

## **II. Влияние облучения на изменение микроструктуры и свойств металлов и сплавов**



## **Влияние облучения быстрыми нейтронами на структурно-фазовые изменения в сплавах НЗ6 легированных фосфором**

В. Л. Арбузов, Б. Н. Гощицкий, С. Е. Данилов, А. В. Карькин, В. Д. Пархоменко  
Институт Физики Металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия. (arbuzov@imp.uran.ru)

Аустенитные сплавы Fe-Ni являются хорошим модельным объектом для изучения закономерностей и механизмов радиационного повреждения конструкционных нержавеющих сталей. Легирование фосфором оказывает сильное влияние на свойства этих сталей: с одной стороны понижает радиационное распухание, а с другой стороны является вредной охрупчивающей примесью.

В работе исследовано влияние облучения быстрыми нейтронами в зависимости от дозы облучения на формирование и свойства вакансионных кластеров и структурно-фазовые изменения (расслоение) в сплавах НЗ6 и НЗ6 легированных фосфором.

Для исследований использовались сплавы Fe-36.5%Ni (НЗ6) и Fe-36.5%Ni-0,1%P (НЗ6Р) закаленные от 1373 К. Облучение нейтронами ( $E > 0,1$  МэВ) проводилось на реакторе ИВВ-2 при температуре 340 К в диапазоне флюенсов  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} - 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ .

Показано, что при облучении нейтронами сплавов НЗ6 и НЗ6Р образуются вакансионные кластеры, которые диссоциируют при температурах выше 450 К. При этом легирование фосфором увеличивает концентрацию этих кластеров.

Такие вакансионные кластеры являются эффективными стоками для точечных дефектов.

При увеличении флюенса нейтронов, концентрация вакансионных кластеров увеличивается и, соответственно, уменьшается диффузионная длина мигрирующих вакансий, что в пределе может привести к подавлению радиационно-индуцированных процессов. В работе проведен анализ влияния фосфора на радиационно-индуцированные процессы и сопоставление каскадного (нейтронного) и бескасадного (электронного) облучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 04-02-16053).

## **Влияние имплантации ионов $B^+$ и $Ag^+$ на состав поверхностных слоев фольги Ni-Cu**

В. Я. Баянкин\*, Ф. З. Гильмутдинов\*, А. А. Колотов\*, С. Н. Коршунов\*\*

\*Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск, Россия (less@fti.udm.ru)

\*\*РНИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Исследовалось влияние имплантации ионов бора и аргона на изменения состава поверхностных слоев фольги Ni-Cu как с облучаемой (прямой) стороны, так и необлучаемой (обратной) при вариации плотности ионного тока.

В качестве объекта исследований использовалась прокатанная фольга состава 40ат.%Ni - 60ат.%Cu толщиной 40 мкм. Облучение осуществлялось на установке ИЛУ-2 с параметрами:  $E=40$  кэВ,  $D=1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>,  $j=(10-50)$  мкА/см<sup>2</sup>. Рентгеноэлектронный анализ состава проводился на спектрометре ЭС-2401 с ионным травлением поверхности образцов, расчетная скорость травления – 1,0 нм/мин. Анализ проводился на глубину до 20-25 нм. Кроме того, с помощью микротвердомера ПМТ-3 измерялась микротвердость с прямой и обратной стороны образцов (нагрузка на индентор 10 г) и методом рентгеноструктурного анализа определялось межатомное расстояние образцов до и после облучения.

Выявлено, что облучение ионами как  $B^+$ , так и  $Ag^+$  приводит к изменению состава поверхностных слоев с обеих сторон фольги, зависящему от плотности тока. Причем, при имплантации ионов  $B^+$  наблюдается некоторое пороговое значение плотности тока, при превышении которого довольно резко изменяются значение микротвердости и содержание бора в поверхностном слое с обратной стороны фольги. Кроме того, показано, что, в отличие от исходных образцов, где зависимость отношения содержания Ni/Cu по глубине – монотонна, в облученных образцах независимо от типа ионов формируется немонотонная зависимость, характеризующаяся минимумами и максимумами отношения Ni/Cu. Причем, эта зависимость – также немонотонна от плотности ионного тока. Показано, что межатомное расстояние облученных образцов отличаются от исходных и в пределах погрешности измерений сохраняется при всех плотностях тока, в отличие от случая имплантации ионов  $Ag^+$  при 50 мкА/см<sup>2</sup>, что может свидетельствовать о сохранении исходной атомной структуры после облучения (кроме последнего варианта) независимо от типа ионов и плотности тока.

Можно предположить, что путями аномальной миграции атомов бора до обратной стороны фольги могут быть линейные и планарные дефекты. Образцы сплава – прокатаны, т.е. структуры их являются исходно сильнонеравновесными, напряженными и обладающими высокой плотностью дислокаций. Возможно, что ионное облучение может вызывать некоторую релаксацию исходно неравновесной структуры (например, вследствие генерации упругих волн). Ионная имплантация генерирует упругие ударные волны, на фронте которых происходит распространение атомов бора по объему, одновременно имеют место трансформация дефектной структуры и, очевидно, частичная релаксация остаточных напряжений в объеме образцов. При этом атомы бора, как поверхностно-активного элемента, обогащают поверхность.

Формирование немонотонной зависимости отношения Ni/Cu в поверхностных слоях может быть связано со структурно-фазовыми превращениями, инициируемыми ионной бомбардировкой и вызывающими локальные градиенты механических напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №02-02-16670)

### **Уменьшение склонности к локальной коррозии оксидированного сплава Zr-1%Nb облучением высокоинтенсивными пучками ионов азота**

Т. А. Белых\*, Н. В. Гаврилов\*, Д. Р. Емлин\*, А. М. Мурзакаев\*,  
Л. П. Синельников\*\*, А. Н. Тимохин\*\*, А. Г. Трифанов\*\*

\*Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (erd@ier.uran.ru)

\*\*ФУП «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия

Zr-Nb сплавы, широко применяемые в реакторостроении, помимо медленной сплошной коррозии обнаруживают склонность к быстрой локальной коррозии [1], которая и определяет срок эксплуатации изделий из данных сплавов. Причинами возникновения локальной коррозии могут быть: макро- и микродефекты структуры пассивирующей оксидной пленки, а также локальные включения интерметаллидных фаз, которые приводят к развитию электрокоррозии – более быстрой, чем химическая коррозия. Ранее нами показано [2], что облучение высокоинтенсивными пучками ионов азота гетероструктур оксидная пленка-сплав приводит к замедлению сплошной коррозии. В данной работе исследовалось влияние облучения импульсно-периодическими пучками ионов азота (длительность импульса 1 мс, частота 25 Гц, плотность тока 3 мА/см<sup>2</sup>, энергия 30 кэВ) на склонность этих же гетероструктур к локальной коррозии. Изменение морфологии поверхности контролировалось посредством электронной микроскопии, коррозионные испытания проводились в твердом электролите (порошок Li + Li<sub>2</sub>O) в течение 50 часов при 520 °С. Определены оптимальные режимы ионно-лучевой обработки: 350 < T<sub>импл.</sub> < 450 °С и доза облучения 10<sup>17</sup>-10<sup>18</sup> см<sup>-2</sup>, обеспечивающие уменьшение доли поверхности, пораженной локальной коррозией, с 20-30 % (контрольные образцы) до 0.1-0.2 % (при оптимальных режимах имплантации). Электронно-микроскопические исследования показали изменение морфологии пленки: исходно рыхлые пленки становятся более плотными, в них обнаруживается текстура в пределах исходных кристаллитов, сглаживаются дефекты от механической обработки.

Обработка высокоинтенсивными пучками ионов азота улучшает структуру оксидных покрытий и гомогенизирует их состав, тем самым повышая пассивирующие свойства исходных, созданных термическим окислением пленок.

#### **Литература**

1. Перехожев В. И., Синельников Л. П., Тимохин А. Н. и др., Металловедение и термообработка металлов, 2003, № 10, с. 26-31
2. Белых Т. А., Гаврилов Н. В., Емлин Д. Р. и др., Физика и химия обработки материалов, 2003, №6, с. 14-20

## **Изменение температурной кинетики мартенситных превращений в сплавах TiNi и Cu-Al-Ni в процессе облучения нейтронами в низкотемпературной гелиевой петле**

С. П. Беляев, Р. Ф. Коноплева, И. В. Назаркин, В. А. Чеканов  
Петербургский институт ядерной физики РАН, Гатчина, Россия (spb@pnpi.spb.ru)

Проведены исследования мартенситных превращений в сплаве TiNi эквиатомного состава и монокристалле Cu-13,4%Al-5%Ni в процессе облучения в низкотемпературной гелиевой петле реактора ВВР-М при температурах 120-350 К. Использовали метод измерения электросопротивления, который является чувствительным как по отношению к радиационным дефектам кристаллической решетки, так и к мартенситным фазовым переходам в кристаллах.

Установлено, что критические температуры мартенситных переходов в сплавах TiNi снижаются с нарастанием флюенса по закону  $\Delta T_{ph} = d[\exp(-\Phi/\Phi_0) - 1]$ , где  $\Delta T_{ph}$  – приращение температуры, соответствующей структурному превращению,  $\Phi$  – флюенс,  $d$  и  $\Phi_0$  – 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 сопротивления и температурной кинетики мартенситных превращений. Определена энергия активации возврата свойств. Предполагается, что изменение кинетики превращений при облучении и последующем отжиге связано с изменением степени дальнего порядка  $S$  упорядоченного твердого раствора.

