

**ПРЕВРАЩЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НЕУПРУГИХ МАРТЕНСИТНЫХ
ДЕФОРМАЦИЙ В УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ В НИКЕЛИДЕ ТИТАНА**
**Никелид титанда серпилгисиз мартенситтик деформациялардын серпилгичтүү
деформацияларга өтүшү**
**Transformation of residual martensite inelastic deformations in the elastic
deformation**

Аннотация: в работе рассматривается влияние остаточных мартенситных деформаций на величину генерируемой упругой деформации в условиях генерации и релаксации реактивных усилий. Деформирование произведено кручением. При остаточной мартенситной деформации менее 2% гистерезисные кривые упругих деформаций и реактивных усилий в зависимости от температуры почти аналогичны. Если остаточная мартенситная деформация превышает 2%, то гистерезисные кривые двух величин существенно отличаются друг от друга. Построены термомеханические диаграммы упруговозвращаемых деформаций и реактивных моментов в зависимости от остаточных мартенситных деформаций.

Аннотация: бул жумушта калдыктуу мартенситтик деформациянын, реактивдик күчтөрдү генерациялоо жана релаксациялоо шартында серпилгичтүү деформациянын өсүшүнө тийгизген таасири каралган. Деформациялоону толгоо аркылуу жүргүзүлгөн. Калдыктуу мартенситтик деформация 2% кичине болгондо серпилгичтүү деформациянын жана реактивдик күчтөрдүн температурадан көз карандылыгынын гистерезистик ийри сызыктары бири бирине окшош болушат. Эгерде калдыктуу мартенситтик деформация 2% чоң болсо айтылган чоңдуктардын гистерезистик ийри сызыктары бири биринен чоң айырмаланып калышат. Серпилгичтүү кайтып келүүчү деформациялардын жана реактивдүү күчтөрдүн калдыктуу мартенситтик деформациялардан көз карандылыгынын термомеханикалык диаграммалары тургузулду.

Annotation: the paper deals with the effect of residual deformation martensite on the value generated by the elastic deformation under the conditions of generation and relaxation of reactive forces. The deformation produced by torsion. When martensitic residual deformation of less than 2% elastic deformation hysteresis curves and reactive forces depending on the temperature almost similar. If the residual deformation martensite exceeds 2% of the hysteresis curves of the two values is significantly different from each other. Built thermomechanical diagram elastic return deformation and reactive moments, depending on the residual deformation martensite

Ключевые слова: эффект памяти формы; мартенситная неупругая деформация; остаточная неупругая деформация; реактивные усилия; генерация упругих деформаций.

Негизги сөздөр: калыбын эстөө кубулушу; мартенситтик серпилгисиз деформация; калдыктуу серпилгисиз деформация; реактивдик күчтөр; серпилгичтүү деформациялардын генерацияланышы.

Keywords: shape memory effect; martensitic inelastic deformation; residual inelastic deformation; reactive force; generation of elastic deformations.

Известно, что диаграмма деформирования никелида титана, где формоизменение реализуется механизмом термоупругого мартенситного превращения, существенно отличается от диаграммы деформирования сплавов с дислокационным механизмом формоизменения. В никелиде титана с самого начала нагружения закон Гука не выполняется [4,7], практически отсутствует участок диаграммы с гуковской упругой деформацией. По диаграмме растяжения никелида титана измеренный эффективный модуль нормальной упругости, как правило, меньше, чем модули

упругости, измеренные динамическими методами [8]. Термин «мартенситная неупругость» объединяет явления, наблюдаемые при деформировании сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ)

типа никелида титана, находящихся полностью в мартенситном фазовом состоянии и испытывающих структурные превращения, связанные с изменением степени ориентированности низкосимметричных мартенситных ячеек [4].

