

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДЕФЕКТНЫХ СОСТОЯНИЙ СПЛАВА Zr–1 %Nb НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДИАПАЗОНЫ ДЕСОРБЦИИ ДЕЙТЕРИЯ

А. Н. Морозов, А. В. Мац, В. А. Мац, В. И. Журба, П. А. Хаймович, В. Н. Белан

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
morozov@kipt.kharkov.ua

Исследованы температурные диапазоны десорбции ионно-имплантированного дейтерия из циркониевого сплава Zr–1 %Nb в литом (исходном) состоянии и прошедшего воздействия различной природы: пластическую деформацию прокаткой при температуре 300 К со степенью $\epsilon = 3,9$, пластическая деформация прокаткой при температуре 300 К со степенью $\epsilon = 3,9$ с последующим облучением электронами энергии 10 МэВ флюенсом $6 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$, низкотемпературная экструзия со степенью 15 % при температуре выдавливания 78 К.

Пластическая деформация сплава Zr–1 %Nb, выполненная прокаткой при температуре 300 К со степенью $\epsilon = 3,9$ создает наноструктурное состояние со средним размером субзерен 61 нм. Образовавшаяся высокая степень дефектности сплава проявляется в спектре термодесорбции дейтерия в виде дополнительной области десорбции дейтерия в диапазоне температур 650–850 К. Последующее облучение электронами образца после пластической деформации прокаткой привело к уменьшению среднего размера зерен (58 нм) и увеличению объемной концентрации границ. В результате этого образовались дополнительные температурные диапазоны десорбции дейтерия с максимальной скоростью десорбции при температурах 700 и 800 К.

В образцах после деформирования экструзией образовавшаяся высокая степень дефектности проявляется в виде дополнительной, широкой по температурной шкале, области десорбции дейтерия в диапазоне температур 420–850 К. При этом образование твердого раствора дейтерия в цирконии практически не наблюдается.

Характер структурного состояния является управляющим фактором при формировании структуры спектра термодесорбции дейтерия и, при фиксированной дозе имплантированного дейтерия (диагностика водородом), проявляется в виде дополнительных температурных диапазонов десорбции дейтерия и зависит от типа, характера и степени дефектности.

Введение

Циркониевые сплавы обладают уникальным сочетанием ядерно-физических, механических и коррозионных свойств, таких как очень низкое поглощение нейтронов, высокая коррозионная стойкость, высокая прочность

и пластичность. Эти свойства обуславливают широкое использование циркония и его сплавов в реакторостроении. Научный и практический интерес представляет изучение влияния облучения на структурные состояния циркониевых сплавов [1–3].

Предварительное введение дислокаций в кристаллическую решетку металла снижает эффективность радиационного влияния на металлы и сплавы [4–6]. Наиболее распространенным способом ввода дефектов в кристаллическую решетку металла является пластическая деформация. Интенсивная пластическая деформация при низких гомологических температурах ($T < 0,2T_m$, T_m – температура плавления) позволяет формировать широкий спектр искаженных структур. Как известно, чем ниже температура, при которой осуществляется пластическое деформирование, тем большую плотность дефектов можно достичь в результате такой обработки, так как при этом подавляются процессы динамического возврата. Эти соображения легли в основу разработанного в ННЦ ХФТИ способа пластического деформирования металлов и сплавов – низкотемпературная экструзия при температуре выдавливания 78 К и ниже [7]. Эффективность этого метода первоначально была подтверждена экспериментами на чистых металлах, в частности на меди [8, 9]. В результате медь упруго деформировалась при комнатной температуре вплоть до давлений 700–720 МПа. Дальнейшие исследования аустенитной коррозионно-стойкой стали X18H10T показали, что ее деформирование при криогенных температурах в условиях, близких к гидростатическому сжатию (квазигидростатическое экструдирование) с высоким уровнем давления, обеспечивает образование в стали мартенсита высокой степени дисперсности и значительный прирост механических свойств стали [10].

