

05;12

## Влияние предварительной деформации на поведение тонкой кристаллической структуры в предмартенситной области в сплаве на основе никелида титана

© А.А. Клопотов, Т.Л. Чекалкин, В.Э. Гюнтер

Научно-исследовательский институт медицинских материалов и имплантантов с памятью формы при Сибирском физико-техническом институте и Томском государственном университете, 634034 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 11 июля 2000 г. В окончательной редакции 20 ноября 2000 г.)

Приведены результаты *in situ* рентгеноструктурного исследования состояния кристаллической решетки сплава на основе TiNi, деформированного и находящегося под действием внешнего напряжения в предпереходной области накануне мартенситных превращений  $B2-R-B19'$ . Обнаружено, что предпереходное состояние, предшествующее мартенситным превращениям в исследуемом сплаве, проявляется в особенностях поведения параметра элементарной ячейки и коэффициента теплового расширения в фазе  $B2$ . Величина коэффициента теплового расширения в фазе  $B2$  немонотонно зависит от деформации и приложенного внешнего напряжения.

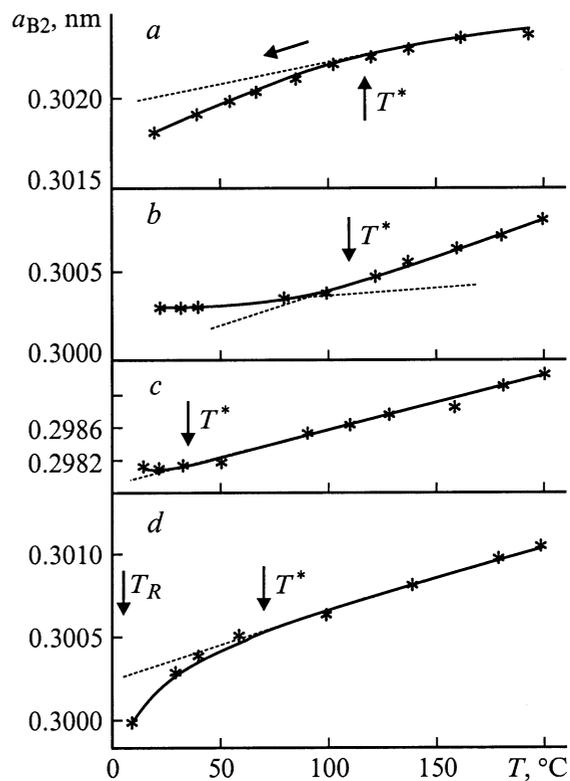
Проблема предпереходных явлений, предшествующих мартенситным превращениям (МП), в сплавах на основе никелида титана находится в центре внимания исследователей много лет. Это обусловлено большим научным и практическим интересом, который вызван уникальными свойствами (эффекты памяти формы, сверхэластичности и др.) на данном классе материалов [1].

В данной работе представлены результаты *in situ* рентгеноструктурного исследования состояния кристаллической решетки сплава на основе TiNi, продеформированного и находящегося под действием внешнего напряжения в предпереходной области накануне МП  $B2-R-B19'$ .

Изучение теплового расширения металлов и сплавов несет информацию о характере сил межатомного взаимодействия. Тепловое расширение вызвано проявлением ангармонических эффектов в межатомных взаимодействиях [2]. Для ответа на вопрос о том, как это межатомное взаимодействие меняется в сплаве ТН-10 (сплава на основе TiNi [1]) в предпереходной области, предшествующей МП  $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ , и как оно реагирует на воздействие, вызванное пластической деформацией в заневоленном образце, было проведено изучение температурных зависимостей параметра элементарной ячейки в фазе  $B2$  (рис. 1).

Рентгеноструктурные *in situ* исследования были проведены на дифрактометре ДРОН-2 с применением специальной приставки [3], которая позволяла исследовать сплав в необходимом температурном интервале при постоянно приложенной нагрузке и фиксированной деформации. Съёмки проводили в фильтрованном  $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Методика приготовления сплава ТН-10 с составом, близким к эквиатомному, описана в [1]. Образцы для рентгенографии перед исследованием были отожжены при  $800^\circ\text{C}$  в течение 1 h.

