвига  $\sigma_{\max}$  при температуре  $M_d$ . Поэтому разность между максимальными и минимальными значениями внутренних напряжений  $\Delta\sigma = |\sigma_{\max} - \sigma_{\min}|$  при одной и той же температуре характеризует подверженность материала пластической деформации и, как следствие, вкладу пластической составляющей деформации в возврат формы при эффектах памяти. Чем выше предел текучести и ниже напряжение мартенситного сдвига, тем меньше вклад пластической деформации в деформацию возврата и выше степень восстановления формы.

На рис. 2 представлены зависимости  $\Delta\sigma$  от температуры деформации  $T_d$  для разной величины предварительной деформации. Наибольшие значения  $\Delta\sigma$  соответствуют предварительной деформации на 8% в температурном интервале существования мартенсита  $B19'$  (рис. 2,  $d$ ), что свидетельствует о возможности проявления сверхэластичного поведения данного сплава и его высоком ресурсе обратимой деформации в указанном температурном интервале. Очевидно, данная величина деформации приводит к развитию наиболее благоприятных внутрен-

них условий для реализации мартенситных превращений и влиянию  $R$ -фазы на стабилизацию мартенсита  $B19'$ . Увеличение деформации подавляет эффекты памяти формы и сверхэластичности за счет увеличения вклада пластической составляющей деформации, препятствующей движению межфазных границ раздела при мартенситных превращениях (рис. 2,  $d$ ).

Охлаждение через интервал мартенситных превращений сопровождается релаксацией накопленных напряжений независимо от температуры деформации (рис. 1,  $b$ , кривая 2 и рис. 3). При сопоставлении кривых 1 и 2 на рис. 1 видно, что быстрое уменьшение внутренних напряжений при охлаждении наблюдается в интервале температур мартенситных превращений, соответствующем минимальным значениям напряжения мартенситного сдвига. При деформировании в высокотемпературном состоянии уровень максимальных напряжений  $\sigma_{\max}$  зависит от температуры деформации. После деформации при  $200^\circ\text{C}$  зависимость  $\sigma-T$  имеет двухстадийный характер. Первая стадия релаксации напряжений связана с тем, что при деформировании вблизи  $M_d$  пластическая составляющая деформации приводит к созданию концентраторов напряжений, стимулирующих зарождение и рост кристаллов мартенсита при понижении температуры. Основное же снижение напряжений происходит в интервале мартенситных превращений и описывается уравнением Клаузиуса-Клапейрона [3]. Охлаждение до температуры жидкого азота ведет к росту  $\sigma$ , т.е. в материале вновь развиваются усилия. Этот факт впервые обнаружен и связан с переориентацией и раздвойникованием охлажденного мартенсита. Полученные в работе результаты позволяют направленно выбирать условия и изменять параметры эффектов памяти формы для их соответствия поставленным задачам.

## Список литературы

- [1] Гюнтер В.Э., Итин В.И., Монасевич Л.А. и др. Эффекты памяти формы и их применение в медицине. Новосибирск: Наука, 1992. 742 с.
- [2] Гюнтер В.Э., Серикова Т.Ю., Монасевич Л.А., Паскаль Ю.И. А.с. № 1698688 СССР, МКИ G01 № 128. БИ. 1991. № 46.
- [3] Родригес С., Браун Л.С. // Эффект памяти формы в сплавах / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1979. С. 35–59.