

# Эффект памяти формы в сплаве TiNi, стимулированный нейтронным облучением

© С.П. Беляев, Р.Ф. Коноплева, И.В. Назаркин, А.И. Разов, В.Л. Соловей, В.А. Чеканов

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Российской академии наук,  
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия

E-mail: spb@smel.math.spbu.ru

(Поступила в Редакцию 10 января 2007 г.)

Исследовано восстановление неупругой деформации образцов сплава TiNi, облученных в атомном реакторе в изотермических условиях. Перед облучением цилиндрические образцы деформировали сжатием до остаточной деформации 3–6% в мартенситном состоянии при комнатной температуре. Облучение производили при температуре 45°C, которая не превышала температуры начала обратного мартенситного превращения  $A_s$ . Установлено, что облучение флюенсом быстрых нейтронов  $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  приводит к возврату остаточной деформации. Величина возвращаемой деформации сопоставима с той, которая наблюдается при реализации эффекта памяти формы путем нагревания деформированного сплава, и даже несколько превышает ее. Полученные данные показывают, что нейтронное облучение может стимулировать эффект памяти формы в сплаве TiNi. Это является следствием уменьшения температур мартенситных превращений в процессе облучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 05-08-33547).

PACS: 61.80.Hg, 81.30.Kf

## 1. Введение

Эффект памяти формы (ЭПФ) в предварительно деформированных сплавах реализуется в процессе нагревания через интервал температур  $A_s - A_f$ , где  $A_s$  — температура начала обратного мартенситного превращения,  $A_f$  — температура его окончания. При этом неупругая деформация в зависимости от величины предварительной деформации и свойств материала полностью или частично восстанавливается. ЭПФ можно инициировать и в изотермических условиях, если за счет какого-либо физического воздействия на материал понижать температуры обратного мартенситного перехода так, чтобы они достигли температуры испытания. В качестве примера можно привести гидростатическое давление, которое, по данным работы [1], снижает температуры превращений в сплаве TiNi с темпом 0.03 К/МПа. Авторами показано, что при определенных условиях постепенное повышение давления сопровождается синхронным возвратом неупругой деформации.

Еще одним фактором, приводящим к уменьшению температур мартенситных превращений в сплаве TiNi, является нейтронное облучение. В целом ряде работ установлено, что облучение сплава TiNi в атомном реакторе при температурах, меньших  $0.3T_m$  ( $T_m$  — температура плавления), приводит к снижению температур превращений с ростом флюенса нейтронов [2–6]. Это снижение тем значительней, чем меньше температура облучения [5,6]. Очевидно, что этот эффект указывает на возможность реализации радиационно стимулированного ЭПФ в сплавах на основе TiNi при условии облучения в низкотемпературном (мартенситном) состоянии ( $T_{\text{ит}} < A_s$ ) с набором флюенса, достаточного для смещения температуры превращений на величину

$\Delta T = A_f - T_{\text{ит}}$ , где  $A_f$  — температура окончания обратного мартенситного перехода. Однако необходимо иметь в виду, что действие нейтронного облучения не сводится только лишь к изменению характеристических температур структурных превращений. В работах [7–10] показано, что при облучении происходит аморфизация кристалла TiNi. Если аморфная фаза будет занимать значительную объемную долю материала до того момента, когда произойдет сдвиг точек перехода на  $\Delta T$ , то ЭПФ может быть в значительной степени подавлен или вообще не будет наблюдаться.

Цель настоящей работы заключалась в том, чтобы экспериментально проверить и подтвердить возможность реализации ЭПФ, стимулированного нейтронным облучением, в сплаве TiNi.

