

УДК 669.018.2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ, ОБЛУЧАЕМЫХ НЕЙТРОНАМИ

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

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН
spb@smel.math.spbu.ru

Нейтронное облучение существенно изменяет структуру и свойства материалов с термоупругими мартенситными превращениями, проявляющих эффект памяти формы. Наиболее исследован в этом отношении эквиатомный сплав TiNi. По имеющимся данным после облучения быстрыми нейтронами флюенсом более $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ в никелиде титана и его сплавах мартенситное превращение не наблюдается вплоть до 170 К [1,2]. Это интерпретируется как снижение температур превращения в результате облучения. Причины такого снижения авторы усматривают в разупорядочении и аморфизации кристаллической решетки, что следует из результатов исследования никелида титана дифракционными методами [2–4]. Другие же материалы с мартенситными превращениями изучены крайне мало, хотя многие из них по своим функциональным характеристикам являются перспективными для использования в различных приложениях, связанных с реакторной техникой.

Целью настоящего исследования является определение общих и особенных закономерностей развития мартенситных превращений и радиационного повреждения облучаемых нейтронами сплавов с памятью формы, обладающих различной структурой и разным типом мартенситных превращений.

Исследовали поликристаллические образцы сплавов Ti–55 %Ni, Mn–20 %Cu, а также монокристалл сплава Cu–13,4 %Al–5 %Ni. Образцы облучали в гелиевой петле реактора ВВР-М. Облучение производили при температурах 320–340 К до флюенса быстрых ($E > 1 \text{ МэВ}$) нейтронов $2,4 \cdot 10^{18} \text{ нейтр/см}^2$. Указанные температуры облучения соответствовали аустенитному состоянию сплавов TiNi и Mn–Cu. Сплав Cu–Al–Ni при этом находился в мартенситном или двухфазном (в интервале перехода «аустенит → мартенсит») состояниях. Изотермическое облучение чередовали с термоциклами (110 ↔ 350 К) через интервал температур мартенситных переходов в сплавах. В ходе облучения непрерывно измеряли удельное электросопротивление образцов четырехзондовым методом. Получаемые в ходе термоциклирования температурные зависимости электросопротивления позволяли судить о температурной кинетике мартенситных превращений в исследуемых материалах.

Результаты экспериментов показали следующее.

Сплав TiNi. При охлаждении сплав претерпевает превращения из кубической решетки в ромбоэдрическую и далее в моноклинную ($B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$). На рис. 1 показаны температурные зависимости удельного электросопротивления сплава при охлаждении, полученные при разных флюенсах быстрых нейтронов. Зависимости, изображенные на рисунке, с нарастанием флюенса сдвигаются влево по температурной шкале и вверх по шкале сопротивления. Это означает, что критические температуры мартенситных переходов в сплаве TiNi снижаются с нарастанием флюенса, а сопротивление возрастает. Температура перехода $R \rightarrow B19'$ (M_s), например, уменьшается на 38 К после облучения флюенсом $2,4 \cdot 10^{18} \text{ нейтр/см}^2$. Можно также видеть, что температурный гистерезис превращений увеличивается.

Электросопротивление сплава TiNi увеличивается практически прямо пропорционально флюенсу быстрых нейтронов. Сопротивление в аустенитном состоянии (при 340 К) возрастает на 8,3 % к концу эксперимента. Важной особенностью сплава TiNi является то, что скорость роста сопротивления в мартенситном состоянии (при 130 К) оказывается почти в 3 раза большей, чем в аустенитном.

Заметим, что указанные закономерности выявляются при облучении как в аустенитном (при 330 К) состоянии, так и в мартенситном при 120 К [5,6].