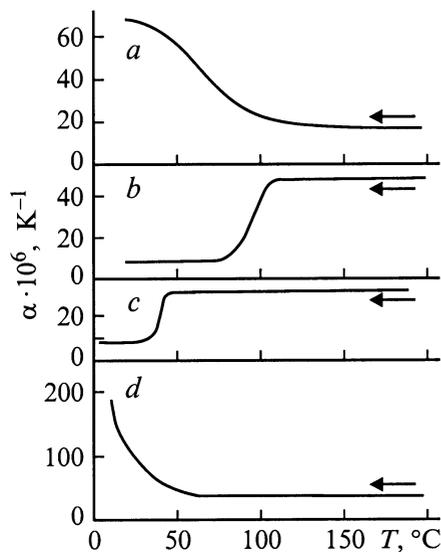
На рис. 1 приведены температурные зависимости параметра элементарной ячейки фазы  $B2$   $a_{B2}(T)$  в температурной области, предшествующей МП. На зависимостях  $a_{B2}(T)$  недеформированного сплава видно, что отклонение от линейного поведения начинается задолго до начала МП (рис. 1, *a*). Такое поведение параметра решетки



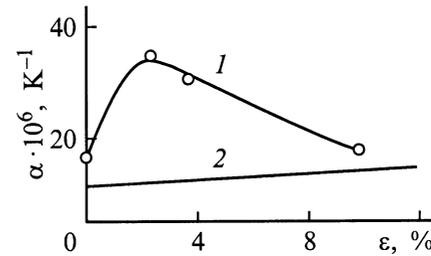
**Рис. 1.** Температурные зависимости параметра элементарной ячейки в фазе  $B2$  в недеформированном состоянии (*a*); в деформированных состояниях, находящихся в заневоленном состоянии:  $\varepsilon = 2.5$  (*b*),  $3.7$  (*c*),  $10\%$  (*d*).

в области, предшествующей переходу, свидетельствует о развитии предпереходного состояния [4]. Изучение зависимости  $a_{B2}(T)$  в слабо деформированном сплаве и находящемся в заневоленном состоянии выявило особенность в температурной области вблизи  $100^\circ\text{C}$  (рис. 1, *b*). Эта особенность заключается в наличии точки перегиба (температура  $T^*$ ) на кривой  $a_{B2}(T)$ . Повышение степени деформации привело к смещению точки перегиба на кривой  $a_{B2}(T)$  в сторону низких температур (рис. 1, *c*). На образцах, продеформированных до 10%, предпереходная область на кривой  $a_{B2}(T)$  заметно уже, чем в недеформированном образце, и имеет более выраженный характер (рис. 1, *d*).

Обычно при анализе теплового расширения твердых тел используют температурные зависимости коэффициентов теплового расширения. По экспериментальным кривым  $a_{B2}(T)$  были получены коэффициенты теплового расширения (рис. 2). Видно, что в недеформированном сплаве при приближении к температуре начала фазового перехода (ФП)  $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$  коэффициент теплового расширения в фазе  $B2$  увеличивается. Это свидетельствует об уменьшении сил межатомного воздействия и, как следствие, об уменьшении устойчивости кристаллической решетки фазы  $B2$  (рис. 2, *a*). Незначительное деформационное воздействие приводит к заметному увеличению коэффициентов теплового расширения в фазе  $B2$  вдали от ФП. В температурной области, предшествующей ФП, наблюдается уменьшение коэффициентов теплового расширения в фазе  $B2$  (рис. 2, *b, c*). Значительное деформационное воздействие также приводит к увеличению коэффициента теплового расширения в фазе  $B2$  вдали от ФП, а в температурной области, предшествующей ФП, приводит к заметному



**Рис. 2.** Температурные зависимости изменения коэффициента термического расширения в сплаве ТН-10 после деформации и находящегося в заневоленном состоянии:  $\varepsilon = 0$  (*a*), 2.5 (*b*), 3.7 (*c*), 10% (*d*).



