

ИССЛЕДОВАНИЯ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГЕЛИЕВОЙ ПЕТЛЕ РЕАКТОРА ВВР-М

С.П. Беляев

1. Введение

В петлевых устройствах исследовательских ядерных реакторов теплоноситель (газ) циркулирует по замкнутому контуру, поглощая тепло, выделяющееся в облучаемом объекте, и отдавая тепло в теплообменном аппарате, расположенном вне активной зоны реактора. Такая схема охлаждения облучаемого объекта дает большие преимущества по сравнению с ампульными устройствами, поскольку позволяет проводить исследования свойств материалов непосредственно в процессе облучения при температурах, меньших температур теплоносителя реактора. В ампулах такой режим испытаний не реализуется, так как отвод тепла производится, как правило, теплоносителем самого реактора. Еще одной важной особенностью петлевых устройств является возможность реализации программируемого температурного режима облучения путем изменения температуры теплоносителя на входе в петлю. Изменение температуры при непрерывном измерении свойств облучаемого объекта позволяет получить температурные зависимости той или иной физической характеристики материала на различных стадиях облучения без извлечения измерительной сборки из канала реактора. Это является очень важным при решении целого ряда задач радиационной физики твердого тела и особенно при изучении материалов с фазовыми превращениями. К таким материалам относятся и сплавы с эффектом памяти формы. В сплавах с памятью восстановления большой неупругой деформации происходит в процессе перехода из одного типа кристаллической решетки в другой. Температурный интервал, где проявляется эффект памяти формы, определяется температурной кинетикой фазового перехода, который является бездиффузионным и относится к классу так называемых мартенситных превращений, а величина восстанавливаемой деформации зависит от деформации решетки при превращении.



Профессор Владимир
Александрович Лихачев

История изучения сплавов с памятью формы в ПИЯФ началась в 1995 году, когда институт посетил профессор Санкт-Петербургского государственного университета В.А. Лихачев. Цель его визита состояла в том, чтобы привлечь внимание сотрудников нашего института к материалам, проявляющим столь необычные свойства. Одна из задач, постановка которой обсуждалась в то время, заключалась в выполнении исследований влияния нейтронного облучения на температурную кинетику мартенситных превращений и эффекты памяти формы. Владимир Александрович является

автором теории, описывающей функциональные и механические свойства материалов с памятью формы. Теория позволяла производить компьютерное моделирование многих физических и механических эффектов, сопровождающих мартенситные переходы, и влияние на них различных факторов. В частности, это касалось и действия нейтронного облучения. Однако теория в этой части основывалась лишь на умозрительных физических соотношениях, связывающих интенсивность и дозу облучения с кинетическими характеристиками фазовых переходов. Требовалось получение надежных экспериментальных результатов. Так, по инициативе В.А. Лихачева в группе радиационной физики твердого тела под руководством проф. Р.Ф. Коноплевой начались исследования действия нейтронного облучения на сплавы с памятью формы. К сожалению, В.А. Лихачев скоропостижно скончался в 1996 году и не увидел результатов инициированной им работы.

Основной объем исследований выполняли на сплаве TiNi эквиатомного состава. Никелид титана является ярким представителем материалов с памятью. Он обладает хорошей прочностью, пластичностью, стойкостью к коррозии, высокой демпфирующей способностью и большой величиной эффекта памяти формы, достигающей 10% относительной деформации. Последовательность мартенситных превращений в сплаве TiNi и характеристические температуры структурных переходов определяются многими факторами: химическим составом основы и содержанием легирующих элементов, механическим напряжением, условиями технологического передела, термомеханической обработкой. В этом ряду необходимо указать и нейтронное облучение, действие которого на свойства и структуру никелида титана изучается в различных странах [1–13]. Интерес исследователей к этой задаче связан не только с необходимостью прогнозирования свойств сплава, демонстрирующего эффект памяти формы и являющегося перспективным для решения ряда проблем, возникающих при строительстве, эксплуатации и ремонте атомных и термоядерных установок [14, 15]. Важной является сама возможность управления мартенситными переходами и функционально-механическими свойствами сплава TiNi путем легко контролируемого и дозируемого облучения частицами высокой энергии.

