

МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ОБРАТИМАЯ ДЕФОРМАЦИЯ В ОБЛУЧАЕМОМ НЕЙТРОНАМИ НИКЕЛИДЕ ТИТАНА

Беляев С. П., Коноплева Р. Ф., Назаркин И. В., Накин А. В., Чеканов В. А.

*Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН,
г. Гатчина, Россия
spb@pnpi.spb.ru*

Среди большого разнообразия материалов с памятью формы уникальным комплексом физико-механических свойств обладает сплав TiNi, уже сейчас широко используемый в технике и медицине. Нейтронное облучение является фактором, существенно модифицирующим структуру кристаллов, и поэтому дает возможность управления специальными свойствами сплава TiNi. Известные к настоящему времени сведения на эту тему получены на предварительно облученных образцах. Очевидно, что наиболее достоверные данные могут быть получены в экспериментах, при которых состояние материала оценивается непосредственно в процессе облучения. Такие эксперименты впервые выполнены в низкотемпературной гелиевой петле реактора ВВР-М ПИЯФ РАН. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния нейтронного облучения на мартенситные превращения и эффект памяти формы в сплаве TiNi, а также предложен метод описания и прогнозирования поведения сплава в условиях облучения при различных температурах.

Непосредственно в процессе облучения выполняли измерения электросопротивления и деформации материала с памятью формы в широком интервале температур облучения (120–450 К). Возможность произвольной вариации температуры в процессе облучения в петле позволила изучать свойства материала, находящегося в различных структурных состояниях (аустенитном, мартенситном и гетерофазном), а также измерять температурные зависимости электросопротивления и деформации на любом этапе облучения.

Установлено, что электросопротивление сплава TiNi возрастает с увеличением флюенса быстрых нейтронов. Скорость роста сопротивления в мартенситном состоянии в 3–4 раза больше, чем в аустенитном. Это обусловлено различным вкладом в величину электросопротивления радиационных дефектов и дроблением полидоменной структуры мартенсита при облучении.

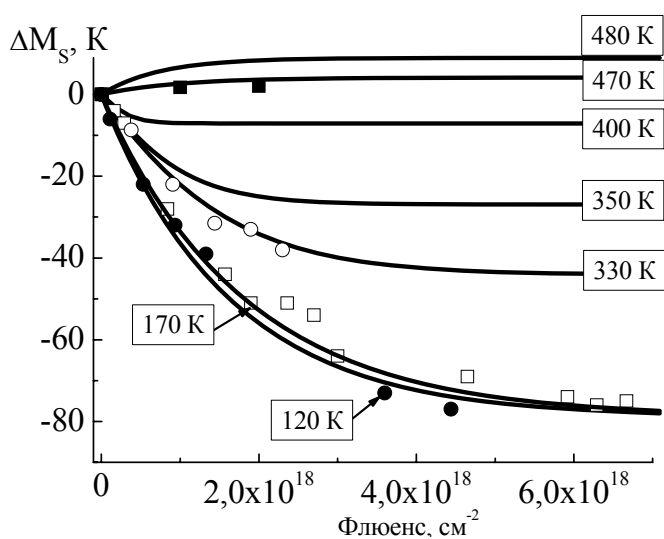
При низкотемпературном (120–330 К) облучении критические температуры мартенситных переходов в сплаве TiNi снижаются с нарастанием флюенса по экспоненциальному закону $\Delta T_{tr} = d[\exp(-\Phi/\Phi_0) - 1]$, где ΔT_{tr} – приращение температуры, соответствующей структурному превращению, Φ – флюенс, d и Φ_0 – константы. Эти закономерности выявляются при облучении, как в мартенситном, так и в аустенитном состояниях. Кратковременное повышение температуры образцов, облученных флюенсом $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, до температуры $\sim 450 \text{ К}$ приводит к возврату электросопротивления и кинетики мартенситных превращений. Энергия активации возврата свойств составляет 0,65 эВ и соответствует энергии миграции одиночных вакансий. Однако в ходе облучения при температуре 450 К наблюдается обратный эффект: температуры превращений возрастают.

Анализ результатов убеждает в том, что при облучении не происходит аморфизации сплава, как это предполагалось ранее. Очевидно, причиной изменения температур фазовых переходов является изменение степени дальнего порядка при облучении. В частично упорядоченном сплаве при низких температурах облучения происходит разупорядочение, а при высоких, наоборот, упорядочение твердого раствора. Таким образом, основными факторами, влияющими на скорость изменения температур мартенситных переходов, являются разупорядочение твердого раствора TiNi при низкотемпера-

турном 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.

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

где T – температура, T_{tr} – 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_{tr}^{∞} – температура превращения при $\Phi \rightarrow \infty$, T_{tr}^1 – температура превращения полностью упорядоченного сплава, T_{tr}^0 – температура превращения в необлученном сплаве, a , b , и c – константы. Полученные экспериментальные данные позволяют определить константы приведенного уравнения. На рисунке изображены зависимости приращения температуры начала мартенситного превращения в сплаве TiNi от флюенса быстрых нейтронов. Точками пред-



ставлены результаты измерений, а линиями данные расчетов. Результаты компьютерных расчетов удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными и позволяют прогнозировать поведение сплава при облучении в широком интервале температур от 120 К до 480 К флюенсом быстрых нейтронов до $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

Экспериментально установлено, что до флюенса $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ сплав полностью сохраняет способность к обратимому деформированию в процессе мартенситных превращений, и

эффекты пластичности превращения и памяти формы проявляются в полной мере, несмотря на существенные изменения кинетики переходов.

Обнаруженное смещение температур превращения указывает на возможность реализации радиационно стимулированного эффекта памяти формы в сплавах на основе TiNi при условии облучения в низкотемпературном (мартенситном) состоянии при $T < A_s$ с набором флюенса, достаточного для смещения температуры превращений на величину $\Delta T = A_f - T_{обл}$, где A_f – температура окончания обратного мартенситного перехода. В связи с этим в работе исследовано восстановление неупругой деформации образцов сплава TiNi, облученных в атомном реакторе в изотермических условиях. Перед облучением цилиндрические образцы деформировали сжатием до остаточной деформации $3 \div 6 \%$ в мартенситном состоянии. Установлено, что облучение флюенсом быстрых нейтронов $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ при температуре 315 К приводит к возврату остаточной деформации. Полученные данные показывают, что нейтронное облучение может стимулировать эффект памяти формы в сплаве TiNi.