Известно [5,7], что возврат неупругих деформаций в предварительно деформированных растяжением стержнях из сплава с эффектом памяти формы при свободном нагреве может составлять 100%, если заданная деформация не превышает около 5%. Такое же поведение обнаруживается в стержнях из сплава с ЭПФ, деформированных изгибом [2]. Однако, для изогнутых стержней степень свободно возвращаемой деформации значительно меньше, чем в растянутых стержнях. Это положение, по-видимому, можно объяснить тем, что в изогнутых стержнях деформация неоднородно распределена по его сечению. Возвращаемая деформация в деформированных сплавах с эффектом памяти формы является основой возникновения реактивных усилий. Возвращаемая деформация в деформированных и заневоленных стержнях при нагреве превращается в упругую деформацию. Природа упругих деформаций, возникающая в стержнях генерируемых реактивных усилий, может быть в основном гуковской, а также мартенситной, сосредоточенной на когерентных (и некогерентных) границах фаз, возникающих при обратных мартенситных превращениях. В работе [3] проведено изучение характера возвращаемых деформаций в условиях генерации реактивных усилий в изогнутых стержнях. В литературе не достаточно изучен характер перехода неупругих деформаций в упругие в условиях генерации реактивных усилий в сплавах с эффектом памяти формы.

Величина генерируемых реактивных усилий, согласно закону Гука, определяется величиной упругих деформаций, получаемых в результате возврата остаточных неупругих деформаций и величиной модулей упругости (E и G).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

$$\tau = G \cdot \gamma.$$

Здесь σ – нормальное напряжение в поперечном сечении стержня, E – нормальный модуль упругости, ε – относительная линейная деформация, τ – касательное напряжение возникающие в поперечном сечении стержня, G – модуль сдвига, γ – угол сдвига цилиндрической поверхности образца.

В температурном интервале прямых и обратных мартенситных превращений модули упругости стержня из сплава с эффектом памяти формы сложным образом зависят от температуры [1,6].

Согласно работе [3], в изогнутых и заневоленных образцах в условиях генерации и релаксации реактивных усилий в температурных интервалах мартенситных превращений, обращения остаточных неупругих деформаций в упругие не коррелируются изменением реактивных усилий. Поэтому в условиях генерации реактивных усилий при каждой температуре в области мартенситного превращения реактивные усилия будут пропорциональны произведению переменных величин $E(T)$ и $\varepsilon(T)$, где $E(T)$ – значение модуля нормальной упругости при температуре T ; $\varepsilon(T)$ – значение упругой деформации, полученное в результате возврата остаточных неупругих деформаций.

При кручении цилиндрического образца выше мартенситного предела текучести его поперечные сечения остаются плоскими. При этом поперечные сечения состоят из двух зон: центральная упруго деформированная и внешняя кольцевая упруго-мартенситно деформированная. При разгрузке во внешней кольцевой упруго-мартенситно деформированной зоне деформация частично возвращается. Поэтому в закрученном образце появляется неравномерно распределенные по сечению упругая деформация и соответственно остаточная напряжения.

Целью данной работы является изучение температурной кинетики перехода неупругой деформации в упругую деформацию в деформированных кручением и жестко заневоленных стержнях из никелида титана.

Материал и метод исследования

Объектом исследования был сплав на основе никелида титана марки ТН-20 в виде проволоки диаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м. Термическая обработка произведена при температуре 550°C в течение 2 часов с последующим охлаждением вместе с электрической печью, отключенной от электросети. При этой температуре в сплаве происходит рекристаллизация [2]. Испытание произведено в специально изготовленной испытательной крутильной установке с возможностью измерения угла поворота φ одного конца образца относительно неподвижного другого конца, а также измерением крутящего момента M , действующего на образец. Длина рабочей части стержня составляла $l = 0,047$ м. Испытание проводилось в термокамере с возможностью нагрева остаточного деформированного и защемленного образца от комнатной температуры до 160°C и охлаждением

в естественных условиях до комнатной температуры. Нагрев термокамеры осуществляется маломощным воздушным ТЭНом.

Расчет касательных напряжений выполняют в приближении линейно упругого тела по формуле:

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3},$$

где P – сила, показание динамометра создающего крутящий момент; D – диаметр шкива; d – диаметр рабочей части испытуемого образца.

Сдвиговую деформацию γ относят к наружной поверхности цилиндрического образца и определяют по формуле:

$$\gamma = \frac{d}{2l} \varphi \cdot 100\%$$

где φ – угол закручивания стержня в радианах; l – длина рабочей части стержня.

Остаточная деформация измерена после разгрузки стержня через каждый $3 \div 5^\circ\text{C}$ нагрева или охлаждения, далее нагружено до остаточной деформации и фиксирован крутящий момент. Упругая деформация вычисляется как разность остаточной деформации в мартенситном состоянии и остаточной деформации при температуре в условиях генерации реактивных усилий.