К моменту начала нашей работы было известно, что в результате облучения нейтронами температуры мартенситных переходов смещаются в низкотемпературную область [1–7]. Так, по данным работ [1–4], температура M_s начала перехода R(ромбоэдрическая фаза)→B19'(моноклинная фаза) уменьшается более чем на 200 К после облучения быстрыми нейтронами ($E > 1$ МэВ) флюенсом $\Phi = 8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ при температуре $T_{\text{обл}} = 323 \text{ К}$. Температура T_R начала превращения B2(кубическая фаза)→R понижается лишь незначительно на (1÷20) К. Эти наблюдения находятся в противоречии с результатами работы [6], где отмечалось одинаковое смещение температур T_R и M_s в процессе отжига облученных ($\Phi = 8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{обл}} = 340 \text{ К}$) образцов никелида титана. Как показано в [1–4], при повышенных температурах облучения (520 К) смещения M_s и T_R не наблюдается до дозы $1,1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Этот факт указывает на резкую интенсификацию процессов отжига радиационных дефектов в сплаве TiNi вблизи 500 К. Наблюдаемые

изменения связывают с радиационным разупорядочением кристаллической структуры сплава [4–8], аморфизацией никелида титана при облучении быстрыми нейтронами [8–10], радиационно-стимулированным старением, при котором в сплаве создаются локальные неоднородности химического состава [11]. Однако какой из перечисленных процессов является определяющим, трудно было оценить, когда все измерения были выполнены при температурах около 300 К на предварительно облученных образцах, даже в том случае, если облучение проводилось при низких температурах (80 К) [9].

Известно, что радиационные точечные дефекты кристаллической решетки чрезвычайно чувствительны к температуре и начинают отжигаться при довольно низких температурах, уходя на стоки или образуя комплексы дефектов друг с другом и с примесными атомами. Чтобы понять процессы, происходящие в кристалле при нейтронном облучении, необходимо исследование образующихся структурных нарушений проводить в замороженном «первозданном» состоянии, то есть непосредственно в ходе облучения и при низкой температуре. Такие эксперименты можно было выполнить только на реакторе ВВР-М, где в 1991 году была создана низкотемпературная гелиевая петля (НГП), позволяющая проводить измерения различных физических характеристик материалов в процессе облучения при температурах ~ 20–450 К.

В 1996 году группа, состоящая из Р.Ф. Коноплёвой, С.П. Беяева, В.А. Чеканова, И.В. Назаркина и Г.В. Колобанова, приступила к исследованию сплава TiNi в НГП. Петля была создана и обслуживалась группой специалистов по криогенной технике под руководством В.А. Митюхляева. Без их непосредственного участия в экспериментах работа с НГП была невозможна. Однако криогенная группа была очень плотно занята в экспериментах лаборатории А.П. Сереброва, связанных с измерением электрического дипольного момента нейтрона. Мы могли проводить эксперименты в НГП только во время остановок измерений, проводимых в лаборатории А.П. Сереброва. Это были довольно короткие промежутки времени, не превышающие двух циклов работы реактора (10 рабочих дней) за период 3–4 месяцев. В течение 10 дней облучения образец мог набрать флюенс порядка $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Р.Ф. Коноплёва очень сомневалась, что при столь малых флюенсах нейтронов могут наблюдаться сколько-нибудь существенные изменения свойств металлического материала, связанные с радиационным воздействием. Такие сомнения были основаны на том, что все предыдущие наблюдения изменений кинетики мартенситных переходов в сплаве TiNi с памятью формы были выполнены на образцах, предварительно облученных в реакторе до флюенсов, значительно превышающих $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. В то же время мы были уверены, что с помощью имеющейся в нашем распоряжении уникальной установки сможем установить ранее неизвестные закономерности воздействия потока нейтронов на свойства и структуру сплава TiNi, во всяком случае на ранних этапах структурных изменений, происходящих при облучении. Результат был непредсказуем, поскольку никто никогда не проводил низкотемпературных измерений в сплаве в процессе облучения в реакторе. Более того, результаты могли оказаться достаточно неожиданными. Об этом свидетельствовал опыт исследования свойств ВТСП

