

УДК 539.4

## ДИАГРАММЫ МАРТЕНСИТНОЙ НЕУПРУГОСТИ НИКЕЛИДА ТИТАНА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ, СЖАТИИ И СЖАТИИ ПОСЛЕ РАСТЯЖЕНИЯ<sup>1</sup>

Мовчан А.А., Казарина С.А., Сильченко А.Л.

*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

### РЕЗЮМЕ

Проведены эксперименты по одноосному растяжению и одноосному сжатию образцов круглого поперечного сечения из никелида титана, находящегося в полностью мартенситном фазовом состоянии, а также испытания на одноосное сжатие образцов, материал которых был подвергнут предварительному растяжению до различных степеней деформации. Результаты испытаний на растяжение сравниваются с аналогичными данными для образцов из плющинки (материал тот же). Исследованы вопросы о форме диаграмм растяжения и сжатия и влиянии величины предварительной деформации растяжения на форму диаграммы последующего сжатия, что важно для описания изотропного и трансляционного упрочнения сплава с памятью формы.

**Ключевые слова:** сплавы с памятью формы; мартенситная неупругость; одноосное растяжение; одноосное сжатие; сжатие после растяжения; эксперимент

## NITINOL'S MARTENSITE INELASTICITY DIAGRAMM FOR TENSION, COMPRESSION AND TENSION AFTER COMPRESSION

Movchan A.A., Kazarina S.A., Sil'chenko A.L.

*Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

### SUMMARY

Uniaxial tension and uniaxial compression experiments have been carried for specimens of circular cross-section from the Nitinol that is located in a fully martensitic phase state, and uniaxial compression tests on samples of the material which has been subjected to pre-stretch up to different degrees of deformation. The results of the tensile tests are compared with similar data for samples from flatten wire (the same material). Investigated the questions of the tension and compression diagrams and influence of the value of the preliminary tensile strain on a chart form subsequent compression diagram, which is important to describe the isotropic and kinematic hardening shape memory alloy.

**Key words:** shape memory alloys; martensite inelasticity; uniaxial tension; uniaxial compression; compression after tension; experiment

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовом содействии РФФИ, проект № 14-01-00189.

## ВВЕДЕНИЕ

Термин "мартенситная неупругость" объединяет явления, наблюдаемые при деформировании сплавов с памятью формы (СПФ) типа никелида титана, находящихся в полностью мартенситном фазовом состоянии и испытывающих структурные превращения, связанные с изменением степени ориентированности низкосимметричных мартенситных ячеек. Часто для описания этих явлений используют аналоги теории пластического течения [1-7]. Однако деформационные эффекты фазовых и структурных превращений в СПФ обладают рядом особенностей, отличающих явления мартенситной неупругости от обычной дислокационной пластичности [5,8,9]. Соответствующие экспериментальные данные изложены в большом количестве публикаций (см. справочное издание [10,11]). Тем не менее, ряд вопросов, связанных с описанием процессов деформирования СПФ в режиме мартенситной неупругости в рамках аналогов теории пластического течения, до сих пор не имеют однозначных и общепризнанных ответов. Так, не понятно, чему равно начальное значение радиуса поверхности нагружения СПФ в состоянии хаотического (полностью сдвойникового) мартенсита; каков характер деформационного упрочнения СПФ (изотропное, трансляционное, комбинированное); от каких инвариантов тензора напряжений зависит уравнение поверхности нагружения СПФ, деформируемого в режиме мартенситной неупругости.

В данной работе описаны результаты экспериментальных исследований процесса изотермического деформирования образцов из никелида титана в режиме мартенситной неупругости при одноосном растяжении, одноосном сжатии и одноосном сжатии после одноосного растяжения, позволяющие дать ответ на сформулированные вопросы.

### 1. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты по монотонному нагружению и разгрузке в жестком режиме с заданной скоростью движения активного захвата проводились на испытательной машине А1 – 7000М фирмы GOTECH. Испытывались образцы, рабочая часть которых имела круглое поперечное сечение с диаметром 4 мм и 8 мм. Образцы диаметром рабочей части 4 мм изготавливались из никелида титана марки ТН-1, (горячекованный пруток), поставщик ЗАО "Промышленный центр МАТЭКС", состав: Ni - 55.08% (вес.), Ti - баланс, температура окончания обратного превращения на прутке диаметром 8 мм после отжига при  $T = 500^{\circ}C$ , 30 мин. с закалкой в воду  $A_f = 67^{\circ}C$ .