В сплаве Cu-Al-Ni после облучения в двухфазном или мартенситном состоянии имеет место повышение температур обратного превращения «мартенсит  $\rightarrow$  аустенит» на 25-30 К. Такое повышение наблюдается однократно только в процессе первого нагревания сразу после изотермического облучения и пропорционально интегральной дозе нейтронов. При последующих термических циклах мартенситный переход происходит при меньших температурах и с увеличением флюенса гистерезисная температурная зависимость электросопротивления смещается в направлении низких температур. Таким образом, действие радиации приводит к устойчивому уменьшению критических температур превращения и к однократному (неустойчивому) возрастанию температур обратного превращения. Первый из этих эффектов обусловлен разупорядочением кристаллической решетки при облучении, аналогично тому, что наблюдается и в сплавах на основе TiNi. Однократный же эффект, по-видимому, связан с нарушением когерентности межфазных и междоменных границ в ходе облучения. Подвижность границ при этом уменьшается и требуется дополнительный термодинамический стимул для развития превращения. Специальные эксперименты косвенно подтверждают это предположение.

## Структура и электронный транспорт в атомно-разупорядоченном соединении MnSi

И. Ф. Бергер<sup>1</sup>, А. Е. Карькин<sup>2</sup>, В. И. Воронин<sup>2</sup>, Ю. Н. Акшенцев<sup>2</sup>, и Б. Н. Гощицкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт химии твердого тела УрО РАН, ул. Первомайская, 91, Екатеринбург 620219, Россия

<sup>2</sup>Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург 620219, Россия

В соединении MnSi с кубической структурой  $B20$  (пространственная группа  $P2_13$ ), не содержащей центра инверсии, при подавлении магнитного упорядочения высоким давлением возникает не Ферми жидкостного состояние [1], благоприятствующее появлению сверхпроводимости со спин-триплетной симметрией спаривания [2]. Здесь мы исследуем влияние нейтронного облучения на структурное состояние и электронные транспортные свойства поли- и монокристаллических образцов соединения MnSi, который является идеальным объектом для исследования эффектов разупорядочения нейтронографическим методом, так как Mn и Si имеют разные по знаку и близкие по величине амплитуды рассеяния.

Флюенс	0	$5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$
$a$ , Å	4.5606(1)	4.5738(1)
Mn $x$	0.1387(8)	0.1355(8)
Si $x$	0.8461(6)	0.8479(6)
$B_{\text{iso}}$	0.10(2)	0.24(2)

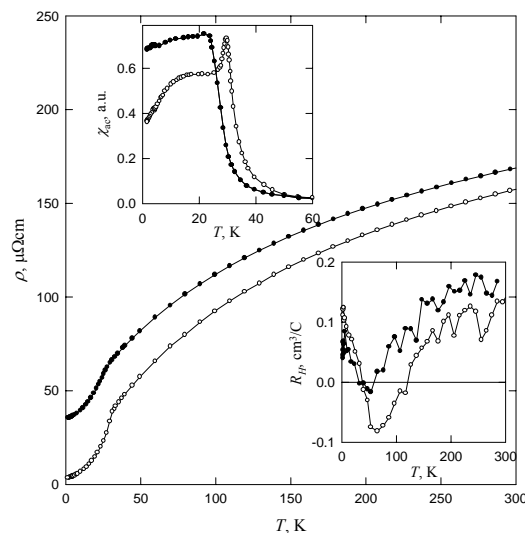
В таблице приведены структурные данные исходного и облученного быстрыми нейтронами образцов MnSi. Видно, что после облучения увеличивается параметр решетки ( $\approx 0.3\%$ ), примерно в 2 раза возрастает фактор Дебая – Валлера, указывающий на появление некоррелированных статических смещений атомов из узлов решетки. Такие эффекты свидетельствуют о разупорядочении атомов в решетке.

Приведенные на рисунке температурные зависимости электросопротивления  $\rho$  и постоянной Холла  $R_H$  свидетельствуют о сложном (многозонном) характере электронных состояний в этом соединении. Согласно измерениям ас восприимчивости  $\chi(T)$  происходит уменьшение температуры магнитного упорядочения.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований ОФН РАН "Нейтронные исследования структуры вещества и фундаментальных свойств материи" (Проект № 14 УрО РАН/договор № 26/04), Программой "Нейтронные исследования конденсированных сред" (Государственный контракт № 40.012.1.1.1150), Проектом РФФИ № 04-02-1653 и Грантом Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-639.2003.2.

### Литература

1. C. Pfleiderer *et al.*, Phys. Rev. B **55**, 8330 (1997).
2. E. Bauer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 027003 (2004).



## **Зависимость механических свойств и состава поверхности титанового сплава от плотности ионного тока**

П. В. Быков, Ф. З. Гильмутдинов, С. Г. Быстров, В. Я. Баянкин  
Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск, Россия (less@fti.udm.ru)

Многие детали, узлы машин и целые конструкции в процессе эксплуатации постоянно подвергаются знакопеременным нагрузкам, много меньших предела текучести материалов, под действием которых с поверхности развиваются трещины, приводящие, в конце концов, к разрушению изделия. Так как при изгибе амплитуда возникающих в материале напряжений максимальна в поверхностном слое, то изменения состава и микроструктуры поверхностных и приповерхностных слоев материала путем ионной имплантации может влиять на динамику образования и развития трещины, таким образом, ионное облучение может оказывать влияние на усталостную прочность материалов. Однако остается до конца невыясненным вопрос о влиянии параметров облучения (доза, плотность тока и энергия ионов) и критерии выбора типа внедряемых ионов на увеличение усталостной прочности металлов и сплавов.

В качестве имплантанта были выбраны кремний и аргон вследствие сравнительно большой атомной массы (для формирования большой каскадной области при взаимодействии с матрицей) и лучших в комплексе механических свойств соединения Ti-Si.

Целью данной работы является сравнительное исследование влияния плотности тока ионов  $\text{Si}^+$  и  $\text{Ar}^+$  на механические свойства и состав поверхности титанового сплава.

Облучение образцов (Ti-3,4Al-Mn) проводили на ионно-лучевой установке типа ИЛУ (РНИЦ «Курчатовский институт», Москва), в вакууме не хуже  $10^{-3}$  Па. Параметры облучения ионами кремния и аргона:  $E = 40$  кэВ,  $D = 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> в диапазоне плотностей ионного тока 10-50 мкА/см<sup>2</sup>.

Микротвердость облученных образцов увеличивается на 20–60 %, по сравнению с исходным значением. Максимальное увеличение микротвердости (нагрузка на индентор 20 г) достигается при облучении с плотностью ионного тока 10 мкА/см<sup>2</sup>, как аргоном так и кремнием. Усталостные испытания показали, что образцы, облученные ионами  $\text{Si}^+$  и  $\text{Ar}^+$  выдержали большее количество циклов до разрушения, по сравнению с необлученными.

Толщина модифицированного слоя в образцах облученных ионами кремния во всем диапазоне плотностей ионного тока превышает проективный пробег ионов кремния в титане.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 02-02-16670).

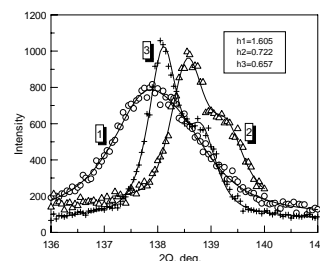


## Структурное состояние $\text{Fe}_{0.61}\text{Ni}_{0.36}\text{Ti}_{0.03}$ до и после облучения быстрыми нейтронами

В. И. Воронин, И. Ф. Бергер, В. В. Сагарадзе, Б. Н. Гощицкий  
ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия (voronin@imp.uran.ru)

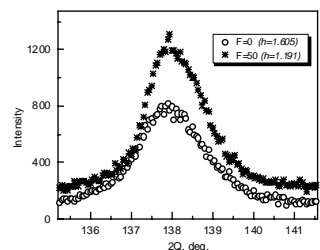
Методами рентгеновской (на тонких фольгах) и нейтронной (на массивных образцах) дифракции исследована реальная кристаллическая структура интерметаллидов одного состава  $\text{Fe}_{0.61}\text{Ni}_{0.36}\text{Ti}_{0.03}$ , но с разной предварительной обработкой. Вначале все образцы были отожжены при 1100 °С в продолжение 30 минут. Затем все три фольги (Ф1, Ф2, Ф3) и массивный образец (М1) были закалены в воду. Далее фольга Ф1 была подвергнута пластической деформации, Ф2 состарена при 650 °С в течение 30 минут. Второй массивный образец (М2) был закален в масло и затем состарен, как и Ф2 при 650 °С в течение 30 минут.

На рис. 1 показан фрагмент рентгенограмм фольг, рефлекс (331). Рефлекс (331) наиболее уширен в Ф1, что указывает на присутствие значительных искажений в решетке (дефектов и напряжений). Также уширены, но в меньшей степени, рефлексы в Ф2 и Ф3. Нейтронографические исследования показали, что в массивных образцах искажения еще менее заметны, ширины линий на нейтронограммах близки к эталонным.