материалов в НГП реактора ВВР-М, когда сотрудники нашей группы впервые наблюдали необычное поведение таких материалов при низкотемпературном облучении.

Итак, мы начали исследования мартенситных превращений и кинетических особенностей радиационно-стимулированной модификации свойств сплавов TiNi, облучаемых нейтронами реактора при различных температурах. В отличие от большинства других работ, где исследования выполняли на предварительно облученных образцах, здесь измерения проводили непосредственно в процессе облучения, используя метод измерения электрического сопротивления. Эта физическая характеристика, как известно, является структурно-чувствительной как по отношению к радиационным дефектам, так и к мартенситным превращениям.

Основной целью исследований являлось выявление феноменологических соотношений, описывающих изменение температур мартенситных превращений в облучаемых нейтронами сплавах с памятью формы, и определение физических механизмов, ответственных за наблюдаемые изменения свойств материалов. На этой основе предполагалось разработать модель для прогнозирования кинетики мартенситных переходов в материалах, облучаемых при различных температурах. Особое внимание уделяли изучению эффекта памяти формы в облучаемом сплаве TiNi.

2. Методика экспериментов

В экспериментах использовали проволоочные образцы никелида титана диаметром 0,5 мм и длиной 30 мм различных производителей. Образцы перед измерениями многократно термоциклировали через интервал температур превращений с целью стабилизации свойств. Непосредственно перед установкой в канал реактора производили измерения температурной зависимости электросопротивления, по которой определяли температуры мартенситных переходов. Температуре T_R начала перехода B2→R при охлаждении сопоставляли момент начала аномального подъема электросопротивления; температуре M_S начала перехода R(B2)→B19' – максимум на зависимости $\rho(T)$; температуре M_f окончания превращения в B19'–мартенсит – выход на линейную зависимость сопротивления от температуры.

Эксперименты проводили в низкотемпературной гелиевой петле, размещенной в одном из вертикальных каналов реактора ВВР-М Петербургского института ядерной физики (рис. 1). Гелий, охлаждаемый криогенной системой, циркулировал в канале по замкнутому контуру, отводя тепло, выделяющееся в образцах вследствие радиационного разогрева. Температуру в петле поддерживали постоянной или изменяли по заданной программе путем изменения скорости циркуляции гелия и степени его охлаждения. Теплоизоляция стенок гелиевой петли от теплоносителя реактора обеспечивалась вакуумной рубашкой. При мощности реактора 15 МВт плотность потока быстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ составляла $9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Электросопротивление измеряли четырехзондовым

методом, а температуру – с помощью медь-константановой термопары. Все измерения выполняли непрерывно на протяжении всего эксперимента.