## 2. Объекты и методы исследования

Для исследований был выбран сплав TiNi эквивалентного состава. Образцы отжигали при температуре 500°C в течение 2 h. Мартенситные превращения в сплаве изучали с помощью дифференциального сканирующего калориметра Mettler Toledo 882<sup>e</sup> при скорости изменения температуры 10 К/мин. Калориметрические кривые сплава в исходном необлученном состоянии представлены на рис. 1. Анализ показывает, что по основным теплофизическим характеристикам (температурный гистерезис, величина энтальпии) превращение соответствует  $B2 \leftrightarrow B19'$  переходу в никелиде титана. Как можно видеть из рисунка, превращение развивается по сложной двухстадийной кинетике. Прямое превращение (в ходе охлаждения) начинается при температуре  $M_s = 67 \pm 2^\circ\text{C}$ , пик наблюдается при

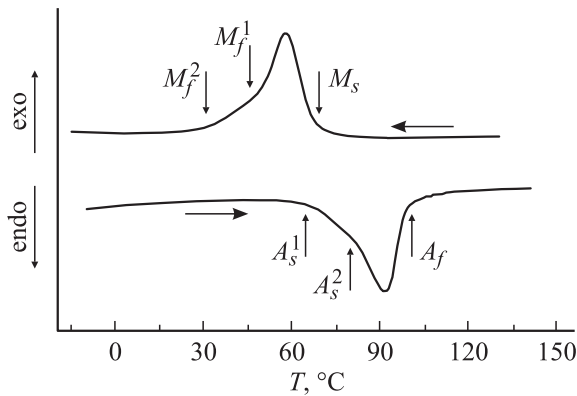


Рис. 1. Калориметрические кривые исследуемого сплава TiNi.

температуре  $T_p = 57^\circ\text{C}$ , первая стадия заканчивается после достижения  $M_f^1 = 44 \pm 2^\circ\text{C}$  и вторая — при  $M_f^2 = 29 \pm 2^\circ\text{C}$ . Первая стадия обратного превращения (в ходе нагревания) начинается при температуре  $A_s^1 = 64 \pm 2^\circ\text{C}$ , вторая — при  $A_s^2 = 75 \pm 2^\circ\text{C}$ , температура пика  $T_p = 91^\circ\text{C}$ , заканчивается превращение при температуре  $A_f = 98 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Образцы имели цилиндрическую форму диаметром 14 mm и длиной 59 mm. Их подвергали сжатию при комнатной температуре (в мартенситном состоянии) на 3–6% остаточной деформации, после чего часть образцов облучали в реакторе ВВР-М Петербургского института ядерной физики РАН, а другая их часть находилась в необлученном состоянии при комнатной температуре. Облучение проводили в ампуле, конструкция которой обеспечивала контакт поверхности образца с теплоносителем (водой) в процессе облучения. Температура теплоносителя при работе реактора на номинальной мощности не превышала  $45^\circ\text{C}$ . Таким образом, условие  $T_{\text{ит}} < A_s$  в эксперименте было выполнено. Образцы облучали флюенсом быстрых ( $E \geq 1 \text{ MeV}$ ) нейтронов  $5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ . Для исследования функционально-механических свойств облученных образцов было сконструировано специальное измерительное устройство, позволяющее дистанционно производить установку и извлечение образцов в условиях „горячей“ камеры, а также осуществлять изменение их температуры в диапазоне от  $-100$  до  $+200^\circ\text{C}$  с непрерывным измерением длины образца. Длину измеряли с точностью  $\pm 10 \mu\text{m}$ .

### 3. Результаты экспериментов

Эксперименты показали, что необлученные образцы сплава TiNi демонстрируют ЭПФ, как, например, показано на рис. 2. Предварительно сжатый на 1.94 mm (3.29% остаточной деформации) образец в процессе нагревания начинает резко удлиняться при температуре  $\approx 75^\circ\text{C}$ , совпадающей с началом второй стадии мартенситного превращения (рис. 1). Удлинение заканчивается при температуре  $\approx 100^\circ\text{C}$ , соответствующей темпера-

туре окончания превращения, а вне температурного интервала превращения наблюдается обычное тепловое расширение материала. Образец не полностью восстанавливает деформацию, удлиняясь лишь на 1.50 mm, что соответствует 2.54% деформации. Коэффициент возврата деформации, определяемый как отношение величины предварительной остаточной деформации к деформации, возвращаемой при нагревании, составляет 77.3%. При последующем термоциклировании через интервал температур превращений материал самопроизвольно сжимается во время охлаждения и удлиняется в процессе нагревания (рис. 2). Такое формоизменение проявляется многократно при повторяющихся переменах температуры, и его называют обратной памятью формы [9]. Величина деформации при реализации эффекта обратной памяти формы невелика и в рассматриваемом случае составляет 0.5%. В реакторе облучали как образцы, деформированные до разных степеней деформации, так и образцы, однократно нагретые после деформации и проявляющие эффект обратной памяти формы при теплосменах в интервале температур мартенситных переходов.