Образцы диаметром рабочей части 8 мм изготавливались из никелида титана марки ТН-1 (пруток шлифованный термообработанный), поставщик ООО "Промышленный центр МАТЭК-СПФ", состав: Ni 54.95% (вес.), Ti - баланс,  $A_f = 98^{\circ}C$  после отжига при  $T = 500^{\circ}C$ , 30 мин., закалка в воду. Длина рабочей части образцов составляла от 60 мм до 200 мм. Опыты проводились при комнатной температуре, когда материал образцов находился в полностью мартенситном фазовом состоянии. Этот факт подтверждался тем обстоятельством, что выдержка образца перед испытанием в жидком азоте не меняла результатов эксперимента. Рост напряжений в процессе испытаний,

повышающий температуру фазового перехода не мог привести к обратному превращению.

## 2. РАСТЯЖЕНИЕ В РЕЖИМЕ МАРТЕНСИТНОЙ НЕУПРУГОСТИ

Типичные примеры двух диаграмм растяжения и разгрузки, соответствующих испытаниям образцов с диаметром рабочей части  $d = 8$  мм и скоростью движения активного захвата 1 мм/мин. приведены на рис.1. Диаграмма 1 соответствует испытанию в состоянии поставки без дополнительного отжига, кривая 2 – отжигу при  $T = 450^{\circ}\text{C}$  в течении 30 мин. с последующим охлаждением вместе с печью и выдержкой непосредственно перед испытанием в морозильной камере для гарантированного перевода в полностью мартенситное состояние. Кривая 2 демонстрирует характерные признаки диаграммы мартенситной неупругости при растяжении никелида титана – наличие достаточно протяженного горизонтального плато со следами неустойчивого деформирования. Для нагружения в состоянии поставки по сравнению с отожженным состоянием растет напряжение перехода к интенсивному неупругому деформированию, плато из горизонтального становится наклонным с заметным упрочнением, напряжение, соответствующее той же деформации существенно выше.

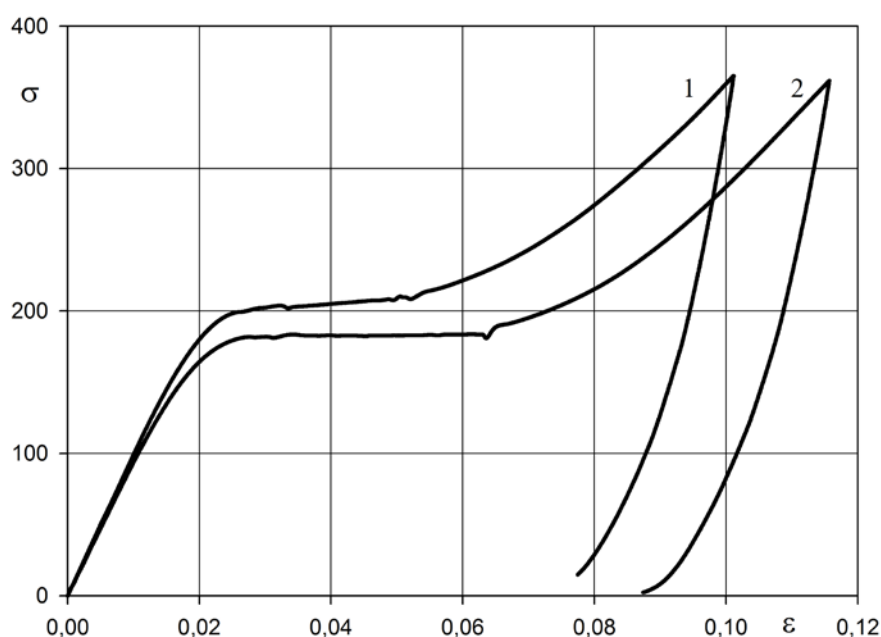


Рис.1.