Погрешность в определении угла закручивания составляет $0,017$ рад. В неизотермических испытаниях температуру изменяли со скоростью $0,083^\circ\text{C}/\text{с}$.

Результаты эксперимента

На рис. 1,а на одной диаграмме приведены кривые генерации и релаксации упругих деформаций $\gamma_{\text{ув}} - T$ (кривая 1) и генерации и релаксации реактивных моментов $M_R - T$ (кривая 2) закрученного до остаточной деформации $\gamma_{\text{ост}} = 1,3\%$ образца. Стрелки на диаграмме показывают направление изменения измеряемых величин с температурой. При нагреве заневоленного образца генерация упругих деформаций и реактивных моментов начинается при температуре 45°C , эту температуру принимаем как температуру A_n – начала обратного мартенситного превращения мартенсит – аустенит. Завершения обратного мартенситного превращения происходит при температуре $A_k = 110^\circ\text{C}$. Однако, следует отметить, что здесь температура A_k взята по кривой реактивных моментов. А кривая упругих деформаций стабилизируется на 6°C раньше, чем кривая реактивных усилий. Между температурами A_n и A_k кривая генерации упругих деформаций (1) и реактивных моментов (2) состоят из двух участков, ограниченных прямыми пунктирными линиями $A_n T_1$ и $T_1 A_k$. С большой скоростью накапливаются и упругая деформация, и реактивные моменты на температурном участке $A_n T_1$. На температурном участке $T_1 A_k$ с ростом температуры скорость роста и упругих деформаций, и реактивных моментов замедляются. На стадии охлаждения с температуры A_k до температуры, соответствующей вертикальной пунктирной линии M_n , значения упругой деформации и реактивных моментов в образце не изменяются. Температуру M_n считаем температурой начала прямого мартенситного превращения. Прямое мартенситное превращение завершается при температуре $M_k = 26^\circ\text{C}$. В температурном интервале $M_n M_k$ генерированные на стадии нагрева упругая деформация и реактивные моменты полностью срелаксируются. Все температурные характеристики стабильно повторяются и в других образцах с остаточными сдвиговыми деформациями, не превышающими 2%.

На рис. 1в показаны изменения упругих деформаций (кривая 1) и реактивных моментов (кривая 2) у образца с остаточной сдвиговой мартенситной деформацией $\gamma_{ост}=5,7\%$ при нагреве от

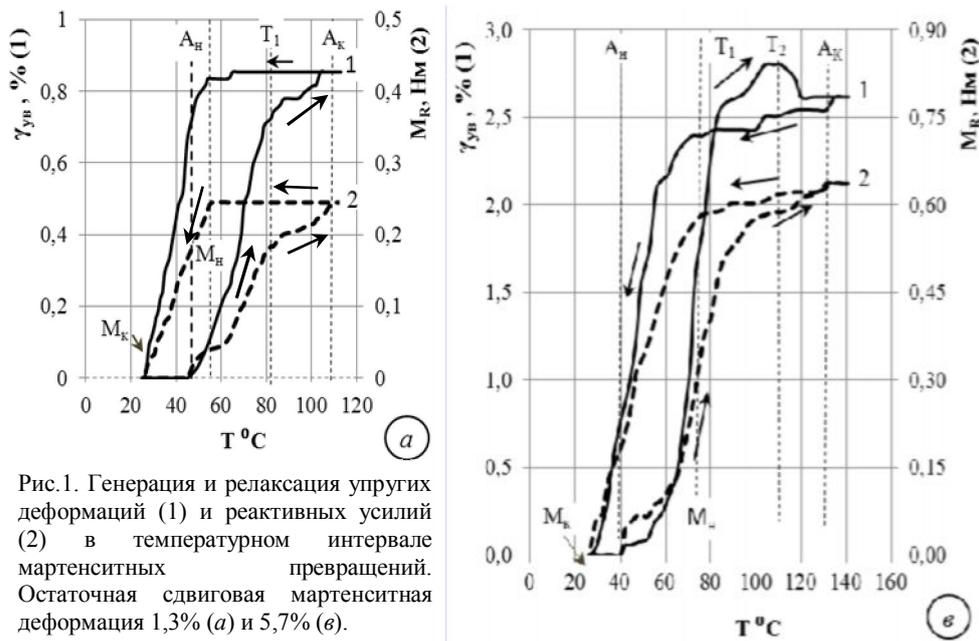


Рис.1. Генерация и релаксация упругих деформаций (1) и реактивных усилий (2) в температурном интервале мартенситных превращений. Остаточная сдвиговая мартенситная деформация 1,3% (а) и 5,7% (б).