Метод термодесорбционной спектроскопии традиционно используется для определения температурных интервалов выделения газов изметаллов. Обработка полученных спектров термоактивированного выделения водорода позволяет вычислить термодинамические параметры десорбции (энергию активации десорбции, порядок реакции и т. д.). В работах [11–13] установлена корреляция между пиками в спектрах термодесорбции дейтерия из Ti, Pd и Zr и фазовыми превращениями в системе металл-водород, что расширяет возможности метода термодесорбционной спектроскопии в изучении структурных состояний материалов. Водородная диагностика структурного состояния стали X18H10T и сплава Хастеллой-Х, предварительно имплантированных ионами гелия, показала ступенчатый характер смещения верхнего предела температурного диапазона удержания дейтерия в зависимости от концентрации внедренного гелия [14, 15], что свидетельствует об образовании последовательных квантовых состояний системы металл-гелий. С целью дальнейшего развития возможностей водородной диагностики проведены исследования влияния различного рода воздействий на структуру аустенитной нержавеющей стали X18H10T, а именно, имплантации ионов химически активных элементов (N^+ , O^+) и низкотемпературной экструзии [16] на температурные диапазоны удержания дейтерия. Установлена зависимость характера спектра выделения тестирующей дозы имплантированного дейтерия как от типа, так и степени структуроизменяющего воздействия. Полученные результаты сви-

детельствуют о перспективности использования термодесорбционной спектроскопии для «диагностики водородом» структурного состояния материалов и, на данном этапе развития метода, качественной оценки результата воздействия на их структуру.

В настоящей работе представлены результаты исследования температурных интервалов десорбции ионно-имплантированного дейтерия из сплава циркония Zr–1 %Nb в различных структурных состояниях: после кристаллизации из расплава; после наноструктурирования путем пластической деформации прокаткой при комнатной температуре; после облучения электронами образцов, предварительно прошедших пластическую деформацию прокаткой; после низкотемпературной экструзии при температуре выдавливания 78 К.

Методические аспекты

Температурные диапазоны десорбции ионно-имплантированного дейтерия из образцов сплава Zr–1 %Nb, прошедшего различные структуроизменяющие обработки, исследовались методом термодесорбционной спектроскопии на установке «Скиф» [17]. Использовались образцы сплава Zr–1 %Nb: в литом состоянии (исходном); прошедшие пластическую деформацию прокаткой при температуре 300 К со степенью $\epsilon = 3,9$; прошедшие пластическую деформацию прокаткой при температуре 300 К со степенью $\epsilon = 3,9$ и облучение электронами энергии 10 МэВ флюенсом $6 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при температуре, не превышающей 370 К; прошедшие низкотемпературную экструзию со степенью 15 % при температуре выдавливания 78 К [18, 19].

Образцы крепились на нагреватели из циркония размером $40 \times 5 \times 0,3 \text{ мм}^3$. Температура измерялась вольфрам-рениевой термопарой ВР5/20, прикрепленной к образцу. С целью уменьшения влияния фонового водорода, имеющегося в образцах и камере мишеней, в экспериментах использовался изотоп водорода – дейтерий. Внедрение дейтерия в образцы, охлажденные до температуры 100 К, осуществлялось пучком ионов D_2^+ энергией 24 кэВ. После внедрения заданной дозы дейтерия пучок выключался и затем включался нагрев, в процессе которого температура образца повышалась до температуры 1600 К по приблизительно линейному закону от времени со средней скоростью 3,5 К/с. Выделение дейтерия в измерительной камере регистрировались с помощью масс-спектрометра по $m = 4 \text{ а.е.м. } (D_2^+)$.

Исследование структуры проводилось помощью электронной микроскопии на просвет при ускоряющем напряжении 100 кВ.

Результаты исследования и их анализ

На рис. 1 приведены характерные спектры термодесорбции дейтерия, имплантированного в исходные образцы сплава Zr–1 %Nb разными дозами ионов дейтерия. Спектры термодесорбции дейтерия отображают структурные состояния в системе Zr–1 %Nb – D в зависимости от дозы имплантированного дейтерия. При низких дозах имплантированного дейтерия образуется твердый