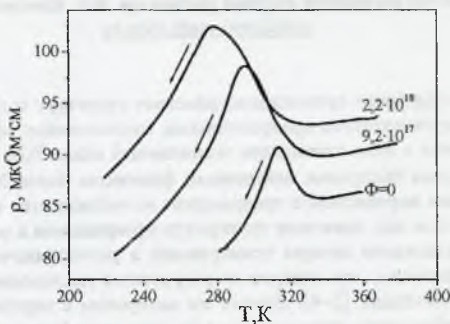


Рис. 1. Температурные зависимости электросопротивления при охлаждении сплава TiNi в необлученном состоянии и после облучения различным флюенсом нейтронов при температуре 330 К

Сплав Cu-Al-Ni. Сплав при уменьшении температуры претерпевает превращение из структуры DO₃ в длиннопериодную структуру типа 18R. Электросопротивление сплава Cu-Al-Ni растет линейно с увеличением флюенса и к окончанию эксперимента оно увеличивается на 8–9 %, что сравнимо с ростом сопротивления у никелида титана в аустенитном состоянии. Однако, в отличие от сплава TiNi, темп нарастания электросопротивления оказался практически одинаковым как для мартенситного, так и для аустенитного состояний (рис. 2).

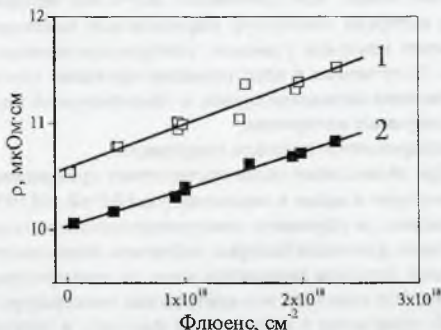


Рис. 2. Зависимости электросопротивления сплава Cu-Al-Ni при температуре 250 К (1), соответствующей мартенситному состоянию сплава, и 350 К (2), соответствующей аустенитному состоянию, от флюенса нейтронов.

После облучения в двухфазном или мартенситном состоянии (при 320–340 К) в сплаве Cu–Al–Ni имеет место значительное (на 25–30 К) повышение температур обратного превращения «мартенсит→аустенит». Такое повышение наблюдается однократно только в процессе первого нагревания, следующего непосредственно за изотермическим облучением, и пропорционально интегральной дозе нейтронов. При последующих термических циклах мартенситный переход происходит при меньших температурах и с увеличением интегрального значения флюенса гистерезисная температурная зависимость электросопротивления смещается в направлении низких температур (рис. 3). Таким образом, действие радиации в сплаве Cu–Al–Ni приводит к устойчивому уменьшению критических температур превращения и к однократному (неустойчивому) возрастанию температур обратного превращения.

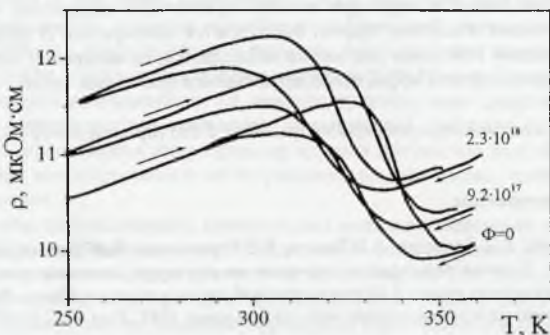


Рис. 3. Температурные зависимости электросопротивления сплава Cu–Al–Ni в необлученном состоянии и после облучения различным флюенсом нейтронов при температуре 330 К

Сплав Mn–Cu. В сплаве реализуется $\text{ГЦК} \leftrightarrow \text{ГПУ}$ мартенситное превращение близкое по кинетике к переходу II рода. В процессе облучения в сплаве наблюдается весьма незначительное изменение сопротивления, которое к концу эксперимента при флюенсе $2,4 \cdot 10^{18}$ нейтр/см² увеличивается лишь на 0,2%. Подобное незначительное изменение свойств, согласно нашим экспериментам, происходит и в образцах меди технической чистоты, облучаемых в тех же условиях. Температуры мартенситного превращения в сплаве Mn–Cu также практически не изменяются с ростом флюенса.