**Рис. 3.** Зависимость коэффициентов линейного расширения от степени деформации для сплава ТН-10 (*1*) и для чистого никеля (*2*), рассчитанного по формуле  $\alpha = \alpha_0(1 + A\varepsilon)$ .

росту величины коэффициента теплового расширения в фазе  $B2$  (рис. 2, *d*).

Изменение коэффициентов теплового расширения в зависимости от степени деформации является небольшим. В [2] установлено, что при наличии деформации коэффициенты теплового расширения подчиняются зависимости  $\alpha = \alpha_0(1 + A\varepsilon)$ , где  $\varepsilon$  — деформация, вызванная внешними воздействиями;  $\alpha_0$  — коэффициент теплового расширения при  $\varepsilon = 0$ ;  $A \approx \chi_T E \gamma / 3$  — коэффициент, определяемый упругими свойствами вещества;  $E$  — модуль линейной упругости. Был проведен расчет коэффициента теплового расширения в зависимости от степени пластической деформации для никеля с коэффициентом  $A = 2.1$  [2] (рис. 3). Эта зависимость имеет немонотонный характер для никелида титана, в котором происходят МП. В металле, не испытывающем МП, зависимость коэффициента теплового расширения от деформации имеет линейную зависимость.

Известно, что коэффициент теплового расширения металлов  $\alpha$  одна из ангармонических характеристик кристаллов [4]. Коэффициент  $\alpha$  зависит от энергии связи  $|U|$ . Для чистых металлов коэффициент теплового расширения при  $T > \Theta$  можно вычислить по формуле [5]  $\alpha = (3CR)/(2|U|)$ , где  $C$  — коэффициент и может принимать значения 3, 5, ..., 10. Эта формула качественно отражает реальную ситуацию: чем больше энергии связи и глубже потенциальная яма, тем меньше коэффициент теплового расширения. Увеличение значения коэффициента теплового расширения  $\alpha$  свидетельствует об уменьшении энергии связи, т.е. отражает понижение стабильности данной кристаллографической модификации. В нашем случае скачкообразное повышение коэффициента  $\alpha$  показывает, что кристаллическая решетка фазы со структурой  $B2$  в данной температурной области перешла в новое, менее устойчивое состояние по отношению к низкотемпературному состоянию. Это свидетельствует о подготовке кристаллической решетки к МП. По величине скачка  $\Delta\alpha$  можно судить о величине изменения энергии связи  $\Delta U$ . В сплавах, подвергнутых небольшим деформационным воздействиям в температурном интервале непосредственной близости от температуры начала МП  $B2-R$  ( $T_R < T < T^*$ ), коэффициент  $\alpha$  значительно уменьшается. Это свидетельствует о том,

что деформационное воздействие переводит кристаллическую решетку фазы  $B2$  в более стабильное состояние. Эти данные коррелируют с обнаруженной немонотонной зависимостью кривых  $T_R$  и  $M_H$  от степени деформации с минимумом в области 3–5% деформации для сплава ТН-10 [6].

## Выводы

Таким образом, на основе рентгеноструктурных исследований показано, что предпереходное состояние, предшествующее МП в сплаве на основе никелида титана, проявляется в особенностях поведения параметра элементарной ячейки и коэффициента теплового расширения в фазе  $B2$ . Величина коэффициента теплового расширения в фазе  $B2$  немонотонно зависит от деформации и приложенного внешнего напряжения.

## Список литературы

- [1] Гюнтер В.Э., Дамбаев Г.Н., Сысолятин П.Г. и др. Медицинские материалы и имплантанты с памятью формы. Томск: ТГУ, 1998. 486 с.
- [2] Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. 292 с.
- [3] Монасевич Л.А., Паскаль Ю.И. // Заводская лаборатория. 1983. № 7. С. 32–34.
- [4] Тестарди Л., Вечер М., Голдберг И. Сверхпроводящие соединения со структурой  $\beta$ -вольфрама. М.: Мир, 1977. 436 с.
- [5] Коняева А.Г. // Журнал физической химии. 1984. Т. 58. Вып. 5. С. 1243–1245.
- [6] Гюнтер В.Э., Малеткина Т.Ю., Клопотов А.А. // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39. № 2. С. 173–179.