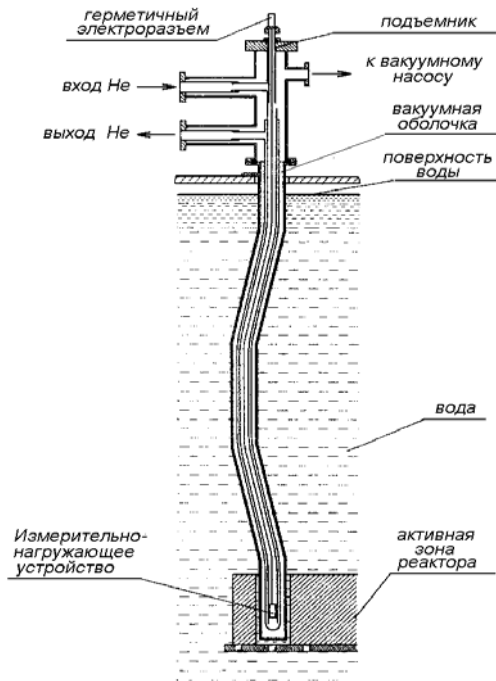


Рис. 1. Низкотемпературная гелиевая петля реактора ВВР-М ПИЯФ РАН

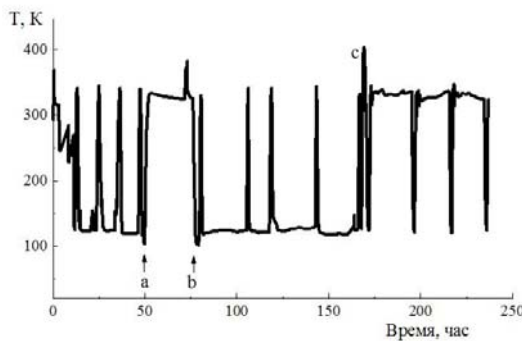


Рис. 2. Пример изменения температуры в петле во время эксперимента.

Облучение производили при температурах $T_{\text{обл}} = 120 \text{ K}$, 170 K (в мартенситном состоянии сплавов) или 335 K , 450 K (в аустенитном состоянии). Периодически для получения зависимостей электросопротивления от температуры производили нагрев (или охлаждение) образца через интервал мартенситных превращений с последующим возвратом к температуре облучения. В некоторых случаях после набора определенного флюенса резко изменяли температуру облучения и продолжали эксперимент при иной температуре. На рис. 2 в качестве примера показано изменение температуры от времени в одном из таких экспериментов. Здесь облучение до флюенса быстрых нейтронов $5,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ осуществляли при температуре $T_{\text{обл}} = 120 \text{ K}$ (в мартенситном состоянии сплавов), после чего температуру повышали, и дальнейшее облучение происходило при $335 \pm 10 \text{ K}$ (в аустенитном состоянии). Острые пики на зависимости соответствуют циклам нагревания и охлаждения, во время которых записывали температурные зависимости электрического сопротивления. Промежуток времени а–b на рисунке соответствует остановке реактора, во время которой циркуляция гелия в канале была прекращена, и температура установилась на уровне 330 K , с кратковременным подъемом до 380 K при возобновлении облучения. Перед началом периода облучения при $T_{\text{обл}} = 335 \text{ K}$ температура образцов по техническим причинам была повышена до 400 K в течение 20 минут (температурный пик с на рис. 2).

3. Результаты экспериментов

Температурные зависимости электросопротивления, полученные при термоциклировании, позволяют анализировать как изменение температурной кинетики мартенситных превращений, так и кинетику процессов радиационно-стимулированного изменения структуры материалов. Несколько таких зависимостей показано на рис. 3. Легко видеть, что с нарастанием флюенса нейтронов происходят существенные изменения формы и положения кривых на диаграммном поле.

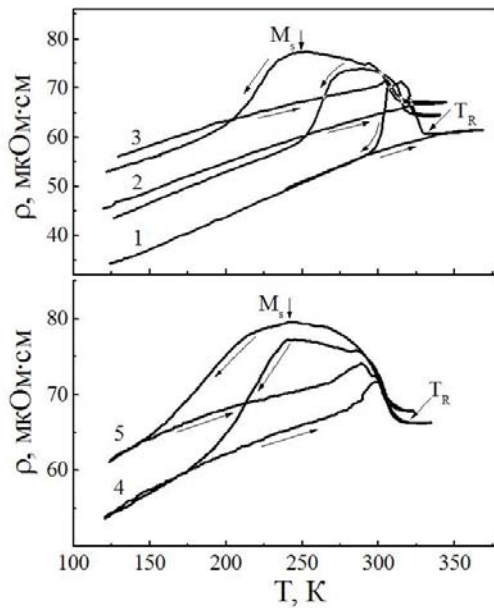


Рис. 3. Температурные зависимости электросопротивления сплава TiNi в необлученном состоянии (1) и после облучения при температуре 120 К (1, 2, 3), а затем при 335 К (4, 5) до флюенса быстрых нейтронов $1,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (2), $3,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (3), $5,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (4), $6,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (5)

