

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. Съемки проводили в фильтрованном $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Методика приготовления сплава ТН-10 с составом, близким к эквиаtomному, описана в [1]. Образцы для рентгенографии перед исследованием были отожжены при 800°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

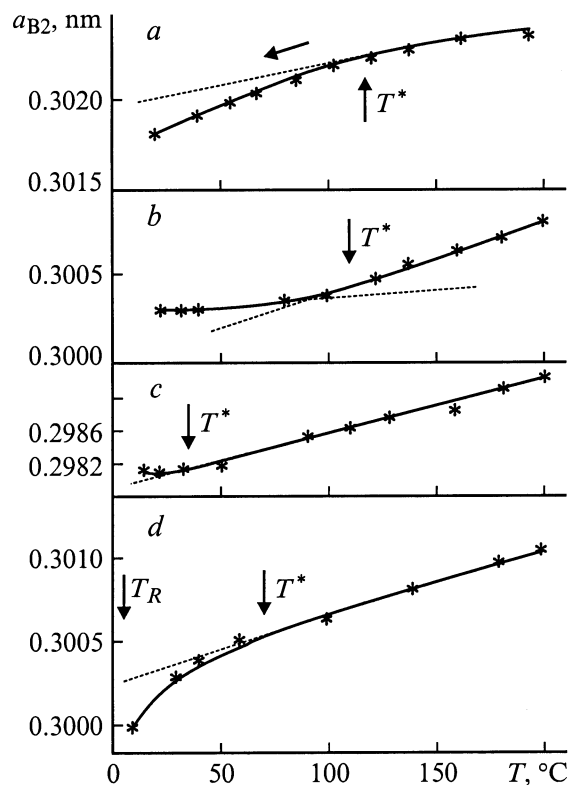


Рис. 1. Температурные зависимости параметра элементарной ячейки в фазе $B2$ в недеформированном состоянии (*a*); в деформированных состояниях, находящихся в заневоленном состоянии: $\varepsilon = 2.5$ (*b*), 3.7 (*c*), 10% (*d*).

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°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 взаимодействия 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

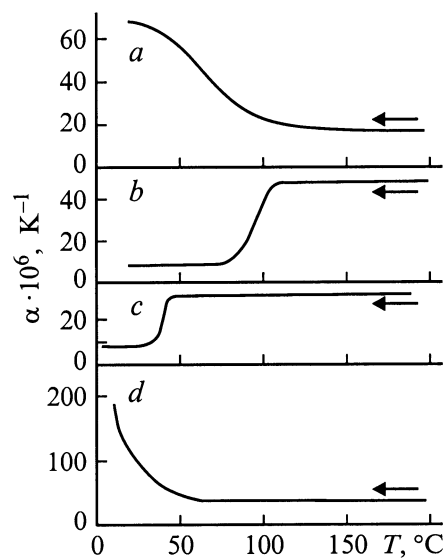


Рис. 2. Температурные зависимости изменения коэффициента термического расширения в сплаве ТН-10 после деформации и находящегося в заневоленном состоянии: $\varepsilon = 0$ (*a*), 2.5 (*b*), 3.7 (*c*), 10% (*d*).

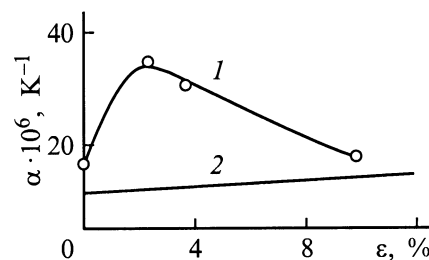


Рис. 3. Зависимость коэффициентов линейного расширения от степени деформации для сплава ТН-10 (*1*) и для чистого никеля (*2*), рассчитанного по формуле $\alpha = \alpha_0(1 + A\varepsilon)$.

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 ε — деформация, вызванная внешними воздействиями; α_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 α одна из ангармонических характеристик кристаллов [4]. Коэффициент α 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 α свидетельствует об уменьшении энергии связи, т.е. отражает понижение стабильности данной кристаллографической модификации. В нашем случае скачкообразное повышение коэффициента α 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 ΔU . В сплавах, подвергнутых небольшим деформационным воздействиям в температурном интервале непосредственной близости от температуры начала МП $B2-R$ ($T_R < T < T^*$), коэффициент α 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 β -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.