комнатной до выше A_k и охлаждении до комнатной температуры. Здесь гистерезисная петля для генерации и релаксации упругих деформаций трансформируется в форму «восьмерки», то есть в температурном интервале обратного мартенситного превращения $\gamma_{ув}$ изменяется экстремально, достигая максимального значения при температуре T_2 . Далее, не смотря на монотонный рост реактивного

момента M_R , упругая деформация начинает падать до температуры A_k . Выше температуры A_k величина упругой деформации стабилизируется, хотя её величина меньше, чем максимальное значение упругой деформации при температуре T_2 более чем на 7%. После такого сложного экстремального изменения упругой деформации определенный по кривым реактивного момента M_R и упругой деформации $\gamma_{ув}$ температуры A_k для обеих кривых получаются одинаковыми. Температурный интервал $A_n A_k$ состоит из трех участков. На температурном участке $A_n T_1$ и упругая деформация, и реактивный момент медленно поднимаются. На участке $T_1 T_2$ эти величины развиваются интенсивно, далее в интервале температуры $T_2 A_k$ реактивный момент монотонно растет, а упругая деформация падает. На стадии охлаждения релаксация изучаемых величин ($\gamma_{ув}$, M_R) начинается с температуры A_k с малой температурной скоростью и продолжается до температуры M_n . Начиная с температуры M_n до температуры M_k релаксационные процессы величин идут интенсивно.

На рис. 2 представлены зависимости упруговозвращаемых сдвиговых деформаций $\gamma_{ув}$ от остаточных неупругих сдвиговых деформаций $\gamma_{ост}$ (кривая 1) и для сравнения $\gamma_{ост}$ от $\gamma_{ост}$ (кривая 2).

Величины упругих деформаций даже в начале диаграммы меньше остаточных деформаций. Кривая максимальных упругих деформаций монотонно растет до остаточной деформации 4%, при этом максимальная упругая деформация составляет ~3%. Далее, с ростом остаточных деформаций выше 4% до остаточных сдвиговых деформаций 8,5 %, максимальная упругая деформация остается на уровне ~3%.

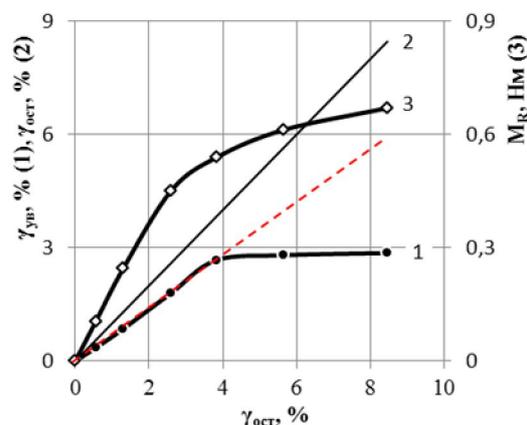


Рис.2. Зависимости максимальных упругих деформаций ($\gamma_{ув}$) при температуре A_k в зависимости от остаточных деформаций (1), для сравнения приведено величины остаточных деформаций (2). Кривая 3 отражает изменение реактивных моментов M_R в зависимости от остаточных деформаций.

На рис. 2 кривая 3 представляет собой итоговый график зависимости максимально го значения

реактивных моментов от остаточных сдвиговых деформаций $\gamma_{ост}$ (термомеханическая диаграмма). С ростом остаточных сдвиговых деформаций увеличивается реактивный момент, генерируемый деформированным образцом. До остаточной деформации около 3 % генерируемый момент увеличивается почти линейно, выше этого предела интенсивность роста реактивного момента уменьшается.