На рис.2 приведены диаграммы нагружения и разгрузки образцов с диаметром рабочей части  $d = 4$  мм для различных температур отжига. Кривая 1 соответствует отжигу при  $T = 400^{\circ}\text{C}$  в течение 60 мин., кривая 2 – отжиг при  $T = 600^{\circ}\text{C}$  в течении 30 мин., кривая 3 – отжиг при  $T = 800^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин. При повышении температуры отжига с  $400^{\circ}\text{C}$  до  $600^{\circ}\text{C}$  происходит переход от наклонного к горизонтальному плато на диаграмме растяжения. Дальнейший рост температуры отжига до  $800^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению длины горизонтального плато и усилению неустойчивости процесса деформирования на этом плато.

Все три диаграммы, приведенные на рис.3, получены при испытаниях образцов с диаметром рабочей части  $d = 4$  мм, отожженных при  $800^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин. Скорость движения активного захвата – 1 мм/мин. Диаграмма 1 построена для образца, который после отжига был подвергнут закалке в воду комнатной температуры. Кривая 2 соответствует образцу, который после отжига был охлажден вместе с печью до комнатной температуры, после чего помещен в жидкий азот для гарантированного перехода в полностью мартенситное состояние. Диаграмма 3 соответствует образцу, испытанному сразу после отжига и охлаждения вместе с печью до комнатной температуры.

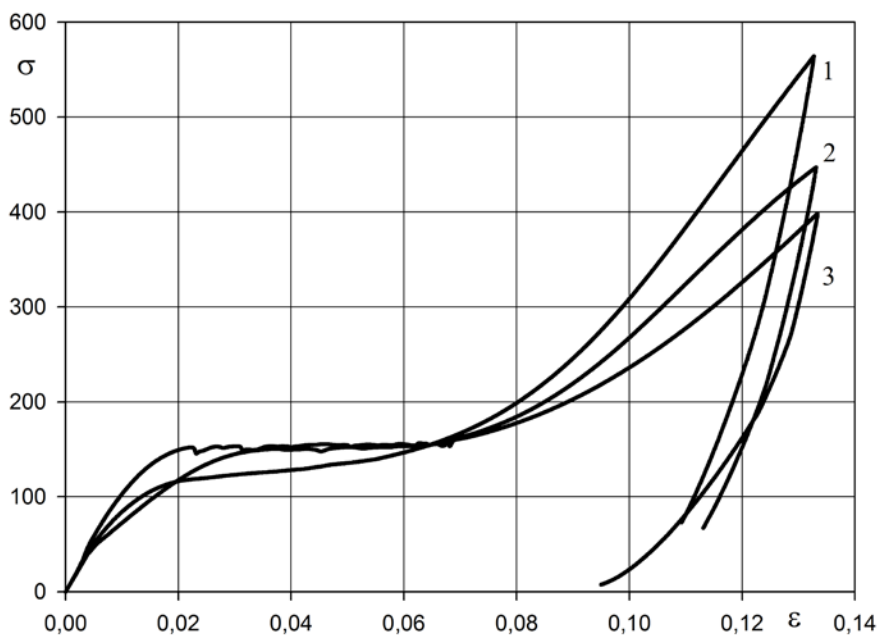


Рис.2.

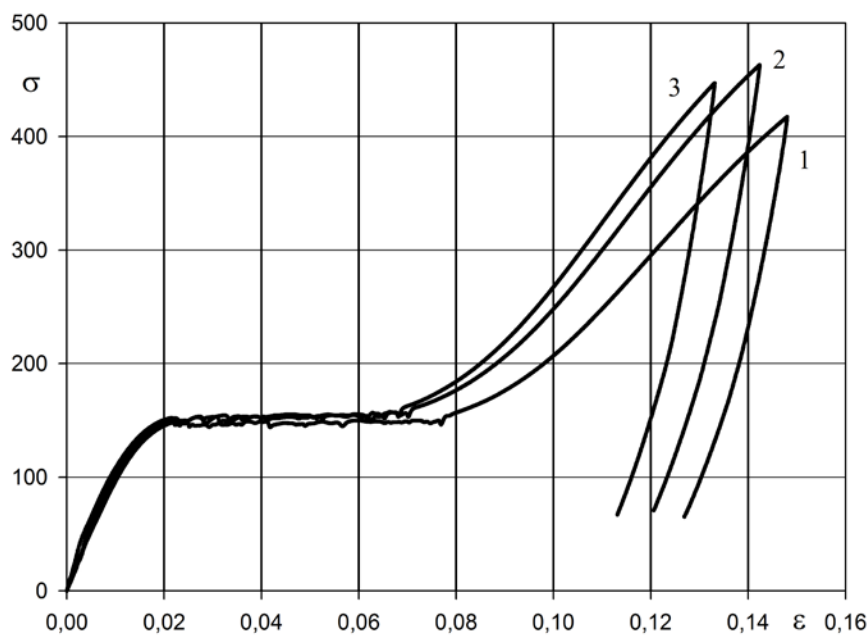


Рис.3.