Далее, все образцы были облучены быстрыми нейтронами при температуре 80 °С, флюенсами 5, 10 и  $50 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ .

Исследования облученных образцов показали, что структурное состояние меняется с ростом флюенса, причем наибольшие изменения наблюдаются в пластически деформированном образце (Ф1). На рис. 2. показан рефлекс (331) от Ф1 до и после облучения максимальным флюенсом  $50 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ . Видно, что после облучения в 1.35 уменьшилась ширина рефлекса. Это указывает на радиационно-стимулированный отжиг дефектов, возникших в процессе деформации. В работе дан подробный анализ происходящих структурных изменений в образцах с различным исходным состоянием после облучения быстрыми нейтронами. Для исключения влияния поверхностных эффектов, возможных в тонких фольгах и наблюдаемых с помощью рентгеновской дифракции, был выполнен анализ структурного состояния в объеме массивных образцов нейтронографическим методом.



Работа поддержана Программой фундаментальных исследований ОФН РАН "Нейтронные исследования структуры вещества и фундаментальных свойств материи" (Проект № 14 УрО РАН/ договор №26/04), Программой "Нейтронные исследования конденсированных сред" (Государственный контракт № 40.012.1.1.1150), Проектом РФФИ № 04-02-1653 и Грантом Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-639.2003.2.

## **Flux effect on void swelling of austenitic and ferritic/martensitic steels: A review of recent data and insights**

F. A. Garner<sup>1</sup>, N. I. Budylkin<sup>2</sup>, Yu. V. Konobeev<sup>3</sup>, S. I. Porollo<sup>3</sup>, V. S. Neustroev<sup>4</sup>, V. K. Shamardin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Pacific Northwest National Laboratory, USA (frank.garner@pnl.gov)

<sup>2</sup>A. A. Bochvar Institute of Non-organic Materials, Russia

<sup>3</sup>Institute of Physics and Power Engineering, Russia

<sup>4</sup>Research Institute of Atomic Reactors, Russia

Void swelling of PWR austenitic internals has recently been identified as a materials issue that might impact license extension. Data are now becoming available from PWRs that indicate swelling is in progress but still at relatively low levels. Extrapolation of these data to higher, end-of-life exposures requires a better understanding of the parametric sensitivity of swelling. Swelling equations being developed for both austenitic and ferritic-martensitic steels for use in various Generation IV and ADS reactor concepts also require such understanding.

Earlier published studies conducted in Japan, USA and Russia have shown that the atomic displacement rate is unexpectedly one of the most important variables. This paper presents data derived from a number of irradiations conducted on both Russian and Western steels irradiated in a variety of reactors. All data sets support the conclusion that lower dpa rates lead to greater swelling of austenitic and ferritic-martensitic steels irradiated at all reactor-relevant temperatures. Several published data sets are presented that were previously misinterpreted because the strong effect of dpa rate was not recognized at the time of publication.

## **Влияние на критический ток ВТСП ленты (Bi2223+0,8%U-238)/Ag гамма-облучения, вызывающего фотоделение ядер урана**

И. Н. Гончаров\*, О. Д. Маслов\*, И. Ф. Волошин\*\*, А. В. Калинов\*\*, Л. М. Фишер\*\*

\*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна 141980 Россия (ingonch@sunhe.jinr.ru)

\*\*Всероссийский электротехнический институт, Москва, Россия

Вплоть до настоящего времени широкомасштабное производство длинномерных токонесущих лент из ВТСП освоено только для системы на основе Bi2223 в серебряной матрице. Однако, они обладают сравнительно большой анизотропией критического тока и невысокими значениями  $J_c$  в области температур жидкого азота и магнитных полей, превышающих 0,5 Тесла. Повысить  $J_c$  возможно в результате образования дополнительных центров пиннинга в виде треков от быстрых тяжелых ионов, в том числе от осколков деления ядер урана, введенного в ВТСП. Описанные в литературе результаты получены для ВТСП, допированных U-235, после реакторного облучения тепловыми нейтронами. Однако, применение этого метода для Bi2223/Ag лент ограничено из-за возникновения высокого уровня радиоактивности от изотопа Ag110m с периодом полураспада  $T_{1/2} \approx 250$  сут. и существенного повышения стоимости ленты от использования очень дорогого урана с высокой степенью обогащения U-235. Одним из авторов настоящей работы для устранения этих недостатков предложено [1] использовать

фотоделение ядер U-238 в области энергий гигантского резонанса ( $E_\gamma \sim 10 \div 20$  МэВ). В данной работе приводятся результаты полученные после облучения гамма-квантами с  $E_\gamma \leq 24$  МэВ на микротроне МТ-25 (ток электронов 15 мкА) опытной партии образцов ленты (Bi2223+0,8%U-238)/Ag. В частности, рассматриваются: уровень наведенной радиоактивности и временной характер его спада; изменение  $J_c$  образцов этой ленты (а также контрольных образцов, не содержащих урана) с ростом дозы; возможности существенного увеличения в образцах содержания урана (свыше предельного допустимого значения  $\sim 0,6$  % при равномерном его размещении в ВТСП).

#### Литература

1. Гончаров И. Н., препринт ОИЯИ Е8-99-270 (1999); in Proceedings of EUCAS-99, (Sitges, Spain, 14-17 September, 1999) Inst. Phys. Conf. Ser. **167**, p. 559, 2000 IOP Publishing Ltd.

### **Изменения структуры и текстуры в оболочечных трубах из сплавов на основе циркония при ионно-плазменном воздействии**

М. М. Грехов, Ю. А. Перлович, М. Г. Исаенкова, В. А. Фесенко, Б. А. Калинин, В. Л. Якушин  
Московский инженерно-физический институт (государственный университет),  
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31 (masim@mail.ru)

Более 20 лет назад было установлено, что при облучении металлических материалов ионами с энергией в несколько кэВ происходит существенное изменение структуры и текстуры материалов [1, 2]. Исследования рентгеновскими методиками облученной поверхности показали, что толщина слоя структурных и текстурных изменений (десятки микрон) на несколько порядков больше зоны торможения ионов (несколько нанометров). Такой результат ионного облучения был назван эффектом дальнего действия. Так как в настоящее время широко распространены методики, использующие ионно-плазменное облучение для легирования (модифицирования) поверхности, то исследование эффекта дальнего действия актуально.

В настоящей работе приводятся результаты изучения структурных и текстурных изменений в объеме оболочечных труб их сплавов [Zr-1%Nb] и [Zr-1%Nb-1%Sn], подвергнутых импульсной плазменной обработке. Данную обработку предполагается использовать для повышения коррозионной стойкости оболочечных труб, что позволит увеличить их ресурс и, тем самым, повысить степень выгорания топлива. Основным компонентом обработки высокотемпературной импульсной плазмой (ВТИП-обработки) в данном случае является направленный поток ионов гелия. Изучение ионно-плазменного воздействия на материал представляет интерес, связанный с тем, что фазовые превращения  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ , происходящие при импульсно-плазменном нагреве и последующем охлаждении, формируют текстуру поверхности, которая является индикатором изменения температуры по глубине.

Проведенные исследования показали существенное различие в изменении структуры и текстуры материала при “мягком” (плотность потока энергии плазмы  $Q=28$  Дж/см<sup>2</sup>) и “жестком” ( $Q=50$  Дж/см<sup>2</sup>) режимах обработки. Если при “мягкой” обработке по всей

толщине стенки трубы (0.7 мм) происходит существенное изменение исходной текстуры, то при “жесткой” обработке эти изменения происходят на глубине до 60 мкм. То есть, с увеличением плотности потока энергии плазмы эффект дальнего действия уменьшается.

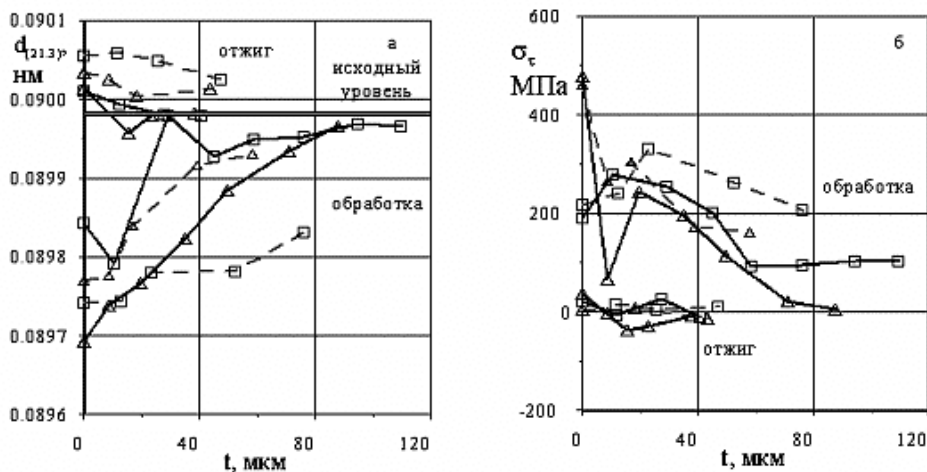


Рис. 1 а - послойное изменение межплоскостного расстояния, линия (21.3), б - послойное изменение макронапряжений. Пунктир - сплав Zr-1%Nb, сплошная линия - сплав Zr-1%Nb-1%Sn.  $\Delta$  - мягкий режим обработки,  $\square$  - жесткий режим обработки.