Поскольку облучение в реакторе сопровождается радиационным разогревом металла, были выполнены расчеты температурного поля в образце применительно к условиям облучения, реализованным в эксперименте. При этом полагали, что температура поверхности образца равна  $50^\circ\text{C}$ , удельная мощность тепловыделения составляет  $4 \text{ W/g}$ , а коэффициент теплопроводности равен  $10 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ . Было установлено, что на оси цилиндра температура достигает  $84^\circ\text{C}$  и внутренняя часть образца приблизительно до середины радиуса нагревается до температур, несколько превышающих температуру начала возврата деформации ( $75^\circ\text{C}$ ), и, следовательно,

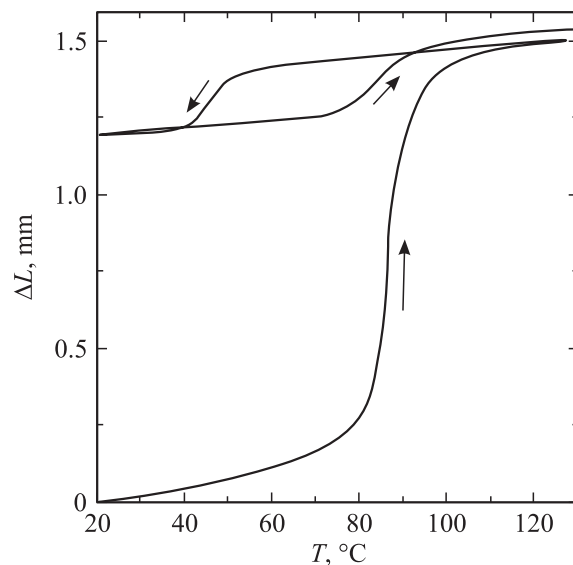
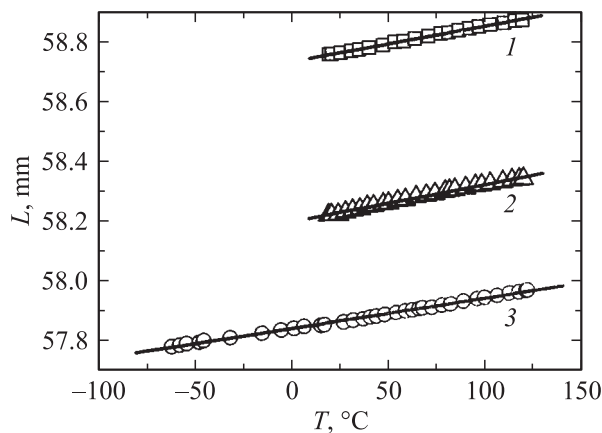


Рис. 2. Изменение длины образца сплава TiNi при изменении температуры. Предварительная остаточная деформация сжатия составляет 3.29%.



**Рис. 3.** Изменение длины при нагревании облученных образцов, предварительно деформированных до остаточной деформации 3.26 (1), 5.24% (2), и образца, демонстрировавшего перед облучением эффект обратимой памяти формы (3).

но, находится в двухфазном (мартенсит + аустенит) состоянии. В то же время внешние слои находятся в мартенситном состоянии. Важно, однако, что, согласно расчетам, в поперечном сечении образца температура нигде не достигает температуры окончания обратного мартенситного превращения ( $100^{\circ}\text{C}$ ).