Согласно рис.3, закалка приводит к небольшому уменьшению величины напряжения, соответствующего плато диаграммы нагружения и некоторому

увеличению длины этого плато. В то же время, выдержка в жидком азоте перед испытанием меняет диаграмму нагружения незначительно. Сравнение рис.1 и рис.3 показывает, что отжиг при более высокой температуре способствует усилению неустойчивости процесса деформирования на плато диаграммы.

На рис.4 приведены диаграммы деформирования образцов с диаметром рабочей части 4 мм, отожженных при  $400^{\circ}\text{C}$  в течении 30 мин. с последующим охлаждением вместе с печью. Диаграмма 1 получена при скорости движения активного захвата  $V = 1$  мм/мин., диаграмма 2 –  $V = 10$  мм/мин., диаграмма 3 –  $V = 50$  мм/мин.

Согласно рис.4 форма диаграммы растяжения TiNi зависит от скорости нагружения. Таким образом, подтвержден вывод о скоростной чувствительности никелида титана, нагружаемого в режиме мартенситной неупругости, ранее полученный на образцах другого типа (из плющинки) с другой формой диаграммы растяжения, не содержащей горизонтального плато [12]. В рассматриваемом случае образцов с круглым поперечным сечением рабочей части при переходе от  $V = 50$  мм/мин. к  $V = 10$  мм/мин. длина плато на диаграмме удлиняется при незначительном снижении его высоты. В результате на участке упрочнения после плато меньшей скорости деформирования соответствует большая величина деформации при том же напряжении. Интересно отметить, что при дальнейшем уменьшении скорости в 10 раз (переход от  $V = 10$  мм/мин. к  $V = 1$  мм/мин.) форма диаграммы нагружения меняется незначительно.

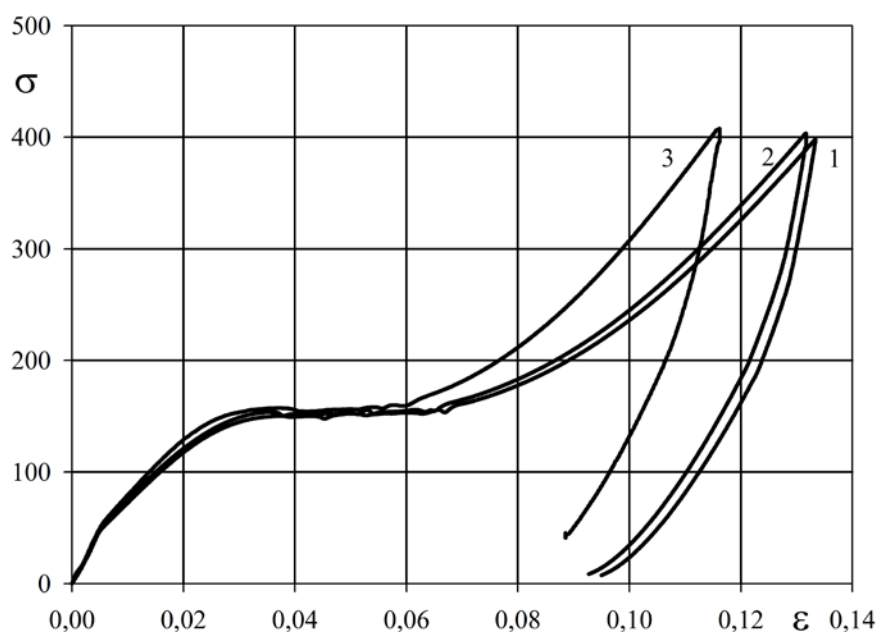


Рис.4.

Обращают на себя внимание следующие важные для дальнейшего исследования: общие черты полученных диаграмм растяжения. Разгрузка является линейной лишь на некотором отрезке соответствующей диаграммы, длиной порядка 100 МПа, непосредственно примыкающим к точке начала падения напряжений. Дальнейшее падение напряжений за пределами этого отрезка приводит к небольшому нелинейному возврату деформаций, существенно усиливающемуся при приближении напряжений к нулевому значению (явление

псевдоупругости, возврата некоторой части структурных деформаций при разгрузке после нагружения в режиме мартенситной неупругости).