Обсуждение результатов

Экстремальное изменение упругих деформаций при обратном мартенситном превращении в заневоленных образцах наблюдается и в изогнутых [3], и в закрученных образцах (рис 1,в), поэтому такое поведение является закономерностью. Ожидаем, что такое же экстремальное изменение упругих деформаций в условиях генерации реактивных усилий будет обнаружено и на образцах, остаточно растянутых и заневоленных.

В изогнутых и заневоленных образцах [3] температурные границы участков гистерезисных кривых $\kappa_{ув}-T$ и M_R-T не согласованы между собой. В изогнутых образцах сечение состоит из трех зон: упруго-деформированная, упруго – мартенситно деформированная растяжением и упруго – мартенситно деформированная сжатием. Здесь $\kappa_{ув}$ – упруго возвращаемая кривизна изогнутого образца, M_R – реактивная усилия, генерируемая изогнутым образцом, T – температура. Согласно [4,6], при сжатии образца предел мартенситной текучести выше, а на диаграмме σ - ϵ , на участке выше

предела мартенситной текучести, коэффициент деформационного упрочнения больше, чем аналогичные характеристики растянутых образцов. Поэтому в изогнутых образцах в поперечном сечении сжатая зона имеет более высокие механические характеристики, чем зона растяжения. Поэтому обнаруженная в работе [3] несогласованность границы температурных интервалов объясняется несимметричностью напряженно – деформированного состояния зон сжатия и растяжения.

Для закрученных и заневоленных образцов границы температурных участков между собой согласованы (рис.1). Это можно объяснить следующим образом. В отличие от изогнутых образцов в поперечных сечениях закрученных образцов радиальный градиент деформации однородный. Поэтому в поведении этих двух видов испытания в условиях генерация и релаксация реактивных усилий наблюдается существенное отличие.

Появление экстремальной точки в кривой $\gamma_{ув} - T$ на рис 1в объясняется следующим образом. На закрученных (и изогнутых) образцах при температуре T_1 , под действием генерированных высоких реактивных усилий, наряду с обратным мартенситным превращением, начинается пластическая деформация, вызывающая релаксацию упругих деформаций. Продолжение слабого роста реактивных усилий, по - видимому, обусловлено, с одной стороны, тем, что в интервале температуры $T_2 A_k$ интенсивно увеличивается модуль упругости $E(T)$, с другой стороны, - деформационным упрочнением матрицы в результате увеличения плотности дислокаций. С увеличением степени остаточных деформаций величина упругих деформаций при температуре A_k не увеличивается, а держится на уровне $\sim 3\%$ (см рис. 2, кривая 1). Разница $\gamma_{ост} - \gamma_{ув}$ дает величину пластических деформаций под действием генерированных реактивных усилий.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Экстремальное изменение упругих деформаций в условиях развития реактивных усилий является закономерным.
2. Экстремальное изменение упругих деформаций обусловлено развитием пластических деформаций под действием реактивных усилий.
3. Несогласованное изменение гистерезисных кривых $\kappa_{ув}-T$ и $M_R -T$ для изогнутых образцов обусловлено ассимметричностью распределения напряженно – деформированного состояния в поперечных сечениях. Тогда как в закрученных образцах гистерезисные кривые $\gamma_{ув}-T$ и $M_R - T$ имеют согласованные формы из-за симметричности напряженно–деформированного состояния сечения.

Литература

1. Андронов И.Н., Богданов Н.А. и др. /Вестник Тамбовского Государственного Университета. Т. 18. В. 4. 2013. С. 2067-2068.
2. Ибрагимов Р.Ш. //Сборник материалов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань. 20 – 24 августа 2015 года. С. 1535-1537.
3. Ибрагимов Р.Ш. /Вестник Тамбовского государственного университета. Т.18. В.4. 2013. С. 2027-2028.

4. Казарина С.А., Мовчан А.А., Сильченко А.Л. /Сборник материалов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань. 20 – 24 августа 2015 года. С. 1671-1673.
5. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. –Л., изд ЛГУ.1987. 216 с.
6. Материалы с эффектом памяти формы: справочные издания. /под ред. В.А. Лихачева. СПб. Изд. НИИХ, 1997-1998.
7. Паскаль Ю.И., Ерофеев В.Я., Монасевич Л.А. и др. //Изв. вузов, Физика, 1982, № 6, с. 103 -117.
8. Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В. Никелид титана. Структура и свойства. – М. 1992. - 160 с.