Структурные изменения при “жесткой” обработке проявляются за счет искажения кристаллической решетки полем напряжений, вызванного послойной неоднородностью объемных изменений  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  фазовых превращений (в слое толщиной до 40 мкм). Тогда как при “мягкой” обработке, изменения вызваны преимущественно распространением ударных волн, возникающих при взаимодействии плазмы с поверхностью материала. На рис. 1а показана зависимость изменения межплоскостного расстояния ( $d_{(21.3)}$ ) по толщине образца. В приповерхностных слоях  $d_{(21.3)}$  (толщиной до 30-40 мкм) существенно меньше исходного значения из-за возникающих больших растягивающих макронапряжений (рис. 1б).

При “мягкой” плазменной обработке на поверхности возникают окружные растягивающие макронапряжения рис. 1б, тогда как при “жесткой” обработке пик макронапряжений находится на некоторой глубине (около 20 мкм) от поверхности. Это связано с релаксацией напряжений на поверхности за счет большего разогрева и большей зоны плавления.

Характер распределения макронапряжений по глубине для обоих сплавов идентичен, но для сплава [Zr-1%Nb-1%Sn] спад напряжений до значения отожженного образца происходит медленнее, что может быть связано с различием значений физических свойств исследуемых сплавов.

Проведенный стабилизирующий отжиг (580 °C / 24 часа) восстанавливает субструктурные характеристики и снимает макронапряжения, но текстурные изменения после отжига сохраняются. Помимо этого при отжиге в подповерхностном слое образуется повышенное содержание  $\beta$ -Zr фазы, что свидетельствует о перераспределении атомов Nb при плазменном облучении.

## Литература

1. Рентгеновское изучение структурных изменений в объеме деформированных металлов под воздействием ионного облучения / Евстюхин А. И., Перлович Ю. А., Писарев А. А. и др. Известия АН СССР. Металлы. 1984, №4. С.139-144.
2. Рентгенографическое исследование структурных изменений в молибдене, облученном ионами гелия. Калинин Б. А., Перлович Ю. А., Фесенко В. А., Якушин В. Л. и др. Поверхность. Физика, химия, механика. 1984. №3. С.140-147.

## Влияние ионного облучения на динамику развития микротрещины в никеле и алюминии в условиях растяжения

А. Ю. Дроздов, М. А. Баранов, В. Я. Баянкин

Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск, Россия (less@fti.udm.ru)

На примере монокристаллов никеля и алюминия методом молекулярной динамики проведен анализ развития микротрещины в условиях облучения и одноосного растяжения. Целью работы являлось исследование динамики распространения трещины при растяжении до и после ионного облучения ионами инертных газов и выяснение роли особенностей потенциалов межатомного взаимодействия.

Компьютерный эксперимент проводился с использованием программы, основанной на применении метода молекулярной динамики. Система многочастичных уравнений Ньютона решалась численными методами. Отвод энергии от системы осуществляется введением вязких сил. Для описания взаимодействия между атомами использовались потенциалы парного взаимодействия, рассчитанные на основе модельного псевдопотенциала Хейне–Абаренкова–Анималу с функцией экранировки Шоу. Начальная конфигурация атомов кристаллита представляла собой трехмерную пленку толщиной 20 атомных слоев. Выбор граничных условий и модель микротрещины подробно описаны в работе[1].

В области устья трещины моделировалось облучение ионами аргона с энергией 20 кэВ. За время 8000÷10000 т термодинамические параметры системы – температура  $T$  и потенциальная энергия  $U$  стабилизировались около определенного фиксированного значения. После достижения кристаллитом стабильного на исследуемых временах состояния производилось одноосное растяжение вдоль направления  $[010]$ . Относительная деформация составляла  $\epsilon = 5, 10, 15$  и  $20 \%$ .

Выявлено, что в необлученных образцах характер распространения микротрещины, как в никеле, так и в алюминии вязкий. Исходная микротрещина расположена в плоскости  $(010)$ . При растяжении на  $15 \%$  в никеле трещина начинает распространяться в плоскости  $(111)$ , которая является плоскостью легкого скольжения для ГЦК кристаллов. Анализ функции радиального распределения атомов показывает, что после ионного облучения кристаллит сохраняет ГЦК решетку, фазовых переходов не наблюдается. В алюминии трещина заживает практически полностью, а в никеле частично, что приводит к увеличению прочности кристаллита, наблюдаемой для облученных образцов.

Проведено сравнение распространения трещины в металлах с различным типом решетки (ОЦК, ГЦК, ГПУ) при одноосном растяжении на атомном уровне. Выявлено влияние типа кристаллической решетки и особенностей потенциалов межатомного взаимодействия на эволюцию микротрещины при одноосном растяжении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 02-02-16670).

## Литература

1. М. А. Баранов, А. Ю. Дроздов, В. Г. Чудинов, В. Я. Баянкин. Атомные механизмы развития микротрещины в чистых ГЦК- и ОЦК-металлах и с примесью водорода // ЖТФ. 2000. Т. 70, вып. 4, с. 46-51.

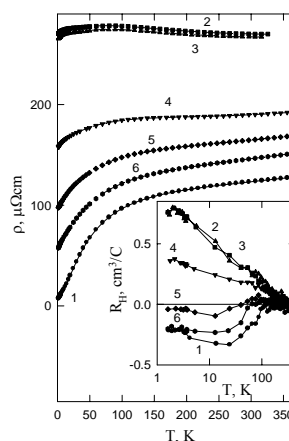
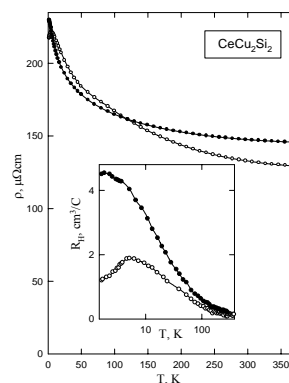
## Влияние атомного разупорядочения на электронные состояния систем с тяжелыми фермионами

А. Е. Карькин\*, А. С. Кривошеков\*, Ю. Н. Акшенцев\*, и Б. Н. Гощицкий\*

\*Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург 620219, Россия  
(karkin@uraltc.ru)

В системах с тяжелыми фермионами низкотемпературное когерентное состояние, формируемое облаками спиновой поляризации вокруг  $f$ -атомов, приводит к квадратичной зависимости электросопротивления  $\rho(T) = \rho_0 + AT^2$  с коэффициентом  $A$ , соответствующему электрон-электронному рассеянию квазичастиц с большой массой. Чтобы понять роль атомного порядка в формировании ТФ состояний, мы исследовали влияние индуцированного нейтронным облучением разупорядочения на  $\rho(T)$  и коэффициент Холла  $R_H(T)$  соединений типа  $\text{CeT}_2\text{X}_2$  ( $T = \text{Ni, Cu, Pd}$ ;  $X = \text{Si, Ge}$ ). Облучение приводит к значительным изменениям  $\rho(T)$  и  $R_H(T)$  при низких  $T$ , тогда как высокотемпературные изменения намного слабее. Температурные зависимости  $\rho(T)$  и  $R_H(T)$  в соединении  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  (верхний рисунок) демонстрируют сложную зонную структуру с электронными и дырочными носителями заряда, имеющими качественно различные  $T$ -зависимости  $\rho(T)$ . Если в исходном образце (светлые точки) в низко- $T$  области преобладает электронный вклад тяжелых носителей, то в области высоких  $T$  доминируют легкие дырки и электроны. В облученном образце (темные точки) вклад ТФ канала исчезает, так что в  $\rho(T)$  и  $R_H(T)$  проявляются логарифмические зависимости, соответствующие магнитному (типа Кондо) рассеянию.

Качественно похожее поведение транспорта наблюдается в  $\text{CeNi}_2\text{Ge}_2$  (нижний рисунок, кривая 1 – исходный образец, 2 – облученный, 3–6 – отожженные при температурах 100–400 °С), но с другим соотношением



частичных вкладов тяжелых и легких носителей в электронный транспорт. Отметим, что в соединениях  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  и  $\text{CeNi}_2\text{Ge}_2$ , обнаруживающих не Ферми жидкостное (НФЖ) поведение, которое приводит к появлению линейных при низких  $T$  зависимостей  $\rho(T)$  и  $R_H(T)$ , при разупорядочении нет перехода в состояние Ферми жидкости, также как в ТФ соединениях  $\text{CeCu}_2\text{Ge}_2$ ,  $\text{CePd}_2\text{Ge}_2$  и  $\text{CePd}_2\text{Si}_2$  не наблюдается ожидаемого перехода к НФЖ поведению. Для всех исследованных здесь соединений атомное разупорядочение приводит к подавлению проявляющихся при низких температурах электронных состояний, которое соответствует уменьшению концентрации тяжелых носителей.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований ОФН РАН "Нейтронные исследования структуры вещества и фундаментальных свойств материи" (Проект № 14 УрО РАН/ договор №26/04), Программой "Нейтронные исследования конденсированных сред" (Государственный контракт № 40.012.1.1.1150), Проектом РФФИ № 04-02-1653 и Грантом Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-639.2003.2.