Наблюдающееся в СПФ явление псевдоупругости затрудняет ответ на вопрос о размере поверхности нагружения, соответствующей точке максимального напряжения. В частности, получается, что начало координат пространства девиатора напряжений может находиться за пределами поверхности нагружения. В этом случае может быть нарушено неравенство  $\sigma'_{ij} d\varepsilon_{ij}^{st} \geq 0$ , которое используется в [9,13] для доказательства термодинамической состоятельности системы определяющих соотношений модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях [14,15].

Модуль разгрузки, определяемый методом наименьших квадратов по данным на упомянутом выше отрезке, близок к значению  $E = 28000$  МПа, характерному для мартенситного состояния никелида титана [16]. В то же время, попытки определять значение упругого модуля по начальному участку диаграммы нагружения к успеху не приводят. Дело в том, что даже если использовать достаточно малые участки, ограниченные сверху значениями 30 МПа – 40 МПа, то методом наименьших квадратов получаются весьма низкие значения упругого модуля, в 2.5–3 раза меньшие, чем найденные по линии разгрузки. Этот факт иллюстрируется в табл.1, где приведены значения модулей Юнга, получаемые по начальной части диаграммы разгрузки ( $E_2$ ) и начальной части диаграммы нагружения ( $E_1$ ) для образцов диаметром 4 мм с температурами отжига  $400^\circ C$  и  $800^\circ C$ .

Таблица 1.

№ образца	Диаметр (мм)	Отжиг	$E_1$ (МПа)	$E_2$ (МПа)
1	4	$400^\circ C$	10510	28920
2	4	$400^\circ C$	11160	29840
3	4	$400^\circ C$	10260	28910
4	4	$800^\circ C$	11870	26515
5	4	$800^\circ C$	15190	28450
6	4	$800^\circ C$	10400	26053

Аналогичные данные получены для других температур отжига и образцов диаметром  $d = 8$  мм.

Такие же проблемы, связанные с определением упругого модуля СПФ в мартенситном фазовом состоянии по начальному участку диаграммы мартенситной неупругости, описаны в [17-19]. Установлено, что значение текущего модуля для начального участка диаграммы нагружения чрезвычайно мало и зависит от длины этого участка. Кроме того, величина этого модуля существенно меняется при изменении температуры отжига, что не характерно для модуля Юнга.

Эти данные наталкивают на мысль о том, что при изотермическом монотонном нагружении никелида титана возрастающим напряжением из состояния хаотического мартенсита неупругие (структурные) деформации развиваются с самого начала процесса нагружения. Начальное значение радиуса поверхности нагружения хаотического мартенсита равно нулю. В процессе нагружения этот радиус возрастает от нулевого значения с ростом неупругих деформаций, поскольку линии разгрузки имеют начальные прямолинейные

участки. Такое поведение не может быть описано в рамках аналогов теории пластического течения с чисто трансляционным упрочнением, поскольку в рамках таких моделей радиус поверхности нагружения не меняется и, значит, все время равен нулю.

### 3. ДИАГРАММЫ СЖАТИЯ В РЕЖИМЕ МАРТЕНСИТНОЙ НЕУПРУГОСТИ

Диаграммы сжатия и растяжения СПФ в режиме мартенситной неупругости существенно различаются. Этот факт иллюстрируется рис.5, где номером 1 обозначена диаграмма сжатия, а номером 2 - диаграмма растяжения. Как видно, начальные участки диаграмм 1 и 2 близки между собой, так же как и значения модулей разгрузки. Однако дальнейший ход кривых нагружения существенно различается. На диаграмме сжатия отсутствует плато, деформации при сжатии, соответствующие тем же значениям модуля напряжений, более высокими, чем напряжения плато, существенно ниже, чем деформации растяжения. На диаграммах сжатия отсутствуют следы неустойчивого деформирования. Таким образом, никелид титана по отношению к явлению мартенситной неупругости является разносопротивляющимся (но не разномодульным) материалом [20,21]. Аналогичные данные для СПФ приведены в [22,23].