раствор дейтерия в сплаве циркония, что в спектре термодесорбции проявляется в виде двух пиков с максимумами при температурах ~ 1080 и ~ 1400 К (рис. 1 кривая **a**). Такой вид спектра обусловлен наличием в цирконии фазового перехода α -Zr $\rightarrow\beta$ -Zr. Пик с температурой максимума ~ 1080 К обусловлен распадом твердого раствора дейтерия в α -Zr. Почти одновременно с началом распада этого фазового состояния в цирконии начинается фазовый переход α -Zr $\rightarrow\beta$ -Zr, который в спектре проявляется в снижении скорости десорбции дейтерия и образованием твердого раствора дейтерия в β -Zr. При температуре ~ 1400 К происходит распад фазового состояния твердого раствора дейтерия в β -Zr. Увеличение дозы имплантированного дейтерия стимулирует образование гидрида циркония, о наличие которого свидетельствует пик в спектре термодесорбции дейтерия с температурой максимума ~ 900 К (рис. 1 кривые **b** и **c**). Отметим, что температура распада гидрида циркония, согласно диаграмме состояния системы Zr-H [20, 21], практически точно совпадает с температурой максимума соответствующего пика в спектре термодесорбции дейтерия.

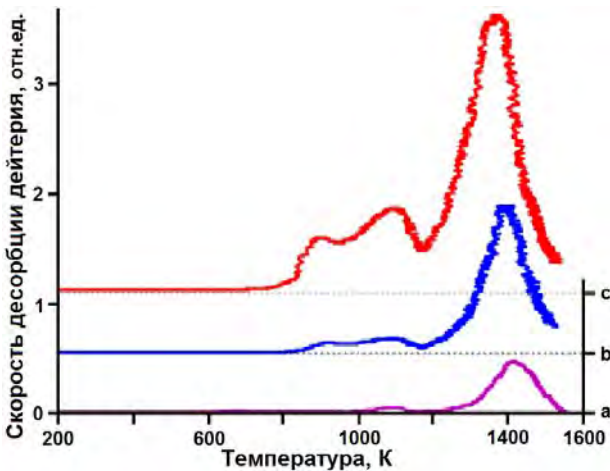


Рис. 1. Спектры термодесорбции дейтерия, имплантированного в сплав циркония Zr-1 %Nb дозами: (a) 1×10^{16} D/cm²; (b) 6×10^{16} D/cm²; (c) $2,5 \times 10^{17}$ D/cm²

Для дальнейших исследований образцов, прошедших различные структуроизменяющие обработки, выбрана тестирующая доза $1,3 \times 10^{17}$ D/cm² (диагностика водородом) [13–15].

Пластическая деформация сплава Zr-1 %Nb, выполненная прокаткой при 300 К со степенью $\varepsilon = 3,9$, создала наноструктурное состояние со средним размером субзерен 61 нм. Выбранный температурно-силовой режим прокатки обеспечил благоприятные условия для создания равномерно распределенных субмикронеоднородностей строения с формированием оптимальной конфигурации ансамбля границ. Для такой наноструктуры фиксируется высокая объемная концентрация границ зерен (3,4 %) и значительный уровень микронапряжений (рис. 2b). Остаточные микронапряжения оценивались по величине прогиба отдельно стоящей дислокационной линии.