### **Образование и эволюция радиационных кластеров в ГЦК-металлах при низкотемпературном нейтронном облучении до малых повреждающих доз**

А. В. Козлов, Е. Н. Щербаков, О. И. Асипцов, Л. А. Скрыбин, И. А. Портных  
ФГУП «ИРМ», г. Заречный а/я 29, Свердловская область 624250, Россия (AlexTIM@uraltc.ru)

Проведены исследования ряда ГЦК-металлов: чистых Ni и Pt и сталей ЭИ-844 (в аустенизированном состоянии) и ЧС-68 (в состоянии х.д.=20 %), облученных в реакторе при температуре  $\sim 310$  К до флюенсов быстрых нейтронов (с  $E > 0,1$  МэВ) от  $\sim 7 \cdot 10^{21}$  до  $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ . Получены результаты прецизионных измерений размерных изменений образцов при нагреве, на части образцов выполнены электронно-микроскопические исследования.

С использованием аппарата статистической термодинамики развита количественная модель описания процесса образования и эволюции радиационных кластеров при низкотемпературном нейтронном облучении. В рамках этой модели получены зависимости концентрации кластеров и среднего числа содержащихся в них вакансий от времени, а также от скорости радиационных повреждений. Показано, что при рекомбинации диффундирующих в кластер междоузлий концентрация вакансий в кластере уменьшается, практически, без изменения его размера.

Уравнения модели использованы для расчета накопления вакансий в сталях ЭИ-844 и ЧС-68 при нейтронном облучении, а также размерных изменений облученных образцов при отжиге. Сопоставление результатов рассчитанных изменений размеров с данными экспериментальных измерений образцов из сталей ЭИ-844 и ЧС-68 показывает их удовлетворительное соответствие.

## Влияние потока фотонов на свойства фольги Ni-Cu

А. А. Колотов, Ф. З. Гильмутдинов, В. Я. Баянкин

Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск, Россия (less@fti.udm.ru)

В последнее время, в литературе активно обсуждаются вопросы, связанные с влиянием различных полей на структурное состояние материалов. В данной работе исследуются изменения металлической фольги при облучении светом.

В качестве объектов исследования использовались прокатанные фольги 40%Ni-60%Cu толщиной 30 мкм. Облучение образцов производилось галогенными лампами мощностью 100 Вт и 200 Вт на воздухе при фиксированном расстоянии от лампы до образца  $R = 70$  мм. Для увеличения теплоотвода, исследуемый образец закреплялся на массивной металлической пластине. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3 (нагрузка на индентор 20 г) Распределение компонентов по глубине поверхностных слоев, до и после облучения, исследовалось методами вторичной ионной масс-спектрометрии с использованием распыления поверхности ионами аргона с энергией 4,5 кэВ при плотности тока  $20 \text{ мкА/см}^2$  (расчетная скорость распыления составляла 3 нм/мин), рентгено-электронной спектроскопии. Дополнительные исследования структурного состояния проводились методом рентгеноструктурного анализа.

Результаты проведенных экспериментов показывают изменение структурного состояния и химического состава облучаемых фольг. В результате облучения при используемых мощностях ламп происходит изменение значений микротвердости как на облученной, так и на обратной сторонах образцов. Однако следует отметить, что существуют пороговые значения доз облучения. Облучение дозами, превышающими пороговые, не приводит к фиксируемым изменениям. Для выявления роли структурного состояния на проявление “фотонного эффекта дальнего действия” исследовались фольги, отожженные при 850 °С в вакуумной печи в течение 30 минут. Как показали измерения микротвердости отожженных образцов, эффект, в данном случае, не наблюдается. Облучение поверхности светом, приводит к перераспределению элементов в поверхностных слоях.

Таким образом, основываясь на полученных экспериментальных данных, можно предположить, что “эффект дальнего действия” при фотонном облучении обусловлен исходной неравновесностью структуры фольги.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 02-02-16670)



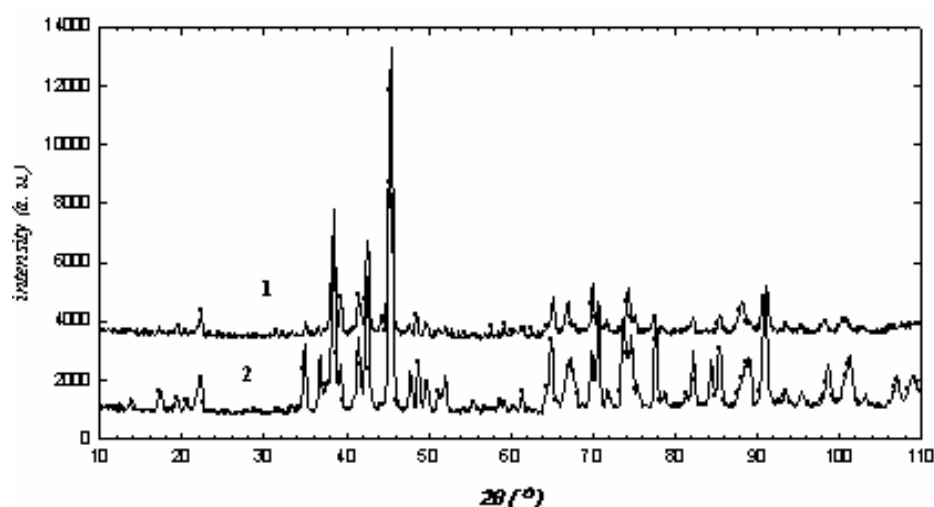
# Исследования взаимосвязи кристаллической структуры и физических свойств соединения с тяжелыми фермионами $\text{CeCu}_6$ с помощью метода радиационного разупорядочения

А. С. Кривошеков, А. Е. Карькин, И. Ф. Бергер\*, В. И. Воронин, Б. Н. Гощицкий

Институт Физики металлов, Екатеринбург, Россия (Nimravus@uraltc.ru)

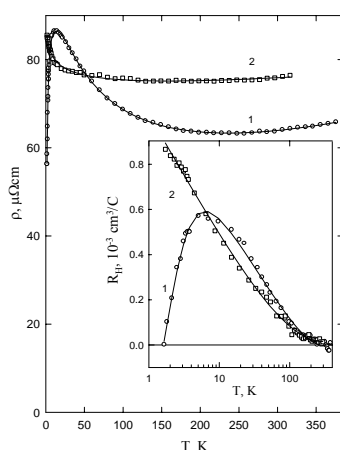
\*Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

В системах с тяжелыми фермионами (ТФ) с упорядоченно расположенными атомами f-элемента (решетка Кондо) при низких температурах  $T$  образуется Ферми-жидкостное (ФЖ) состояние, соответствующее когерентному движению носителей заряда аномально большой массы. Чтобы изучить роль упорядоченного расположения атомов в решетке Кондо в формировании ФЖ состояния, мы исследовали методом нейтронной дифракции



кристаллическую структуру и гальваномагнитные свойства облученного быстрыми нейтронами соединения  $\text{CeCu}_6$  с большой эффективной массой электронов.

Согласно данным нейтронной дифракции  $\text{CeCu}_6$  имеет гексагональную структуру, описываемую в пространственной группе  $Pnma$  (кривая 1 на верхнем рис.). После облучения быстрыми нейтронами тип структуры сохраняется (кривая 2), но происходит рост объема элементарной ячейки на 0.3 %, при этом также возрастает фактор Дебая-Валлера на 45 %. Числа заполнения для атомов Ce и Cu не меняются с точностью до 0,01.



Гальваномагнитные свойства после облучения претерпевают более значительные изменения, в частности, атомное разупорядочение приводит к практически полному подавлению ТФ состояния. В рамках многозонной модели это соответствует сильному (на 2 порядка) уменьшению концентрации ТФ, тогда как изменения зонных параметров легких носителей малы. Приведенные на рисунке 2 температурные зависимости  $\rho(T)$  и постоянной Холла  $R_H(T)$  для  $\text{CeCu}_6$  показывают, что в облученном образце (кривая 2) присутствуют только легкие носители, испытывающие сильное магнитное рассеяние (эффект Кондо). Исходное

состояние (кривая 1) отличается присутствием дополнительного канала проводимости, соответствующего ТФ. Таким образом, в соединениях данного класса кристаллический порядок и, соответственно, порядок в решетке Кондо играют ключевую роль в формировании ФЖ состояния.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований ОФН РАН "Нейтронные исследования структуры вещества и фундаментальных свойств материи" (Проект № 14 УрО РАН/ договор №26/04), Программой «Нейтронные исследования конденсированных сред» (Государственный контракт № 40.012.1.1.1150), Проектом РФФИ № 04-02-1653 и Грантом Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-639.2003.2.