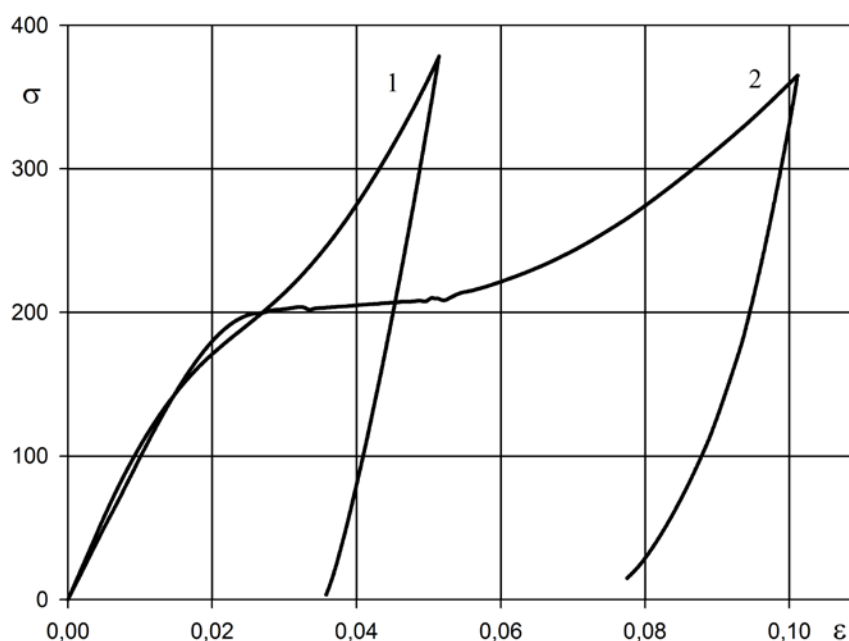


Рис.5.

Деформация мартенситной неупругости отсчитывается не от аустенитного состояния, а от состояния хаотического мартенсита, уже включающего в себя объемный эффект реакции прямого мартенситного превращения. Поэтому деформация мартенситной неупругости не содержит объемной компоненты и сводится к формоизменению. Известны два подхода к описанию разносопротивляемости СПФ. Согласно первому из них учитывается влияние на процесс деформирования, помимо интенсивности напряжений еще и первого инварианта тензора напряжений [3,24]. Согласно второму подходу к интенсивности напряжений добавляется третий инвариант девиатора

напряжений [25]. Учитывая несжимаемость деформаций мартенситной неупругости, предпочтение следует отдать второму из этих подходов.

#### 4. ОПЫТЫ ПО СЖАТИЮ ПОСЛЕ РАСТЯЖЕНИЯ

Предварительно отожженные при  $T = 450^{\circ}\text{C}$  4 образца из никелида титана диаметром 4 мм были испытаны на растяжение со скоростью движения активного захвата 1 мм/мин. до различных значений полной деформации. После этого из рабочей части испытанных образцов вырезались образцы цилиндрической формы для испытаний на сжатие в режиме мартенситной неупругости. Полученные в процессе этих испытаний диаграммы приведены на рис.6. Диаграмма 1 соответствует предварительному растяжению до  $\varepsilon = 7.2\%$ , диаграмма 2 –  $\varepsilon = 4.1\%$ , диаграмма 3 –  $\varepsilon = 2\%$ . Начало координат на рис.6 соответствует для каждого из образцов точке разгрузки после предварительного растяжения. Кривая 4 на рис.6 представляет собой часть диаграммы сжатия, полученная на образце, не подвергнутому предварительному растяжению и приведена для сравнения.

