

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА $R \rightarrow B19'$ МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ В МОНОКРИСТАЛЛЕ $Ti - 50,8$ ат. % Ni

Беляев С. П., Реснина Н. Н., Ермолаева М. А.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
natasha@smel.math.spbu.ru*

Термоупругие мартенситные превращения в сплавах с памятью формы можно инициировать как изменением температуры, так и приложением нагрузки. Действие механических напряжений на превращение описывается соотношением типа уравнения Клаузиуса–Клапейрона, которое устанавливает прямо пропорциональную связь между смещением температуры термодинамического равновесия фаз и напряжением τ . Поскольку мартенситное превращение реализуется в некотором температурном интервале, а диапазоны прямого и обратного переходов не совпадают, то определение температуры термодинамического равновесия представляется довольно затруднительным [1]. Поэтому структурные переходы характеризуют температурами начала и окончания прямого и обратного превращений. Тогда, предполагая, что движущая сила зарождения мартенситной пластины практически не зависит от температуры и действующего напряжения, уравнение Клаузиуса–Клапейрона применяют для определения смещения напряжением температуры начала прямого мартенситного превращения M_n [2, 3]. Действительно, многочисленными экспериментами, выполненными на различных сплавах, испытывающих термоупругие мартенситные превращения, была установлена линейная зависимость между M_n и τ [2]. Существуют два способа экспериментального определения коэффициента пропорциональности между температурой M_n и напряжением. В первом из них мартенситные превращения инициируют охлаждением сплава при постоянном напряжении. Варьируя величину τ , устанавливают смещение температуры начала фазового перехода. Во втором способе сплав изотермически деформируют при различных температурах и определяют соответствие между температурой испытания и величиной напряжения, необходимого для инициирования фазового перехода. Из уравнения типа Клаузиуса–Клапейрона следует, что коэффициент пропорциональности между температурой и напряжением, не должен зависеть от методики испытания, поскольку он определяется только характеристиками превращения, а именно дисторсией кристаллической решетки и скрытой теплотой перехода. Однако прямых экспериментов, в которых было бы подтверждено или опровергнуто это утверждение нет. Целью настоящей работы явилось изучение температурно-силовых условий возникновения мартенситной $B19'$ фазы из промежуточной R фазы в монокристаллах сплава $TiNi$.

Монокристаллы из сплава $Ti - 50,8$ ат. % Ni предварительно закаливали от 1220 К в воде и отжигали 1 час при температуре 670 К. Методами измерения электросопротивления и дифференциальной сканирующей калориметрии было установлено, что после указанной термообработки в образцах наблюдается превращение из кубической решетки $B2$ в ромбоэдрическую R -фазу в интервале 315 + 285 К, а переход $R \rightarrow B19'$ из ромбоэдрической структуры в моноклинную не регистрируется даже в процессе охлаждения до температуры жидкого азота, однако его можно реализовать, приложив к образцу напряжение. В работе данное структурное превращение в сплаве инициировали двумя способами: охлаждением под постоянной нагрузкой и изотермическим деформированием образца, находящегося в R -фазе. В первом способе образцы нагружали в аустенитном состоянии при температуре 360 К и охлаждали под нагрузкой до 200 К. Величину напряжения варьировали от 100 до 500 МПа. Во втором режиме образцы охлаждали до температуры, лежащей в области существования R фазы, а затем изотермиче-

ски нагружали до 500 МПа. Температуру испытания изменяли от 280 до 210 К. Все эксперименты проводили с использованием специальной методики, позволяющей одновременно измерять температуру, напряжение, деформацию и электросопротивление, по изменению которого судили о протекании структурных превращений. Деформирование осуществляли кручением, чтобы избежать влияния изменения геометрических размеров образца на изменение электросопротивления.

Известно, что $R \rightarrow B19'$ превращение сопровождается падением электросопротивления. В экспериментах по охлаждению сплава при постоянном напряжении определяли температуру M_u , при которой начиналось уменьшение электросопротивления (рис. 1 а) и устанавливали зависимость между τ и значением M_u . При изотермическом деформировании измеряли напряжение, при котором наблюдалось уменьшение электросопротивления (рис. 1 б), что позволило построить зависимость напряжения $\tau^{R \rightarrow B19'}$, необходимого для инициирования $R \rightarrow B19'$ превращения, от температуры испытания.