### **Моделирование мартенситных превращений в сплавах в присутствии структурных неоднородностей**

А. Р. Кузнецов\*, С. Abromeit\*\*, Ю. Н. Горностырев\*

\*Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (A\_Kuznetsov@imp.uran.ru)

\*\*Hahn-Meitner-Institute Berlin, Germany

Гомогенное зарождение в реальных (дефектных) материалах обычно считается маловероятным, и ключевая роль в зарождении новой фазы отводится структурным неоднородностям решетки. В последнее время в связи с ростом мощности компьютеров появилась возможность изучать кинетику мартенситных переходов в рамках микроскопического подхода – методом молекулярной динамики (МД). В настоящей работе предложено микроскопическое описание кинетики мартенситных переходов ОЦК-ГПУ и ОЦК-ГЦК в Zr и системе Fe-Ni в присутствии таких типичных дефектов как вакансии, дислокации и границы зерен (ГЗ), а также перехода B2-L1<sub>0</sub> при облучении NiAl быстрыми ионами с образованием треков.

Представляемые результаты МД моделирования кинетики прямого и обратного превращения, позволяют сделать общие заключения о роли несовершенств кристаллической решетки в инициировании полиморфного превращения. Во-первых, наличие дефектов (в том числе и треков быстрых частиц) существенно облегчает начало превращения в плотноупакованную фазу, содействуя развитию решеточной неустойчивости (исключение составляют вакансии, присутствие которых разрушает когерентность фононных мод). Однако роль дислокаций и ГЗ при этом существенно различается. В случае дислокаций, создаваемые ими деформации стимулируют локально развитие решеточной неустойчивости. В результате, превращение начинается в выделенных, примыкающих к дислокациям областях, а “вторичные” зародыши появляются как результат релаксации упругих напряжений от “первичных” зародышей. Равновесные ГЗ не создают упругих напряжений. В этом случае сдвиговая неустойчивость реализуется по другому сценарию, а именно – путем интенсивного, коррелированного испускания частичных дислокаций из ГЗ, приводящего к перестройке

приграничной области в плотноупакованную фазу. В случае мартенситного ГЦК→ОЦК превращения сдвиговая неустойчивость в системе отсутствует, поэтому обсуждаемые выше механизмы влияния дефектов не реализуются. Наши результаты свидетельствуют о том, что присутствие дислокаций или близких к специальным ГЗ не способно стимулировать данное превращение. Зарождение ОЦК-фазы оказалось возможным на ГЗ общего типа, которые характеризуются достаточно большим свободным объемом. Это согласуется с существующими представлениями о том, что в кинетике  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения в Fe и его сплавах определяющую роль играют флуктуации объема.

### **Изучение зон стрэгглинга в молибдене, облученном альфа-частицами и протонами**

О. П. Максимкин, А. В. Яровчук, Л. Г. Турубарова  
Институт ядерной физики НЯЦ, Алматы, Казахстан (maksimkin@inp.kz)

Одним из распространенных способов получения информации об изменении структуры и свойств металлических материалов, подвергнутых высокодозному облучению, является целенаправленное создание имплантированных гелием или водородом слоев, формирующихся в результате полного торможения облучающих альфа-частиц или протонов. При этом в зависимости от энергии частиц зоны стрэгглинга образуются на различной глубине облучаемого образца. Используемый в настоящее время метод экспериментального выявления имплантированных слоев заключается в высокотемпературном отжиге материала, который не только вносит искажения в строение зон полного торможения частиц, изменяет положение их границ, но и трансформирует структуру в целом.

В работе приведены результаты обнаружения местоположения и определения ширины зон стрэгглинга в металлическом молибдене с использованием нового метода химического травления. Облучение технически чистого молибдена проводили на изохронном ускорителе У-150 при температуре  $< 100^\circ\text{C}$  протонами и альфа-частицами с энергией от 7 до 50 МэВ. Представлены примеры выполнения идентификации типа облучающих частиц по различной способности к окрашиванию поверхности образца при действии химического раствора. Приведены данные об особенностях рекристаллизационных процессов, протекающих в зонах стрэгглинга. Изучены изменения микротвердости и характеристик прочности и пластичности молибдена в зонах полного торможения частиц и вне их. Химическое выявление зон стрэгглинга позволяет с повышенной точностью определять местоположение имплантированных слоев внутри образца и оценивать величину поглощенной энергии падающего потока частиц. Показана практическая важность и перспективность оптического наблюдения зон стрэгглинга на макро- и микроструктурном уровне, открывающего перспективу проведения комплексных исследований структурно-фазовых изменений, механических свойств облученных материалов, а также их коррозионной стойкости.

## A Comparison of the Tensile Behaviour of Post-irradiation and *In situ* tested Iron

Pierre Marmy

CRPP-PSI, Technologie des matériaux, CH-5232 Villigen-PSI, Switzerland (pierre.marmy@psi.ch)

Some components of fusion reactors will experience during service simultaneous plastic deformation and bombardment with high energy neutrons, specially in the region of the first wall. Traditionally, reactor materials are tested in the absence of stresses, after a static irradiation, in which an irradiation substructure consisting of point defects, dislocation loops and irradiation-induced phases has been formed. In contrary, if plastic deformation occurs during irradiation, the formation of the irradiation substructure is fundamentally different because of two main reasons. First the mobile dislocations are absorbing the point defects and strongly reduce their clustering and second the irradiation is taking place into a *deformation-induced* microstructure, sometimes far different from the *as-received* structure. Under these conditions, the material response to a specific solicitation is completely different. This situation has been recognised early at CRPP-PSI where an *in situ* device placed into a 590-MeV proton beam line, has been in use since 1993 [1]. The device has been mainly operated to study the low cycle fatigue of first wall candidate materials [2,3]. In this work, the effect of the *in situ* deformation on the tensile properties of pure iron will be reported. The specimen is tubular and can be loaded in compression. Due to the lack of beam time, a single complex experiment has been designed, in which different tension or compression sub-experiments were conducted near room temperature. In a first phase, the specimen has been pulled at a crosshead displacement rate of 200  $\mu\text{m/hr}$  to avoid static irradiation during the elastic part of the curve. The specimen was then deformed in compression at 15  $\mu\text{m/hr}$  and the flow stress was measured under beam. Two experiments were then conducted to measure the static hardening under positive and compressive stresses. Finally the specimen was pulled at crosshead displacement rates of 10, 5 and 25  $\mu\text{m/hr}$  to measure the influence of the strain rate. The specimen was then pulled to rupture at 15  $\mu\text{m/hr}$ . The dose at rupture was around 0.1 dpa. Tensile tests with the same deformation history were conducted for unirradiated and statically irradiated iron.

The differences will be explained and the possible consequences of the irradiation under plastic deformation will be discussed.

### References

1. Marmy P., Journal of Nuclear Materials **212-215**(1994)594-598
2. Marmy P., Oliver B. M., Journal of Nuclear Materials **318** (2003)132-142
3. Marmy P., Journal of Nuclear Materials **329-333**(2004)188-192

## **Квадратичная температурная зависимость магнитосопротивления совершенных и облученных монокристаллов вольфрама и молибдена**

В. В. Марченков\*, В. Е. Архипов\*, А. Л. Суворов\*\*, В. Л. Арбузов\*, С. Е. Данилов\*, Х. В. Вебер\*\*\*

\*Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (march@imp.uran.ru)

\*\*ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

\*\*\*Атоминститут австрийских университетов, Вена, Австрия

В интервале температур 2-50 К и в магнитных полях до 15 Тл измерено поперечное магнитосопротивление совершенных монокристаллов вольфрама и молибдена с отношением сопротивлений RRR до 75 000, а также образцов, облученных ионами криптона ( $E = 305$  МэВ), протонами ( $E = 20$  МэВ) и электронами ( $E = 5$  МэВ). Показано, что взаимодействие электронов проводимости с поверхностью необлученных образцов приводит к дополнительному вкладу в магнитосопротивление  $\rho_{xx}$ , пропорциональному квадрату температуры. Введение радиационных дефектов в кристаллы при облучении приводит к тому, что квадратичный по температуре вклад в магнитосопротивление существенно увеличивается и при низких температурах  $\rho_{xx} \sim T^2$ . Продемонстрировано, что наблюдаемая квадратичная зависимость сопротивления  $\rho_{xx}$  обусловлена двумя механизмами рассеяния носителей заряда: интерференционным «электрон-фонон-поверхность» и взаимодействием электронов проводимости с радиационно-индуцированными дефектами.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 02-02-16431 и Фондом содействия отечественной науке.

## **Временная эволюция микроструктуры в материалах, находящихся под облучением**

В. В. Слезов<sup>1</sup>, А. В. Субботин<sup>2</sup>, О. А. Осмаев<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической физики им. акад. А. И. Ахиезера, ННЦ "Харьковский физико-технический институт", ул. Академическая 1, г. Харьков 61108, Украина (oleg\_osmayev@kipt.kharkov.ua)

<sup>2</sup>ФГУП Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалея, Главпочтамт, а/я 788, г. Москва 101000, Россия

<sup>3</sup>Украинская Государственная Академия Железнодорожного Транспорта, пл. Фейербаха 7, г. Харьков 61050, Украина

Как известно, в облучаемых материалах (металлах, сплавах), происходит эволюция их микроструктуры. Эта микроструктура определяется возникновением пористости и развитием дислокационной подсистемы материала. Интенсивность развития микроструктуры определяется видом облучения и его характеристиками. Эти характеристики определяют интенсивность рождения вакансий и межузельных атомов – пар Френкеля, и газовых пор(рассматриваются те виды облучения материала, которые приводят к появлению в материале пар Френкеля).