3.1. Изменение температур превращений

Температуры мартенситных превращений понижаются по мере облучения (рис. 3), и этот процесс начинается с самых первых часов радиационного воздействия на материал уже при флюенсах $\sim 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Это был неожиданный результат. Впервые было установлено, что при низкотемпературном облучении превращения в никелиде титана обладают очень высокой радиационной чувствительностью. На рис. 4 показан пример изменения характеристических температур превращений в сплаве TiNi на протяжении всего периода облучения при температуре 170 К. Отметим, что температуры M_S и T_R изменяются с различной скоростью. Экспериментальные данные для всех температур переходов удовлетворительно описываются выражением

$$\Delta T_{\text{ph}} = d [\exp(-\Phi/\Phi_0) - 1], \quad (1)$$

где ΔT_{ph} – приращение температуры фазового перехода; Φ – флюенс нейтронов; d и Φ_0 – константы. Экспоненциальное снижение температур превращения в сплаве TiNi наблюдается в ходе облучения при различных температурах, не превышающих 335 К.

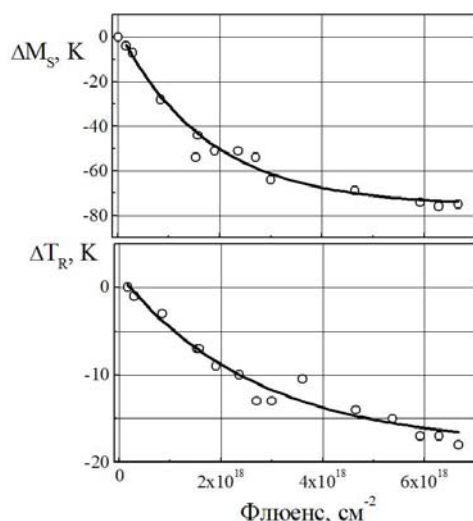


Рис. 4. Изменение температур мартенситных превращений в сплаве TiNi в процессе облучения при температуре 170 К

Большинство исследователей связывают наблюдаемые изменения с радиационным разупорядочением кристаллической структуры сплава [4–8]. В работах [6, 8–10] методом дифракции нейтронов непосредственно наблюдали уменьшение интенсивности сверхструктурных отражений в монокристалле $Ti_{49}Ni_{51}$. Относительное изменение интенсивности сверхструктурных максимумов значительно превышало величину подобного изменения структурных рефлексов, что позволило сделать вывод об уменьшении степени дальнего порядка при облучении. В опытах по отжигу облученных образцов удалось установить эмпирическую связь между температурами мартенситных превращений и степенью дальнего порядка в TiNi [6].

Тогда, аппроксимируя результаты, полученные в [6], линейной зависимостью

$$T_{ph} = T_{ph}^0 + kS \quad (2)$$

(T_{ph}^0 и k – константы) и учитывая, что, согласно нашим данным,

$$T_{ph} = T_{ph}^\infty + D \exp(-\Phi/\Phi_0) \quad (3)$$

(T_{ph}^∞ и D – константы), легко получим эмпирическую связь между степенью дальнего порядка и флюенсом нейтронов

$$S = S_\infty + (S_0 - S_\infty)\exp(-\Phi/\Phi_0), \quad (4)$$

где S_∞ – асимптотическое значение S при $\Phi \rightarrow \infty$, S_0 – начальная величина степени дальнего порядка до облучения.