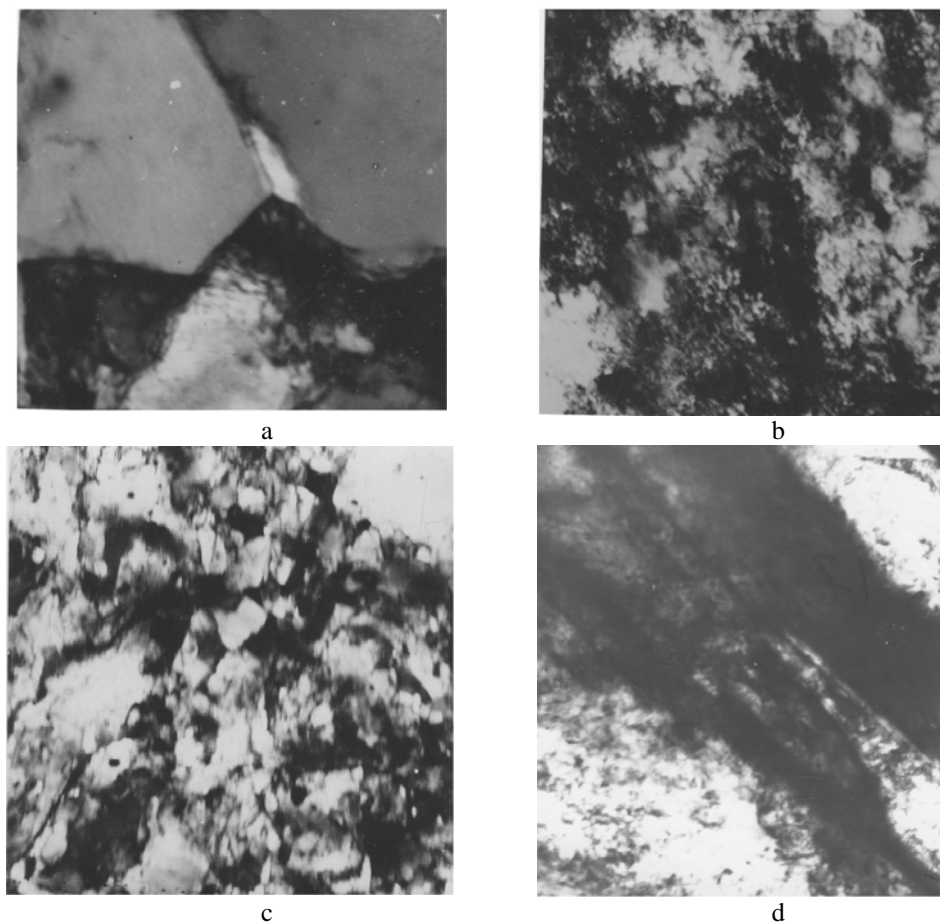


Рис. 2. Структура сплава Zr-1%Nb: **(а)** – литое состояние ($\times 200000$); **(б)** – структура после деформации прокаткой при комнатной температуре со степенью $\varepsilon = 3,9$ ($\times 200000$); **(с)** – структура после деформации прокаткой при комнатной температуре ($\varepsilon = 3,9$) и облученное электронами флюенсом $6 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ($\times 200000$); **(д)** – структура после деформации экструзией при 78 К со степенью обжатия $\delta = 15 \%$ ($\times 250000$)

Высокая степень дефектности, вероятно, обуславливает появление в спектре термодесорбции ионно-имплантированного дейтерия протяженной по температуре низкоинтенсивной области десорбции дейтерия в диапазоне температур 700–1000 К (см. рис. 3, кривая b). Отметим, что в этом случае десорбция дейтерия начинается при комнатной температуре.

В образце сплава Zr-1 %Nb, подвергнутом пластической деформации и последующему облучению электронами, происходит формирование новых полигональных границ, уменьшается средний размер зерен (**d** = 58 нм), увеличивается концентрация границ зерен (~8,8 %), в теле зерен снижается плотность дислокаций (см. рис. 2,с). При этом, по-видимому, происходит интенсивное перемещение дислокаций в вершины оборванных границ и приграничных зонах – местах максимальной концентрации напряжений. Помимо этого, происходит микроскольжение и переползание дислокаций, которое вызвано

их взаимодействием с направленными потоками точечных дефектов радиационного происхождения. В спектре термодесорбции ионно-имплантированного дейтерия такое воздействие проявилось образованием дополнительных температурных диапазонов десорбции с максимумами при температурах 700 и 800 К (рис. 3, кривая **c**).

Исследование образцов сплава Zr-1 %Nb после деформации экструзией при 78 К со степенью обжатия $\delta = 15\%$ выявило наличие широкой по температурной шкале области термодесорбции дейтерия в диапазоне температур 420–850 К и низкоинтенсивных высокотемпературных областей десорбции дейтерия с максимумами при температурах 1100 и 1400 К (рис. 3, кривая **d**). Следует отметить, что важнейшим фактором, сопровождающим экструзию при 78 К, является, наравне с понижением температуры деформирования в области криогенных температур, наличие сил всестороннего сжатия, что предупреждает образование микротрещин и служит необходимой предпосылкой для высокой фрагментации образующейся дефектной структуры, а также формированию в материале высокой концентрации границ раздела. При этом, в материале достигается высокая плотность дефектов при отсутствии склонности к хрупкому разрушению и происходит формирование дефектных структур высокой регулярности, которые не наблюдаются в случае деформирования при комнатной либо повышенных температурах [18]. