

ИЗМЕНЕНИЕ РЕАКТИВНОГО МОМЕНТА И УПРУГОВОЗВРАЩАЕМОЙ КРИВИЗНЫ В ИЗОГНУТЫХ СТЕРЖНЯХ ИЗ TiNi В ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНТЕРВАЛАХ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ.

АБРАХМАНОВ С.А., ИБРАГИМОВ Р.Ш.

Кыргызский национальный университет им Ж. Баласагына,

Бишкек, Кыргызстан,

Кыргызский государственный технический университет им И. Раззакова,

Бишкек, Кыргызстан

ibragimov_rahman@rambler.ru

Аннотация: Изучены генерация и релаксация упруговозвращаемой кривизны в чисто изогнутых стержнях в условиях генерации и релаксации реактивных моментов. Обнаружено, что в межкритических температурных интервалах развитие и релаксация реактивного момента и упруговозвращаемой кривизны не согласованы между собой. Предполагается, что в изогнутых и заневоленных стержнях прямое и обратное мартенситное превращение происходит через промежуточную фазу, которая условно обозначена как α' . Например, $B19 \rightarrow \alpha' \rightarrow B2$ и $B2 \rightarrow \alpha' \rightarrow B19$.

Введение

Деформация в никелиде титана в низкотемпературном фазовом состоянии в отличие от традиционных конструкционных материалов контролируется термоупругим мартенситным превращением. Такую деформацию называют фазовой деформацией [1]. При нагружении стержня из никелида титана в изотермических условиях общая деформация ϵ состоит из суммы упруговозвращаемого $\epsilon_{ув}$ и остаточного $\epsilon_{ост}$ составляющих. В свою очередь $\epsilon_{ост}$ состоит из суммы фазового $\epsilon_{ф}$ и пластического $\epsilon_{п}$ деформаций [1, 2]. При нагреве деформированного стержня через температурный интервал $A_n - A_k$ составляющая $\epsilon_{ф}$ возвращается, при этом $\epsilon_{п}$ не изменяется (где, A_n и A_k – температуры начала и конца обратного мартенситного превращения соответственно). Если при нагреве деформированного стержня воспрепятствовать восстановлению его формы, то он генерирует значительное реактивное усилие [1,2]. До сих пор не исследован эффект генерации и релаксации упруговозвращаемых деформаций в деформированных стержнях в условиях генерации реактивных усилий в межкритических температурных интервалах. В данной работе методом чистого изгиба тонких стержней из никелида титана проведено такое исследование.

Материал и методика эксперимента

В качестве материала для исследования была взята проволока диаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м из эквиатомного никелида титана. Стержни для испытания вырезаны из проволоки. Рабочая длина стержней составляла $6,1 \cdot 10^{-2}$ м. Отжиг стержней проведен в печи сопротивления при температуре 720 К в течение 3,6 кс и с последующим медленным охлаждением в отключенной печи. Механические испытания стержней проведены изгибом на приборе чистого изгиба [3]. Такой прибор установлен в термокамере, позволяющей изменять температуру (Т) испытуемого стержня от 290 К до 400 К.

Для построения диаграммы чистого изгиба в координатах $M - \square$ проведены испытания при изотермических температурах 290 К и 390 К, где M – изгибающий момент, $\square = 1/\rho$ – кривизна стержня, ρ – радиус кривизны. Максимальная кривизна изогнутого стержня при комнатной температуре, когда сплав находился в мартенситном фазовом состоянии, не превышала 37 м^{-1} , при этом максимальная остаточная кривизна ($\kappa_{ост}^M$) составляла $27,2 \text{ м}^{-1}$, а на внешних волокнах степень относительной деформации составляла 2,72 %. Здесь $\kappa_{ост}^M$ – остаточная кривизна изогнутого стержня при комнатной Т, верхний индекс М означает, что изгиб стержня произведен при температуре, когда стержень находился в мартенситном состоянии.

Изучение реактивных моментов, развиваемых изогнутыми стержнями, произведено также на приборе чистого изгиба. Для этого изогнутый стержень медленно нагревается до температуры, превышающей A_k . При этом за счет проявления эффекта памяти формы в температурном

интервале обратного мартенситного превращения стержень начинает вспоминать исходную форму. Для определения реактивного момента поддерживалась постоянная $\kappa_{осм}^M$ путем приложения внешнего изгибающего момента. Внешний изгибающий момент при каждой T уравновешен с реактивным моментом M_R , развиваемым стержнем в результате эффекта памяти формы. При этом, согласно закону Гука, M_R , развиваемый заневоленным стержнем, при каждой T в межкритическом интервале должен быть пропорциональным к упруговозвращаемой кривизне κ_{ϵ}^T стержня. Здесь κ_{ϵ}^T при T (в межкритической области) определена при разгрузке стержня как разность $\kappa_{осм}^M - \kappa_{осм}^T$, $\kappa_{осм}^T$ – остаточная кривизна после разгрузки при T . Когда $T = A_{\kappa}$ – упруговозвращаемая кривизна обозначена как κ_{ϵ}^A , здесь верхний индекс A означает, что данный параметр определен при $T \geq A_{\kappa}$. Далее изучена релаксация $M_R^{МАК}$ и κ_{ϵ}^A при охлаждении стержня. Здесь $M_R^{МАК}$ – реактивный момент, развиваемый заневоленным стержнем при $T=A_{\kappa}$. При испытании на генерацию и релаксацию реактивных моментов стержни в заневоленном состоянии нагреты выше A_{κ} на 20 К-25 К.

Показания приборов, регистрирующие M_R и $\kappa_{осм}^T$ в межкритическом температурном интервале, снимались при изменении T через каждые 4 – 7 К. Погрешность измерения температуры печи сопротивления – ± 7 К, температуры в термокамере – ± 2 К, угла поворота захвата устройства чистого изгиба – $\pm 0,5^\circ$, изгибающего момента – 0,04 Нм.

Результаты эксперимента

Изучим генерацию и релаксацию реактивного момента M_R и упруговозвращаемой кривизны в изогнутых стержнях из никелида титана с различной остаточной кривизной.

1. На рис. 1 а для примера показаны генерация (Δ) и релаксация (\blacklozenge) реактивных моментов (M_R) в стержне с $\kappa_{осм}^M = 27,2 \text{ м}^{-1}$ соответственно в зависимости от температуры нагрева и охлаждения. Сверху на графике приведены характерные температуры, где произошли кризисные изменения величины реактивного усилия и упруговозвращаемой кривизны. Для данного стержня, начиная с T_4 , величина M_R растет интенсивно, поэтому можно принять, что $T_4 = A_{\text{н}}$, а при $T = T_6$ рост M_R останавливается, поэтому $T_6 = A_{\kappa}$. В стержне с другой остаточной кривизной температуры $A_{\text{н}}$ и A_{κ} будут другими [1, 2]. На стадии охлаждения стержня при понижении T ниже A_{κ} релаксация M_R с температурой идет с малой скоростью, а при $T \leq T_3 = M_{\text{н}}$ скорость релаксации M_R увеличивается, а релаксация завершится при T_1 . Гистерезис кривой $M_R - T$ на рис. 1 а аналогичен результатам, полученным другими авторами [1, 2]. Такие же кривые получены и для стержней с другими $\kappa_{осм}^M$.

2. На рис. 1 б представлена зависимость $\kappa_{\epsilon}^T - T$ для того же стержня, для которого снят график зависимости, представленный на рис. 1 а (на стадиях нагрева (Δ) и охлаждения (\blacklozenge)) в условиях генерации и релаксации реактивного момента. В межкритическом интервале температур, определенном на начало и конец интенсивной генерации и релаксации M_R (рис. 1 а), величина κ_{ϵ}^T (см. рис. 1 б) изменяется экстремально. Так, например, при $T > T_5$, κ_{ϵ}^T меняет знак роста. При этом уменьшение κ_{ϵ}^T в интервале $T_5 \div T_6$ не вызывает уменьшения M_R , а, напротив, его повышает. Выше температуры

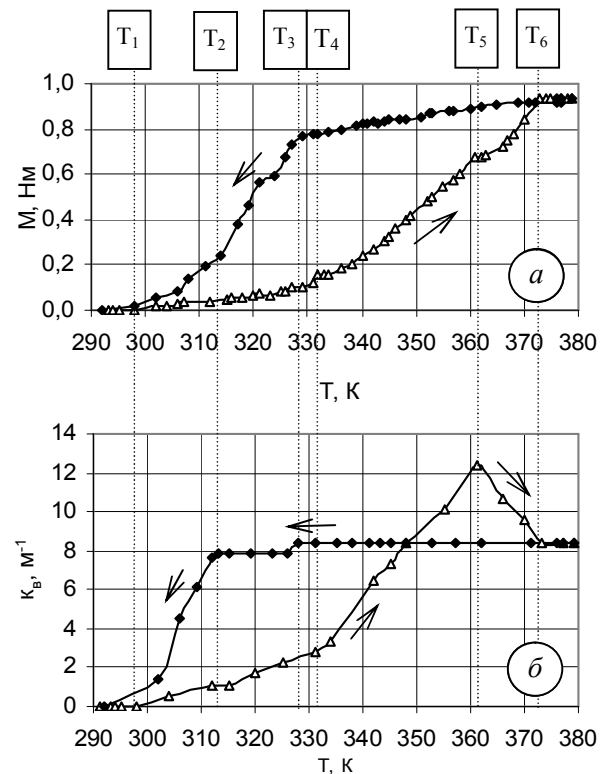


Рис. 1

$T_6=A_k$, изменение κ_6^T прекращается. При охлаждении заневоленного стержня ниже A_k ход кривой $\kappa_6^T - T$ также существенно отличается от хода кривой $M_R - T$. Так, для данного стержня интенсивная релаксация κ_6^A происходит при температуре T_2 значительно ниже T_3 , где начинается интенсивное уменьшение M_R . При T_1 завершается релаксация и M_R , и κ_6^A . Таким образом, на стадии нагрева в условиях генерации реактивных усилий интервал температуры A_n-A_k состоит из двух этапов, A_n-T_5 (этап 1) и T_5-A_k (этап 2). На стадии охлаждения изогнутого и заневоленного стержня интервал температуры M_n-M_k также состоит из двух этапов $T_3=M_n-T_2$ и $T_2-M_k=T_1$. Следует отметить, что в условиях генерации реактивных усилий $\kappa_{ост}^M$ не превращается полностью в κ_6^A .

3. На рис. 2 кривая 1 показывает итоговые зависимости диаграммы изгиба ($M^M - \kappa$) при нагружении и разгрузке стержней (нагружение – \diamond и кривые разгрузки: $a, б, в, г, д, е$) в мартенситном фазовом состоянии при комнатной температуре. На рис 2 представлена диаграмма $M^A - \kappa$ стержня (кривая 2 (\square), испытанного в аустенитном фазовом состоянии при температуре 390 К. Кривая 3 (\blacktriangle) на рис. 2 представляет диаграмму зависимости $M_R^{max} - \kappa_{ост}^M$, где M_R^{max} – максимальный реактивный момент, генерируемый изогнутым и заневоленным стержнем при температуре A_k с остаточной кривизной $\kappa_{ост}^M$.

Кривая $M_R^{max} - \kappa_{ост}^M$ (кривая 3) частично совпадает с кривой $M^A - \kappa^A$ (кривая 2) в том случае, когда $\kappa_{ост}^M \leq \kappa_1$, здесь κ_1 – максимальная кривизна стержня в аустенитном состоянии, которая после разгрузки упруговозвращается полностью. Это условие выполняется, когда $\kappa^A = \kappa_1 \leq 7 \text{ м}^{-1}$. Если $\kappa_{ост}^M > 7 \text{ м}^{-1}$, величина M_R^{max} всегда меньше величины изгибающего момента M^A стержня в аустенитном состоянии при соответствующей кривизне.

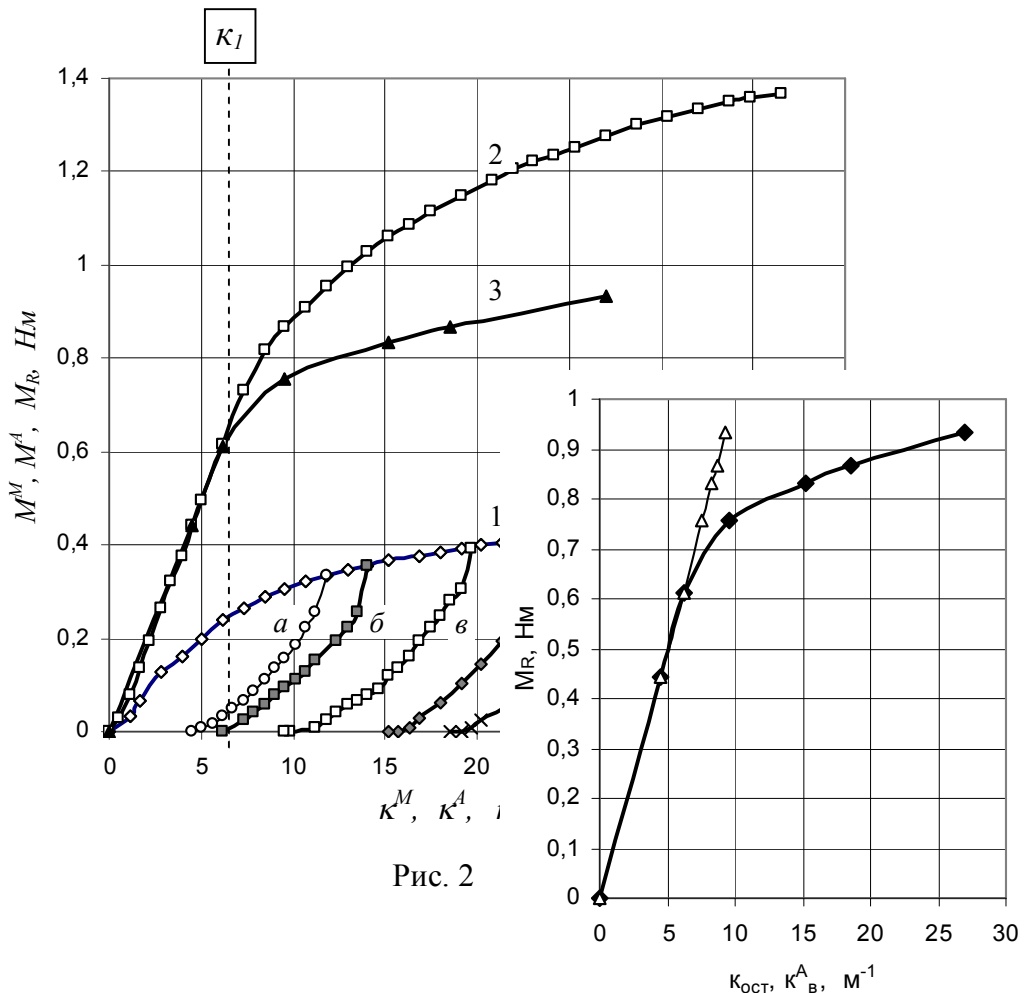


Рис. 2

Рис. 3

4. На рис 3 представлены график зависимости $M_R^{\text{мак}} - \kappa_6^A$ и для сравнения график зависимости $M_R^{\text{мак}} - \kappa_{\text{ост}}^M$. Видно, что между величинами $M_R^{\text{мак}}$ и κ_6^A для стержней из никелида титана в условиях генерации реактивных усилий выполняется прямая пропорциональность, то есть закон Гука. Согласно известной формуле

$$\frac{M_R^{\text{мак}}}{EI} = \kappa_6,$$

при постоянной жесткости сечения стержня (EI) всегда выполняется пропорциональность между $M_R^{\text{мак}}$ и κ_6 . Прямая пропорциональность между $M_R^{\text{мак}}$ и κ_6 при $T \geq A_k$ показывает, что жесткость сечения изогнутых стержней при этой T практически одинакова независимо от величины предварительной $\kappa_{\text{ост}}^M$. Следует отметить, что температура A_k в стержне в условиях генерации реактивных усилий определяется величиной $\kappa_{\text{ост}}^M$ стержня в мартенситном состоянии, то есть с увеличением остаточной кривизны A_k смещается в более высокую температуру. Несмотря на это, как следует из рис. 3, величина κ_6^A изменяется пропорционально величине $M_R^{\text{мак}}$.

Обсуждение полученных результатов

Из полученных результатов для обсуждения представляет интерес особенность зависимости κ_6^T от T в температурном интервале обратного и прямого мартенситных превращений. В исследуемом сплаве, в отличие от сплавов Cu-Al-Ni [5], в температурных интервалах мартенситного превращения не происходит распад фаз. Поэтому в изогнутых и заневоленных стержнях их аномальные поведения в температурных интервалах обратного и прямого мартенситных превращений обусловлены особенностью термоупругого мартенситного превращения в изогнутом стержне.