Заметим, что развитие микроструктуры материала приводит к его набуханию. Физической причиной этого явления, в рассматриваемых условиях, является различие в стоках межузельных атомов и вакансий на дислокациях, которое определяется различием в энергиях взаимодействия точечных дефектов - вакансий  $V$  и межузельных атомов  $i$  с упругим полем дислокаций.

Рассмотрены потоки точечных дефектов на поры и дислокации, которые и определяют скорости их развития. При нахождении этих потоков, в условиях генерации точечных дефектов, исходными уравнениями являются нестационарные диффузионные уравнения с источниками точечных дефектов (в объеме материала) и стоками. Стоками, в рассматриваемой системе, являются поверхности макродефектов. А аннигиляция (рекомбинация) точечных дефектов в объеме является незначительной и ей, как правило, можно пренебречь [1].

Получена замкнутая система уравнений, описывающая эволюцию во времени микроструктуры материала, находящегося под облучением. Найдены выражения для скорости набухания (набухание материала удобнее изучать по его пористости). Показано, что при постоянном источнике точечных дефектов (число пар Френкеля на узел решетки), набухание линейно по времени. Получено выражение для скорости набухания в случае, более реального, импульсного режима источника.

#### Литература:

1. В. В. Слёзов, ФТТ 31, 8, 20, (1989).

### Структурный переход в манганите $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ индуцированный нейтронным облучением

В. Д. Пархоменко\*, С. Ф. Дубинин\*, В. Е. Архипов\*, Ю. А. Дорофеев\*,  
Я. М. Муковский\*\*, С. Г. Теплоухов\*

\*Институт Физики Металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (parkhomenko@uraltc.ru)

\*\*Московский Институт Стали и Сплавов, Москва, Россия

Методом порошковой дифракции рентгеновских лучей исследовалось при комнатной температуре структурное состояние манганита  $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ , подвергнутого воздействию быстрых нейтронов ( $F = 8 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{irr}} = 340 \text{ K}$ ). Обнаружено, что каскадообразующее нейтронное облучение индуцирует в манганите структурный переход из орторомбической в псевдокубическую фазу. Приведены аргументы в пользу того, что изменение структуры является эффектом локального разупорядочения манганита быстрыми нейтронами.

Работа выполнена при финансовой поддержке МПНТ РФ, контракт № 40.012.1.1.1150; Программы ОФН РАН "Нейтронные исследования структуры веществ и фундаментальных свойств материи"; Гранта президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ №НШ-639.2003.2; Проектов РФФИ №02-02-16425 и №04-02-16053.

## **Зарядовое упорядочение в радиационно-модифицированном манганите $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$**

В. Д. Пархоменко\*, С. Ф. Дубинин\*, В. Е. Архипов\*, С. Г. Теплоухов\*, Я. М. Муковский\*\*

\*Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (parkhomenko@uraltc.ru)

\*\* Московский институт стали и сплавов, Москва, Россия

Методами дифракций рентгеновских лучей и тепловых нейтронов исследовалось зарядовое упорядочение в манганите  $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ , облученном быстрыми нейтронами ( $F \cong 10^{19} \text{cm}^{-2}$ ,  $T_{\text{ит}} = 340 \text{ K}$ ). Обнаружено, что сверхструктура зарядового упорядочения в облученном манганите отвечает системе волновых векторов:  $q_1 = (0, 0.8, 0)2\pi/b$ ;  $q_2 = (0.5, 0, 0.5)$  в единицах  $2\pi/a$  и  $2\pi/c$ . Приведены аргументы, что изменение поляронного упорядочения (по отношению к исходному порядку) обусловлено изменением структурного и магнитного состояний манганита после воздействия быстрых нейтронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МПНТ РФ, контракт № 40.012.1.1.1150; Программы ОФН РАН "Нейтронные исследования структуры веществ и фундаментальных свойств материи"; Гранта президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ №НШ-639.2003.2; Проектов РФФИ №02-02-16425 и №04-02-16053.

## **Образование пор и выделений вторых фаз в стали 06X16H15M2Г2ТФР при высокодозном нейтронном облучении и их эволюция при отжиге**

И. А. Портных, А. В. Козлов, Е. Н. Щербаков, О. И. Асипцов

ФГУП «ИРМ», г. Заречный а/я 29, Свердловская область 624250, Россия (portnykh@uraltc.ru)

Исследовано влияние высокодозного нейтронного облучения на изменение структуры аустенитной стали 06X16H15M2ГТФР. Методами электронной микроскопии и дилатометрии изучены образцы, облученные при температурах 400, 500 и 600 °С до повреждающих доз 49, 86, 48 сна, соответственно. Установлено, что при нейтронном облучении при этих условиях происходит образование вторых фаз, в том числе радиационно-индуцированной G-фазы, а также образование и рост радиационных пор, приводящих к распуханию материала.

Характеристики радиационных пор, объемная доля и размер частиц выделений вторых фаз и размерные изменения образцов существенно зависят от температуры нейтронного облучения. Так максимальное распухание наблюдается при 500 °С и составляет около 7,8 %. При 400 и 600 °С величина его на порядок меньше. Значительная часть пор образуется на выделениях G-фазы. Размер и объемная доля G-фазы растут с увеличением температуры. При температуре 400 °С выделения G-фазы имеют средний размер ~10 нм, а при 600 °С он достигает значений ~100 нм. При этом объемная доля выделений изменяется с ~1 % до ~5 %. Дилатометрические измерения показывают, что линейный размер облученных образцов при нагревании выше ~550 °С растет медленнее, чем у

исходных образцов. Различия в изменении размеров при нагревании связаны с растворением пор и выделений. Доминирующий вклад в необратимое изменение размеров (усадку) при отжиге образцов, облученных при 400 и 500 °С вносит растворение пор, а образцов, облученных при 600 °С, - растворение выделений.

Отжиг при 700 °С в течение 2 часов приводит к диссоциации мелких пор, сопровождающейся ростом крупных. Выделения вторых фаз при отжиге частично растворяются, объемная доля их уменьшается.

### **Изменение физико-химического состояния атомов олова в оксидных пленках циркониевых сплавов под действием нейтронного облучения**

В. П. Филиппов\*, А. Б. Батеев\*, Р. Н. Пугачев\*, Ю. А. Шиканова\*, А. В. Никулина\*\*,  
В. Ф. Коньков\*\*, Г. П. Кобылянский\*\*\*

\*Московский инженерно-физический институт (государственный университет),  
Москва, Россия (filippov@d108.mephi.ru)

\*\*Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов  
им. акад. А. А. Бочвара, Москва, Россия

\*\*\*Научно-исследовательский институт атомных реакторов, Димитровград, Россия

Методом мессбауэровской спектроскопии исследовались оксидные пленки циркониевых сплавов (Zr-0.76%Fe-1.6%Sn-0.95%Nb и Zr-0.76%Fe-1.6%Sn.), окисленных в автоклавных условиях и в условиях реакторного облучения. Коррозионные испытания в реакторе проводились в течение 37, 80 и 112 эффективных суток (флюенс  $3 \cdot 10^{20}$  н/см<sup>2</sup>,  $E > 0,5$  МэВ), а в лабораторных условиях в течение 40, 80 и 120 суток в идентичном режиме (350 °С, 16.8 МПа).

Кинетические кривые коррозии для автоклавных условий отличаются от кинетических кривых, полученных для коррозии в реакторных условиях. Эти отличия связаны с тем, что скорость коррозии в реакторных условиях намного выше. При одинаковой длительности коррозионных испытаний толщина оксидной пленки, выращенной в реакторных условиях выше, чем в случае автоклавных испытаний. Толщины оксидных пленок в зависимости от состава сплава отличаются в 2-3 раза.

Обработка мессбауэровских спектров показала, что в оксидных пленках исследуемых сплавов олово находится в форме соединений SnO и SnO<sub>2</sub>, в виде твердого раствора ионов Sn<sup>4+</sup> в ZrO<sub>2</sub>, а также в виде металлической фазы – β-Sn. Возможность образования β-Sn в оксидных пленках показана в работе [1].

Определены концентрации атомов олова во всех состояниях и фазах. Сравнение кинетических кривых коррозии и результатов мессбауэровских исследований позволяет констатировать, что введение ниобия наибольшее влияние оказывает на коррозионное поведение сплавов в процессе реакторного облучения, и менее вне реакторных испытаний. Выявлено, что повышение коррозионной стойкости некоторых образцов сплавов связана с присутствием в оксидной пленке пластифицирующей фазы β-Sn.



## Литература

1. Pêcheur D. Filippov V.P. Bateev A. B. Ivanov Ju. Ju., Mössbauer Investigations of the Chemical States of Tin and Iron Atoms in Zirconium Alloy Oxide Film Zirconium in the Nuclear Industry: Thirteenth International Symposium. ASTM STP 1423, Gerry D. Moan and Peter Ruling, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA 2002, pp. 135-153.