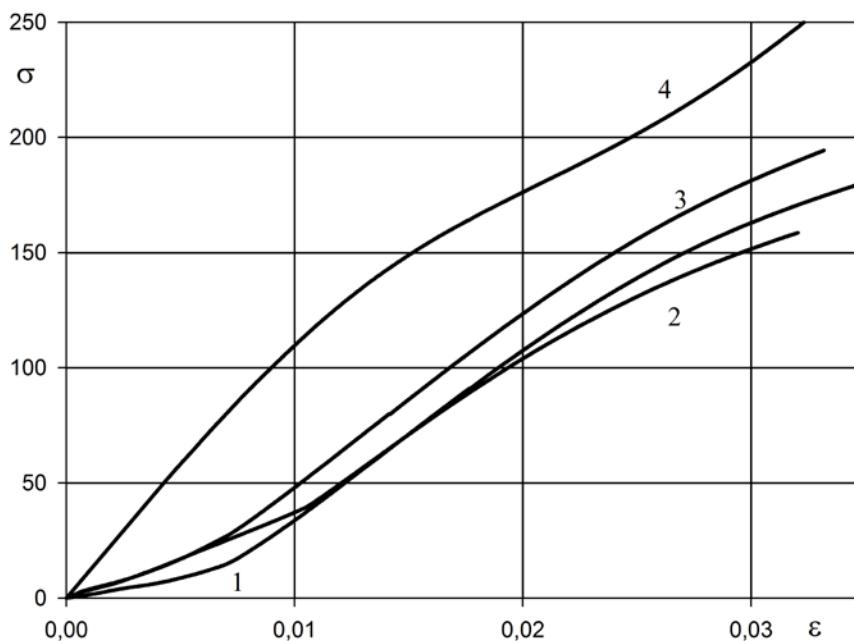


Рис.6.

Как следует из рис.6, предварительное растяжение существенно изменяет диаграмму последующего сжатия. Чем больше деформация предварительного растяжения, тем меньшее упрочнение испытывает СПФ в начальный период последующего сжатия. Таким образом, сразу после окончания разгрузки после предварительного растяжения и перехода напряжения через нулевое значение, происходит интенсивное неупругое деформирование сжатием. Следовательно, для никелида титана характерен ярко выраженный эффект Баушингера. Поэтому описывать поведение СПФ в рамках аналога теории пластического течения с изотропным упрочнением не следует. Процесс упрочнения должен иметь трансляционную составляющую.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы, касающиеся возможности описывать процесс деформирования СПФ в режиме мартенситной неупругости в рамках аналогов теории пластического течения:

1. В рамках такого аналога материал должен иметь нулевой начальный "предел текучести".

2. Должны использоваться аналоги, обладающие комбинированным (как изотропным, так и трансляционным) упрочнением.

3. У СПФ типа никелида титана ярко выражено свойство "разносопротивляемости", но не "разномодульности". Диаграммы растяжения и сжатия существенно различаются как в количественном, так и в качественном отношении. На диаграммах сжатия тем же напряжениям соответствуют существенно меньшие деформации, чем на диаграммах растяжения. На диаграммах сжатия отсутствует горизонтальное, или почти горизонтальное "плато" и нет следов пластической неустойчивости, характерных для диаграмм растяжения. Для описания эффекта разносопротивляемости СПФ при деформировании в режиме мартенситной неупругости следует учитывать зависимость поверхности нагружения от третьего инварианта девиатора напряжений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Bertram A.* Thermo-mechanical constitutive equations for the description of shape memory effect in alloys // *Nuclear Engng. And Des.* – 1982. – Vol.74. – N2. – P.173-182.
2. *Волков А.Е., Лихачев В.А., Разов А.И.* Механика пластичности материалов с фазовыми превращениями // *Вестн. ЛГУ.* – 1984. – №19. – Вып.4. – С.30-37.
3. *Lubliner J., Auricchio F.* Generalized plasticity and shape memory alloys // *Intern. J. of Solids and Structures.* – 1996. – Vol.33. – N7. – P.991-1003.
4. *Savi M.A., Paiva A., Baeta-Neves A.P., Pacheco P.M.C.L.* Phenomenological modeling and numerical simulation of shape memory alloys: A thermo-plastic-phase transformation coupled model // *J. of Int. Material Systems and Structures.* – 2002. – Vol.13. – N5. – P.261-273.
5. *Мовчан А.А., Казарина С.А., Тант Зин Аунг* Аналог теории пластичности для описания деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях // *Деформация и разрушение материалов.* – 2009. – №9. – С.2-6.
6. *Saleeb A.F., Pabudala S.A., Kumar A.* A multi-axial, multi-mechanism based constitutive model for the comprehensive representation of the evolutionary response of SMA's under general thermomechanical loading condition // *Int. J. Plasticity.* – 2011. – Vol.27. – N5. – P.655-687.
7. *Arghavani J., Auricchio F., Naghdabadi R.* A finite strain kinematic hardening constitutive model based on Hencky strain: general framework, solution algorithm and application to shape memory alloys // *Int. J. Plasticity.* – 2011. – Vol.27. – N6. – P.940-961.
8. *Мишустин И.В., Мовчан А.А.* Моделирование фазовых и структурных превращений в сплавах с памятью формы, происходящих под действием немонотонно меняющихся напряжений // *Известия РАН. Механика твердого тела.* – 2014. – №1. – С.37-53.