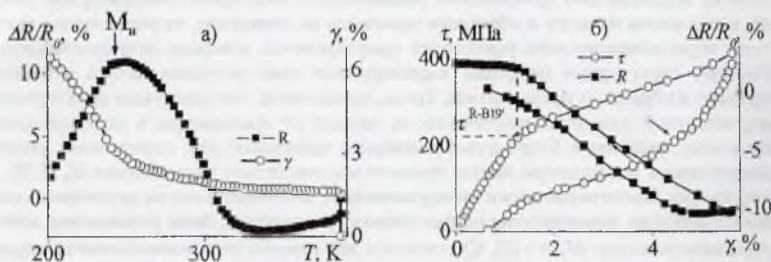


Рис. 1. Определение температуры $R \rightarrow B19'$ превращения при охлаждении образца под нагрузкой (а) и напряжения инициирования $R \rightarrow B19'$ перехода при изотермическом деформировании сплава (б).

Как и ожидалось, экспериментальные зависимости $M_u(\tau)$ и $\tau^{R \rightarrow B19'}(T_{эксп})$ оказались линейными, однако, вопреки имеющимся представлениям, их угловые коэффициенты не совпали (рис. 2). Это означает, что температурно-силовые условия возникновения $B19'$ фазы зависят от режимов выполнения экспериментов. Так, например, при охлаждении под напряжением 400 МПа мартенситное превращение начинается при температуре 255 К. Вместе с тем, если проводить изотермическое деформирование образца при той же температуре, то напряжение, при котором начинается $R \rightarrow B19'$ превращение, составляет не 400 МПа, а всего 248 МПа. Таким образом, для инициирования $R \rightarrow B19'$ перехода при изотермическом деформировании требуются более чем в полтора раза меньшие напряжения, чем при охлаждении под постоянной нагрузкой.

Одной из возможных причин наблюдаемого несовпадения угловых коэффициентов линейных зависимостей $M_u(\tau)$ и $\tau^{R \rightarrow B19'}(T_{эксп})$ может служить различная структура образующейся низкотемпературной $B19'$ фазы. Так, в [4] отмечалось, что параметры $B19'$ структуры зависят от того, из какой высокотемпературной фазы ($B2$ или R) она была получена. Однако в описанных экспериментах реализовывалось только $R \rightarrow B19'$ превращение. В этом случае, наиболее предпочтительным оказывается предположение о том, что уравнение типа Клаузиуса – Клапейрона, в которое входят только “химические” параметры (дисторсия превращения и скрытая теплота), не может быть использовано для описания смещения температуры фазового превращения под напряжением.

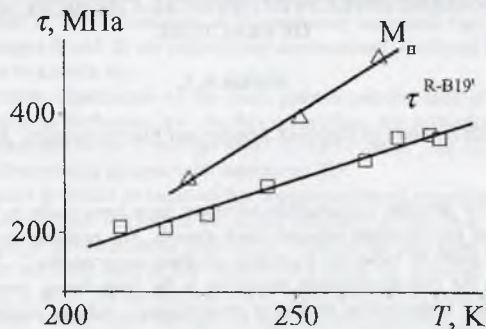


Рис. 2 Диаграммы “напряжение - температура” для мартенситного превращения $R \rightarrow B19'$ в сплаве TiNi, полученные при различных условиях эксперимента. Δ – охлаждение под постоянным напряжением; \square – изотермическое деформирование.

Для того чтобы это соотношение адекватно описывало наблюдаемые в эксперименте закономерности необходимо включить в рассмотрение члены нехимической природы, которые оказывают большое влияние на характеристики мартенситных превращений [1]. Подобный подход был использован в работе [5], где предложено обобщенное выражение типа Клаузиуса–Клапейрона, с введенными в него “нехимическими” поправками. Как указывалось в [5], модифицированный коэффициент пропорциональности между напряжением и температурой в общем случае зависит от условий эксперимента и предыстории материала. Высказанное в [5] предположение подтверждается полученными в настоящей работе результатами.

Авторы выражают благодарность Ю.И. Чумлякову за предоставленные монокристаллические образцы для исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 07-01-00457а).

Список литературы

1. R.J. Salzbrenner, M. Cohen On the thermodynamics of Thermoelastic martensitic transformations // Acta Metallurgica, Vol. 27. P. 739-748.
2. Л. Делэй, Х. Варлимонт Кристаллография и термодинамика мартенсита в сплавах, обладающих эффектом запоминания формы // Эффект памяти формы в сплавах. Пер. с англ., М., Металлургия, 1979. С. 87 – 110.
3. Shape Memory Materials edited by K. Otsuka, S. M. Wayman, Cambridge, Cambridge University Press 1998, P.284.
4. В. И. Воронин, В. Е. Найш, Т. В. Новоселова, В. Г. Пушин, И. В. Сагардзе Структура моноклинных фаз в никелиде титана. III. Каскад превращений $B2 \rightarrow M$ // ФММ, 2000, Т. 89. № 2. С. 65-70.
5. Ю. И. Паскаль Дифференциальные соотношения нелокальной неравновесной термодинамики мартенситных превращений // Изв. вузов СССР. Физика. 1983. № 1. С. 82-86.