## Радиационные эффекты в манганитах со структурой перовскита

Ю. Г. Чукалкин, А. Е. Теплых, Б. Н. Гощицкий

Институт физики металлов УрО РАН, 620219 Екатеринбург, Россия (chukalkin@uraltc.ru)

Методами дифракции нейтронов, рентгеновских и магнитных измерений исследованы поликристаллические образцы системы  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$  ( $0 \leq x \leq 0.2$ ) до и после облучения различными флюенсами быстрых ( $E_n \geq 1$  МэВ) нейтронов ( $0 \div 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ ). Установлено, что центральную роль в формировании структурного и магнитного состояний облученных образцов играют так называемые «антиузельные» дефекты, т.е. взаимное разупорядочение «лантановой» и «марганцевой» подрешеток. Радиационное разупорядочение катионов с существенно различающимися ионными радиусами вызывает возникновение значительных некоррелированных смещений близлежащих ионов. При больших концентрациях «антиузельных» дефектов этот процесс приводит к радиационной аморфизации; при относительно небольших концентрациях ( $\sim 5 \div 10$  %) сохраняется кристаллическая структура, однако ее симметрия выше исходной. Так, например, мы наблюдали при облучении относительно небольшими флюенсами следующие структурные превращения: ромбоэдрическая  $\rightarrow$  кубическая ( $x = 0.175, 0.2$ ), орторомбическая  $O' \rightarrow$  орторомбическая  $O^*$  ( $x = 0$ ) фазы.

Известно [1], что магнитное состояние манганитов со смешанной валентностью формируется в результате ферро- и антиферромагнитных взаимодействий, носящих конкурирующий характер: косвенного обмена  $\text{Mn}^{3+}\text{-O-Mn}^{3+}$  (который может быть как отрицательным, так и положительным, в зависимости от того, какие именно орбитали катионов и анионов перекрываются) и кинетического ферромагнитного обмена  $\text{Mn}^{4+}\text{-O-Mn}^{3+}$ , обусловленного делокализацией электрона (дырки). Образование «антиузельных» дефектов вызывает возникновение случайного локального потенциала, который оказывает существенное влияние на свойства зарядовых носителей и, в конечном итоге, приводит к частичной или полной локализации носителей. С другой стороны, повышение симметрии облученных кристаллов модифицирует схему косвенного обмена. Например, разрушается JT-мода, ответственная за формирование антиферромагнетизма А-типа в диэлектрике  $\text{LaMnO}_3$ . Совокупность этих факторов и приводит к наблюдаемым трансформациям магнитоупорядоченных состояний при облучении: антиферромагнетик  $\rightarrow$  ферро- (ферри-) магнетик ( $x = 0$ ), ферромагнетик  $\rightarrow$  спиновое стекло в легированных манганитах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МПНТ РФ, контракт № 40.012.1.1.1150; Гранта президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-639.2003.2; Проекта РФФИ № 04-02-16053-а.

#### **Литература**

1. Coey J. M. D., Viret M., von Molnar S. *Adv. Phys.*.. V. **48**, 167 (1999)

### **Иницированный облучением гамма-альфа переход в облучённых высокими дозами аустенитных нержавеющей сталей и некоторые его последствия при деформации**

В. К. Шамардин, В. С. Неустроев, З. Е. Островский, Ю. Д. Гончаренко  
ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», г. Дмитровград, Ульяновской области, Россия (shamardin@niiar.ru)

Представлены результаты исследований механических свойств и структуры двух метастабильных аустенитных нержавеющей сталей, облучённых до высоких доз. Облучение стали 08X18N10T проводилось в активной зоне высокопоточного реактора СМ со смешанным нейтронным спектром при температуре 70-120 °С в среде реакторного теплоносителя - дистиллированной воды. Максимальный флюенс быстрых нейтронов по результатам измерений нейтронных мониторов составил величину  $5,3 \times 10^{26} \text{ нм}^{-2}$  ( $E > 0,1 \text{ МэВ}$ ). Образцы стали 09X15N10C3B облучались в реакторе БОР-60 при температурах ~320, 340, 380 °С до флюенсов  $0,3 \times 10^{26}$ ,  $1,8 \times 10^{26}$  и  $1,3 \times 10^{26} \text{ нм}^{-2}$ , соответственно.

Из анализа диаграмм растяжения, рентгеноструктурных и электронномикроскопических данных получены свидетельства радиационно-индуцированного формирования мартенсита в аустенитной матрице и повышение температуры мартенситного превращения в облучённой стали. Обсуждается связь между микроструктурой и радиационным упрочнением, а также содержанием в сталях кремния, радиус атома которого выше, чем у основных компонентов стали никеля, хрома и железа.

### **Влияние градиента температуры на распределение пор в облучаемых поликристаллах**

В. В. Слезов<sup>1</sup>, О. А. Осмаев<sup>2</sup>, Р. В. Шаповалов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической физики, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»,  
Украина, 61108, г. Харьков, ул. Академическая 1 (oleg\_osmayev@kipt.kharkov.ua)

<sup>2</sup>Украинская Государственная Академия Железнодорожного Транспорта,  
Украина, 61050, г. Харьков, пл. Фейербаха 7

Известно, что в облучаемом поликристалле возникают дополнительные точечные и макроскопические дефекты: вакансии, междоузельные атомы, поры, дислокации. Эти дефекты существенно влияют на важнейшие свойства поликристалла: прочность, электропроводность и т.д.

В работе [1] рассматривалось диффузионно-дислокационное течение неограниченного изотропного вещества под влиянием облучения с учетом рождения атомов газа и в отсутствие градиента температуры. Были получены скорости распухания образца и пластического течения в различных случаях.

В настоящей работе рассматривается движение ансамбля пор в ограниченном в направлении градиента температуры изотропном материале с источниками междоузельных атомов, вакансий и атомов газа. Были рассмотрены различные механизмы движения пор под действием градиента температуры и высказано предположение о том, что в практически важных случаях поры двигаются за счет диффузии атомов матрицы по поверхности поры.

Поскольку полная система уравнений, описывающих движение пор очень сложна, рассматривалось два предельных случая: «большие» и «малые» поры. Случай «больших» пор – характерное время изменения размеров поры много больше времени наполнения поры газом. В случае «малых» пор, естественно, наоборот. В обоих случаях найдены: функция распределения пор в пространстве размеров, зависимость размера поры, количества газа в поре и в материале от пространственной координаты. Получены критерии, ограничивающие мощность источников газа и критическое давление идеального газа в поре до начала пластической деформации образца.

#### **Литература**

1. В. В. Слёзов, УФЖ, 13, №9, 1968.

### **Влияние на состояние атомов железа и олова, а также на радиационный рост модельных образцов циркониевых сплавов состава и вида обработки**

Ю. А. Шиканова\*, В. П. Филиппов\*, В. И. Петров\*, А. Е. Новоселов\*\*, Г. П. Кобылянский\*\*

\*Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Москва, Россия  
(filippov@d108.mephi.ru)

\*\*Научно-исследовательский институт атомных реакторов, Димитровград, Россия

Были исследованы образцы модельных циркониевых сплавов в системах Zr-Nb-Sn-Fe и Zr-Sn-Fe-Ni, содержащие атомы железа и олова, обогащенные изотопами  $^{119}\text{Sn}$  и  $^{57}\text{Fe}$ . Состав сплавов близок к промышленным сплавам типа Э635 и Zry-2. Сплавы готовились в лабораторных условиях, затем были прокатаны в пластины толщиной 0,8 мм для изучения их радиационного роста и фольги толщиной  $\leq 150$  мкм для мессбауэровских исследований состояния атомов железа и олова. Использованы три варианта термомеханической обработки: рекристаллизационный отжиг, закалка и холодная деформация (до 20 и 50 %).

Для получения мессбауэровских спектров были использованы резонансный и сцинтиляционный детекторы.

Анализ параметров полученных спектров позволил практически во всех исследованных образцах обнаружить пять состояний железа. Обнаружены следующие

фазы и соединения железа:  $Zr_3Fe$ ,  $Zr_2Fe$ ,  $(Zr_{1-x}Nb_x)_2Fe$ , два соединения отвечающие параметрам  $(Zr_xNb_{1-x})Fe_2$  и твердый раствор атомов Fe в  $\alpha$ -Zr. Относительные содержания этих фаз в образцах зависят от исходного состояния образца. Отжиг, как правило, увеличивает содержание соединения  $(Zr_xNb_{1-x})Fe_2$  и в небольших пределах соединений  $Zr_3Fe$ ,  $Zr_2Fe$ . Это увеличение идет за счет уменьшения содержания фазы  $(Zr_xNb_{1-x})Fe_2$ . Также было обнаружено, что олово в исследованных образцах сплавов находится в твердом растворе  $\alpha$ -Zr.

Радиационные испытания модельных плоских образцов проводились в реакторе БОР-60 при температуре  $\sim 320^\circ C$  до флюенсов быстрых ( $E > 1$  МэВ) нейтронов  $(2,2-11) \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$ . После облучения определяли прирост длины пластинчатых образцов. У образцов сплавов системы Zr-Nb-Sn-Fe в рекристаллизованном и холоднодеформированном состоянии зависимость деформации радиационного роста слабее, чем для системы Zr-Sn-Fe-Ni, а величина деформация радиационного роста после облучения до максимального флюенса нейтронов значительно ниже. Деформация радиационного роста закаленных образцов этих сплавов меньше, чем у рекристаллизованных и холоднодеформированных.