Особый случай изменения кинетики мартенситных превращений в сплаве TiNi наблюдали в процессе облучения при температуре 450 К. В противоположность сказанному выше температуры превращений в этом случае повышались с ростом

флюенса нейтронов, а сопротивление уменьшалось (рис. 5). Уменьшение электросопротивления при облучении является весьма необычным явлением для облучаемых металлов, поскольку облучение, повреждая кристаллическую решетку, в подавляющем большинстве случаев приводит к образованию дополнительных центров рассеяния носителей заряда и увеличивает сопротивление. Наиболее вероятным объяснением обнаруженных нами изменений является радиационное упорядочение сплава при высокотемпературном облучении, проявляющееся вследствие того, что степень дальнего порядка в необлученном сплаве TiNi не равна единице и составляет 0,7–0,8 в зависимости от состава.

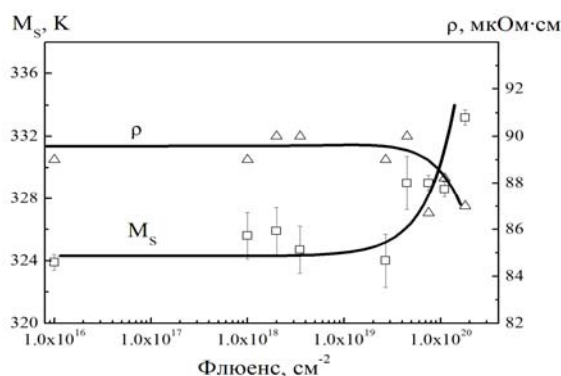


Рис. 5. Изменение температуры начала превращения M_s и электросопротивления ρ в процессе облучения при температуре 450 К

3.2. Кинетическое уравнение и моделирование радиационных изменений кинетики мартенситных превращений в сплаве TiNi

В результате подробного анализа экспериментальных результатов установлено, что основными факторами, влияющими на скорость изменения температур мартенситных переходов, являются разупорядочение твердого раствора TiNi при низкотемпературном нейтронном облучении, радиационное упорядочение в процессе высокотемпературного облучения и термостимулированный отжиг радиационных повреждений. В соответствии с этим определен вид дифференциального уравнения для скорости изменения критических температур фазовых переходов в TiNi, правая часть которого содержит три члена, описывающих кинетику перечисленных выше процессов:

$$dT_{ph}/dt = a(T_{ph}^{\infty} - T_{ph}) \cdot I + b(T_{ph}^0 - T_{ph})^2 \exp(-U_1/kT) + c \cdot I \cdot (T_{ph}^1 - T_{ph}) \exp(-U_2/kT), \quad (5)$$

где T – температура, T_{ph} – температура превращения, t – время, Φ – флюенс нейтронов, I – плотность потока нейтронов, U_1 – энергия активации отжига радиационных дефектов, U_2 – энергия активации радиационного упорядочения, T_{ph}^{∞} – температура превращения при $\Phi \rightarrow \infty$, T_{ph}^1 – температура превращения полностью упорядоченного сплава, T_{ph}^0 – температура превращения в

необлученном сплаве, a , b , и c – константы. Полученные в экспериментах данные предоставляют возможность оценить все физические величины и константы приведенного уравнения. Выполнено компьютерное моделирование радиационной модификации кинетики превращений. На рис. 6 точками показаны результаты измерений температуры M_S , а сплошными линиями – результаты выполненных расчетов. Соответствие расчетных и экспериментальных данных можно полагать вполне удовлетворительным.

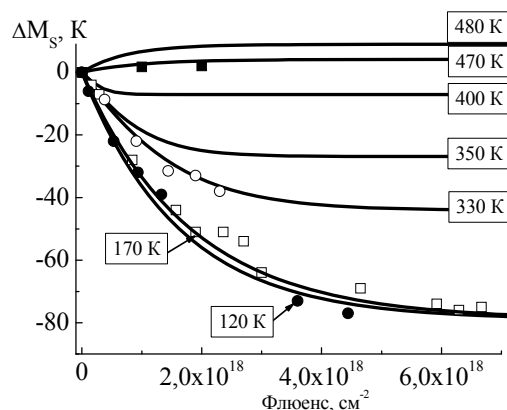


Рис. 6. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) зависимости температуры начала мартенситного перехода M_S от флюенса быстрых нейтронов при различных температурах облучения