Величину остаточной фазовой деформации в стержне с памятью формы после его разгрузки можно уподобить потенциальной энергии, которая в благоприятных условиях может совершать полезную работу.

Аномальное поведение изогнутого стержня (рис.1) в интервалах температур обратного и прямого мартенситных превращений можно объяснить двухэтапным термоупругим мартенситным превращением. Например, при нагреве от T_4 до T_5 мартенситная фаза B19 переходит в промежуточную фазу, которую условно обозначим как α' (первый этап), далее в интервале $T_5 - A_k$ происходит переход $\alpha' \rightarrow B2$ (второй этап). При охлаждении изогнутого стержня с A_k его поведение также допускает, что превращение состоит из двух этапов. Здесь в интервале $T_3 - T_2$ реализуется переход $B2 \rightarrow \alpha'$ (первый этап) и в интервале $T_2 - T_1$ второй этап перехода $\alpha' \rightarrow B19$. И на стадии нагрева и на стадии охлаждения в интервалах температур, где в результате мартенситного превращения происходит увеличение количества α' , при разгрузке наблюдается незначительный псевдоупругий эффект. При двухэтапном мартенситном превращении $B19 \rightarrow \alpha' \rightarrow B2$ некоторая часть потенциальной энергии, накопленная в изогнутом стержне в мартенситном состоянии, при повышении температуры в результате мартенситно-мартенситного превращения переходит в упругую энергию междоменных границ. Поэтому реактивный момент, развиваемый в заневоленном стержне при нагреве, не доходит до кривой изгиба стержня в аустенитном состоянии.

Если остаточная кривизна в стержне в мартенситном состоянии меньше или равна кривизне κ_1 (см. рис. 2), то при заневоливании его в нем развивается реактивный момент, лежащий на кривой деформации изгиба стержня в аустенитном состоянии (рис. 2, кривая 3). По-видимому, в этом случае генерация и релаксация реактивного момента сопровождаются одноэтапным мартенситным превращением, как $B19 \rightarrow B2$.

Расширение температурного интервала обратного и прямого мартенситного превращения с ростом остаточной кривизны в мартенситном состоянии обусловлено появлением двухэтапного мартенситного превращения в условиях генерации реактивных усилий.

Выводы:

- 1 В условиях генерации реактивного момента изменение и реактивного момента, и упруговозвращаемой кривизны происходит в температурных интервалах мартенситного превращения, что обусловлено только мартенситным превращением.

- 2 Впервые показано, что закономерности генерации реактивных моментов и упруговозвращаемой кривизны в межкритическом интервале температур между собой не увязаны.
- 3 Несоответствие изменения реактивного момента и упруговозвращаемой кривизны можно объяснить двухэтапным мартенситным превращением в межкритическом интервале температур $B19 \rightarrow \alpha' \rightarrow B2$ и $B2 \rightarrow \alpha' \rightarrow B19$, причем на первом этапе превращения, когда генерируется α' фаза, обнаруживается неполный эффект псевдоупругости.

Литература

1. *Лихачев В.А., Кузмин С.Л., Каменцева З.П.* Эффект памяти формы. –Л.: Изд. ЛГУ, 1987. 216 с.
2. *Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В.* Никелид титана. Структура и свойства. –М.: Наука. 1993. 160 с.
3. *Калачев И.Б., Дробышев Б.А., Николаев В.А.* Метод и прибор для исследования характеристик пластического и упругого последействия пружинных сплавов //Заводская лаборатория. 1989. № 8. С. 91 – 95.
4. *Николаев В.И., Пульнев С.А., Малыгин Г.Л. и др.* Генерация и релаксация реактивных напряжений в сплаве с эффектом памяти формы Cu-Al-Ni при циклическом изменении температуры в интервале 293 – 800 К //Физика твердого тела. 2008. Т. 50. В. 11. С.2079-2083.
5. *Ильин А.А., Гозенко Н.Н., Скворцов В.И. и др.* Структурные изменения в сплавах на основе никелида титана при деформации и их влияние на характеристики восстановления формы //Изв.вузов.Цветная металлургия.1987.№4. С.88–93.
6. *Федотов С.Г., Матлахова Л.А., Ковнеристый Ю.К. и др.* Структурные изменения в сплаве NiTi с эффектом памяти формы при деформации.//Физика металлов и металлословедение. 1988. Т.65. Вып. 3. С. 564–569.