9. *Мовчан А.А., Казарина С.А.* Материалы с памятью формы как объект механики деформируемого твердого тела: экспериментальные исследования, определяющие соотношения, решение краевых задач // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т.15. – №1. – С.105-116.
10. Материалы с эффектом памяти формы: Справ. изд. / Под. ред. Лихачева В.А. – СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998. – Т.1. – с.
11. Материалы с эффектом памяти формы: Справ. изд. / Под. ред. Лихачева В.А. – СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998. – Т.2. – 374 с.
12. *Мовчан А.А., Казарина С.А., Тант Зин Аунг* Реономные свойства сплавов с памятью формы, проявляемые в опытах на мартенситную неупругость и сверхупругость // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т.16. – №3. – С.305-311.
13. *Мовчан А.А., Казарина С.А., Мишустин И.В., Мовчан И.А.* Термодинамическое обоснование модели нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях // Деформации и разрушение материалов. – 2009. – №8. – С.2-9.
14. *Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г.* Микромеханическая модель нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях // Изв. РАН. МТТ. – 2010. – №3. – С.118-130.
15. *Мовчан А.А., Сильченко Л.Г., Сильченко Т.Л.* Учет явления мартенситной неупругости при обратном фазовом превращении в сплавах с памятью формы // Изв. РАН. МТТ. – 2011. – №2. – С.44-56.
16. *Хачин В.Н., Гюнтер В.Э., Монасевич Л.А., Паскаль Ю.И.* Обратимые изменения формы при мартенситных превращениях // Изв. Вузов. Физика. – 1977. – №5 – С.95-101.
17. *Liu Y., Xiang H.* Apparent modulus of elasticity of near-equiatomic NiTi // J. Alloys and Compounds. – 1998. – Vol.270. – P.154-159.
18. *Абдрахманов С.А., Дюшкеев К.Д.* О закономерностях поведения сплавов с памятью формы при термосиловом воздействии. – Бишкек: «Илим», 1992. – 50 с.
19. *Liu Y., Van Humbeeck J., Stalmans R., Delaey L.* Some aspects of the properties of TiNi shape memory alloy // J. Alloys and Compounds. – 1997. – Vol.247. – P.115-121.
20. *Ломакин Е.В.* Механика сред с зависящими от вида напряженного состояния свойствами // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т.10. – №5. – С.41-52.
21. *Lomakin E.V.* Constitutive models of mechanical behavior of media with stress state dependent material properties // Adv. Structur. Materials. – 2011. – Vol.7. – P.339-350.
22. *Liu Y., Xie Z., Van Humbeeck J., Delaey L.* Asymmetry of stress-strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys // Acta Mater. – 1998. – Vol.46. – N12. – P.4325-4338.
23. *Gall K., Sehitoglu H., Chumlyakov Y.I., Kireeva I.V.* Tension - compression asymetry of the stress - strain response in aged single crystal and polycrystalline NiTi // Acta Mater. – 1999. – Vol.47. – N4. – P.1203-1217.
24. *Olsen J.S., Zhang Z.L., Hals J.K., Lu H.* Effect of notches on the behavior of superelastic round-bar spesimens // Smart Material and Structure. – 2011. – Vol.20. – P.1-12.

25. *Lexcellent C., Boubakar M.L., Bouvet C., Calloch S.* About modelling the shape memory alloy behavior based on the phase transformation surface identification under proportional loading and anisothermal condition // Intern. J. of Solids and Structures. – 2006. – Vol.43. – P.613-626.

*Поступила в редакцию 25 сентября 2014 года.*

---

Сведения об авторах:

Мовчан Андрей Александрович, д.ф.-м.н., проф., гл.н.с. ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия, e-mail: [movchan47@mail.ru](mailto:movchan47@mail.ru)

Казарина Светлана Александровна, к.т.н., с.н.с. ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия, e-mail: [svetlans@mail.ru](mailto:svetlans@mail.ru)

Сильченко Алексей Леонидович, м.н.с. ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия, e-mail: [alexxx649@mail.ru](mailto:alexxx649@mail.ru)