3.3. Эффект памяти формы

Для изучения поведения образца сплава TiNi в условиях механического нагружения и измерения его деформации было разработано специальное устройство, в котором проволоочный образец в форме геликоидальной пружины нагружался упругим пружинным элементом. Длину образца измеряли индуктивным датчиком перемещения непосредственно в процессе облучения в канале реактора. При термоциклировании образец удлинялся в ходе нагревания (эффект памяти формы) и сжимался при охлаждении под действием упругого элемента (эффект пластичности превращения). Температура облучения была равна 170 K.

На рис. 7 представлены температурные зависимости изменения длины образца ΔL , полученные до и после облучения. Форма зависимостей $\Delta L(T)$ постепенно менялась в процессе облучения в соответствии с изменением температурной кинетики мартенситных превращений в сплаве. В то же время эксперименты показали, что амплитуда деформации при термоциклировании остается неизменной до максимальной достигнутой в опыте дозы $6,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Таким образом, исследуемый сплав сохраняет в процессе нейтронного облучения способность к накоплению и возврату неупругой деформации при мартенситных превращениях.

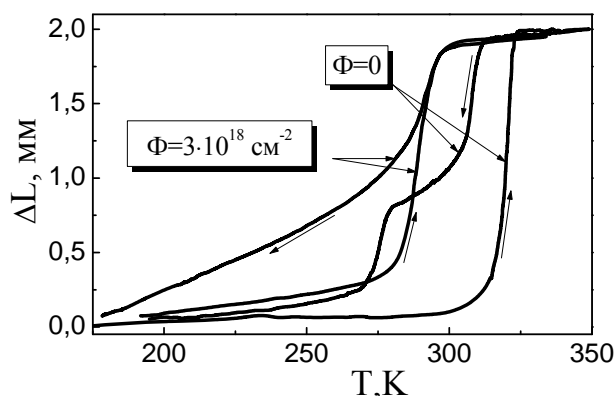


Рис. 7. Температурные зависимости удлинения образца сплава TiNi до и после облучения

4. Заключение

Экспериментальные данные показывают, что сплав TiNi весьма чувствителен к нейтронному облучению. Температуры мартенситных превращений экспоненциально снижаются с ростом флюенса быстрых нейтронов при температурах облучения ниже 330 К и повышаются, если температура облучения равна 450 К. Показано, что, несмотря на изменение температурной кинетики мартенситных превращений при нейтронном облучении, сплав TiNi сохраняет способность к проявлению эффекта памяти формы. Предложено дифференциальное уравнение, описывающее изменение температурной кинетики превращений в сплаве TiNi в процессе облучения в широком интервале температур. Выполнены компьютерные расчеты, результаты которых хорошо совпадают с имеющимися экспериментальными данными.

В заключение заметим, что объектом наших исследований сплавов с памятью формы был не только никелид титана, но и сплавы систем Cu-Al-Ni и Mn-Cu. К моменту написания настоящей статьи начато изучение влияния нейтронного облучения на сплавы на основе никелида титана, полученные контролируемой кристаллизацией из аморфного состояния и имеющие ультрамелкозернистую и нанокристаллическую структуру. Есть основания полагать, что нас ожидают новые интересные результаты с перспективой их практического использования.

Литература

1. T. Hoshiya, F. Takada, Y. Ichihashi. Restoration phenomena of neutron irradiated Ti-Ni shape memory alloys. *Mater. Sci. Eng. A* **130(2)**. 1990. P. 185–191.
2. T. Hoshiya, F. Takada, Y. Ichihashi. Restoration effect on the transformation behavior of neutron irradiated Ti-Ni shape memory alloys. *Materials Sci. Forum.* **56–58**. 1990. P. 577–582.