Величина неупругой деформации и ЭПФ в необлученном и облученном флюенсом  $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  сплаве TiNi

	Номер образца			
	1	2	3	4
Предварительная деформация, %	5.21	3.29	5.24	3.26
Флюенс, $\text{см}^{-2}$	0	0	$5 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{20}$
Деформация, восстановленная при нагревании, %	3.58	2.54	—	—
Деформация, восстановленная при облучении, %	—	—	3.95	2.88
Коэффициент возврата деформации, %	68.7	77.2	75.4	88.3

Измерение длины образцов, извлеченных из реактора, показало, что во время облучения происходит возврат деформации. Как и при нагревании необлученного сплава, восстановление деформации после нейтронного облучения оказывается неполным. В таблице приведены сравнительные данные, характеризующие ЭПФ для облученных и необлученных образцов, предварительно деформированных до одинаковой деформации. Восстановление деформации в ходе облучения при прочих равных условиях происходит даже с несколько большим коэффициентом возврата по сравнению с нагреванием. При термоциклировании через интервал температур мартенситных превращений длина облученных образцов изменяется по линейному закону, как показано на рис. 3. Коэффициент термического линейного расширения со-

ставляет  $(1.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Изменения деформации, которые могли бы быть связаны с реализацией ЭПФ или обратимой памяти формы, не обнаружены.

#### 4. Заключение

Из полученных результатов с очевидностью следует, что облучение флюенсом  $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  стимулирует ЭПФ в сплаве TiNi. В этом смысле действие облучения оказывается аналогичным действию температуры. Отличие заключается в том, что после облучения при изменении температуры сплав не проявляет эффект обратимой памяти формы. Все эти результаты являются следствием уменьшения температур мартенситных превращений по мере увеличения флюенса нейтронов. Отсутствие обратимой памяти формы указывает либо на смещение характеристических точек превращения в область температур, меньших  $-100^{\circ}\text{C}$ , либо на аморфизацию образцов вследствие накопления критической концентрации радиационных дефектов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Петербургского института ядерной физики РАН Г.В. Колобанову, С.П. Орлову, А.Е. Глаголеву и сотрудникам НИИ математики и механики СПбГУ Н.Н. Ресниной и Б.Н. Семенову за помощь при выполнении экспериментальных и расчетных работ.

#### Список литературы

- [1] С.П. Беляев, С.А. Егоров, В.А. Лихачев, О.Е. Ольховик. ЖТФ **66**, 36 (1996).
- [2] С.П. Беляев, А.Е. Волков, Р.Ф. Коноплева, И.В. Назаркин, А.И. Разов, В.Л. Соловей, В.А. Чеканов. ФТТ **40**, 1705 (1998).
- [3] С.Ф. Дубинин, С.Г. Теплоухов, В.Д. Пархоменко. ФММ **78**, 84 (1994).
- [4] T. Hoshiya, S. Shimakawa, Y. Ichihashi, M. Nishikawa, K. Watanabe. J. Nucl. Mater. **179-181**, 1119 (1991).
- [5] T. Hoshiya, F. Takada, Y. Ichihashi. Mater. Sci. Eng. A **130**, 185 (1990).
- [6] T. Hoshiya, F. Takada, Y. Ichihashi. Mater. Sci. Forum. **56-58**, 577 (1990).
- [7] С.Ф. Дубинин, В.Д. Пархоменко, С.Г. Теплоухов. ФММ **85**, 119 (1998).
- [8] С.Ф. Дубинин, В.Д. Пархоменко, С.Г. Теплоухов. ФММ **88**, 111 (1999).
- [9] С.Ф. Дубинин, В.Д. Пархоменко, С.Г. Теплоухов. ФММ **82**, 136 (1996).
- [10] С.П. Беляев, А.Е. Волков, В.А. Ермолаев, З.П. Каменцева, С.Л. Кузьмин, В.А. Лихачев, В.Ф. Мозгунов, А.И. Разов, Р.Ю. Хайров. Материалы с эффектом памяти формы. Справочное издание / Под ред. В.А. Лихачева. В 4-х т. НИИХ СПбГУ, СПб (1997–1998).