Сравнивая результаты, полученные на различных материалах, прежде всего обратим внимание на то обстоятельство, что в двух из трех изученных сплавах (TiNi, Cu–Al–Ni) температуры мартенситных переходов резко снижаются начиная с самых первых часов нейтронного облучения. Одновременно происходит значительное возрастание электросопротивления. Однако в сплаве Mn–Cu изменения свойств практически не происходит. Очевидно, что различие в поведении материалов связано с различием их структуры и главной особенностью первых двух сплавов является их упорядоченность. Уменьшение степени дальнего порядка при облучении является причиной ускоренного возрастания электросопротивления сплавов TiNi и Cu–Al–Ni, одновременно вызывая снижение температур превращений в этих материалах. В противоположность этому, в неупорядоченном сплаве Mn–Cu температурная кинетика мартенситных превращений и электросопротивление практически не изменяются, поскольку концентрация вакан-

сий, межузлий и их комплексов при флюенсах, меньших $3 \cdot 10^{18}$ нейтр/см², невелика, и эти радиационные дефекты лишь в малой степени изменяют макроскопические свойства сплава.

Указав на общие закономерности в поведении упорядоченных сплавов при облучении, следует обратить внимание и на некоторые отличительные особенности. Так для никелида титана характерна разница в скорости нарастания сопротивления с флюенсом в аустенитном и мартенситном состояниях, возможная природа которой обсуждалась в работе [6] при анализе поведения сплава в процессе низкотемпературного (при 120 К) облучения. В монокристалле Cu–Al–Ni имеет место однократный эффект повышения температуры обратного превращения после облучения. Как показано специальными экспериментами [7], такое повышение вероятнее всего обусловлено закреплением межфазных и двойниковых границ радиационными дефектами вследствие потери их когерентности. Поскольку после перехода кристалла в аустенитное состояние границы исчезают, то тем самым в структуре металла практически полностью «стирается память» об облучении и поэтому эффект наблюдается однократно. В поликристаллическом образце сплава TiNi такое явление не наблюдается, по-видимому, вследствие того, что радиационные дефекты эффективно поглощаются границами зерен.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 05-08-33547).

Список литературы

1. А.М.Роговский, Е.Н.Логунцев, А.Н.Занков, Е.В.Серовикова, В.А.Цыгвинцев, И.Н.Ковалев, Г.Р.Гадаскин. Влияние реакторного излучения на структуру, механические свойства и память формы никелида титана // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1991. Вып. 3, С. 60-63.
2. С.Ф.Дубинин, С.Г.Теплоухов, В.Д.Пархоменко. Влияние атомного порядка на температуры мартенситных превращений сплава Ti₄₉Ni₅₁ // Физ. мет. и металловед. 1994, Т. 78, Вып. 2, С. 84-90.
3. В.В.Брык, Д.Г.Малыхин, Ю.И.Поляков, С.Н.Слепцов, Т.П.Черняева. Диспергирование и аморфизация никелида титана при механическом и радиационном воздействии // Радиационное материаловедение. Харьков. 1990, Т. 6, С.190-197.
4. Дубинин С.Ф., Теплоухов, Пархоменко В.Д. Структурное состояние никелида титана, облученного быстрыми нейтронами // Физ. мет. и металловед. 1996. Т.82, Вып.3, С. 136-141.
5. Беляев С.П., Волков А.Е., Коноплева Р.Ф., Назаркин И.В., Разов А.И., Соловей В.Л., Чеканов В.А. Влияние нейтронного облучения на мартенситные превращения и эффект памяти формы в сплаве TiNi // Физ. твердого тела, 1998. Т.40, № 9. С. 1705-1709.
6. Беляев С.П., Волков А.Е., Коноплева Р.Ф., Назаркин И.В., Разов А.И., Соловей В.Л., Чеканов В.А. Кинетика радиационных повреждений и мартенситные превращения в сплаве TiNi в процессе облучения нейтронами // Физика твердого тела. 2001. Т. 43, Вып. 11, С.2070-2075.
7. Беляев С.П., Волков А.Е., Коноплева Р.Ф., Назаркин И.В., Пульнев С.А., Соловей В.Л., Чеканов В.А. Мартенситное превращение в монокристалле сплава медь-алюминий-никель после кратковременного нейтронного облучения // Физика твердого тела. 2003. Т. 45, Вып. 2, С. 321-326.