3. T. Hoshiya, S. Shimakawa, Y. Ichihashi, M. Nishikawa, K. Watanabe. Fast neutron irradiation of TiNi shape memory alloys. *J. Nucl. Mater.* 1991. P. 1119–1122.
4. T. Hoshiya, S. Den, H. Ito, S. Takamura, Y. Ichihashi. Effect on neutron-irradiation on the transformation and mechanical properties in Ti-Ni shape memory alloys. *J. Japan Inst. Metals.* **55(10)**. 1991. P. 1054–1062.
5. С.П. Беляев, А.Е. Волков, Р.Ф. Коноплёва, И.В. Назаркин, А.И. Разов, В.Л. Соловей, В.А. Чеканов. Влияние нейтронного облучения на мартенситные превращения и эффект памяти формы в сплаве TiNi. *Физика твёрдого тела* **40(9)**. 1998. С. 1705–1709.
6. С.Ф. Дубинин, С.Т. Теплоухов, В.Д. Пархоменко. Влияние атомного порядка на температуры мартенситных превращений сплава Ti₄₉Ni₅₁. *Физ. мет. и металловед.* **78(2)**. 1994. С. 84–90.
7. A. Kimura, S. Myazaki, H. Horikawa, K. Yamauchi. Effect of neutron irradiation on the transformation behavior in Ti-Ni alloys. *Proc. Int. Conf. on Martensitic Transformation (ICOMAT'92)*. Montrey. CA. P. 935–940.
8. С.Ф. Дубинин, С.Т. Теплоухов, В.Д. Пархоменко. Структурное состояние никелида титана, облученного быстрыми нейтронами. *Физ. мет. и металловед.* **82(3)**. 1996. С. 136–141.
9. С.Ф. Дубинин, В.Д. Пархоменко, С.Т. Теплоухов. Радиационные повреждения никелида титана, облученного быстрыми нейтронами при 80 К. *Физ. мет. и металловед.* **85(3)**. 1998. С. 119–124.
10. С.Ф. Дубинин, В.Д. Пархоменко, С.Г. Теплоухов. Влияние особенностей реальной структуры на аморфизацию никелида титана быстрыми нейтронами. *Физ. мет. и металловед.* **88(2)**. 1999. С. 111–112.
11. С.П. Дубинин, С.Т. Теплоухов, В.Д. Пархоменко. Старение, упругие искажения и мартенситные превращения сплава Ti₄₉Ni₅₁ после γ , n° -облучения. *Физ. мет. и металловед.* **87(1)**. 1999. С. 75–80.
12. С.П. Беляев, А.Е. Волков, Р.Ф. Коноплёва, И.В. Назаркин, А.И. Разов, В.Л. Соловей, В.А. Чеканов. Мартенситные превращения в сплаве TiNi в процессе облучения нейтронами реактора. Труды XI Международного совещания «Радиационная физика твёрдого тела». Севастополь. М.: НИИ ПМТ МГ и ЭМ. 2001. С. 239–243.
13. С.П. Беляев, А.Е. Волков, Р.Ф. Коноплёва, И.В. Назаркин, А.И. Разов, В.Л. Соловей, В.А. Чеканов. Кинетика радиационных повреждений и мартенситные превращения в сплаве TiNi в процессе облучения нейтронами. *Физика твёрдого тела* **43(11)**. 2001. С. 2070–2075.
14. M. Nishikawa, S. Toda, E. Tachibana, T. Hoshija, M. Kawai, S. Goto, K. Watanabe. Application of shape memory alloys to compacting and element-quickly replaceable desing in high-power density fusion reactors. *Fusion Eng. Desing.* **10**. 1989. P. 509–514.
15. M. Nishikawa, E. Tachibana, K. Watanabe, T. Narikawa, S. Toda. Quick replacement of the fusion core parts in a cassette compact toroid reactor. *Fusion Eng. Desing.* **5**. 1988. P. 401–413.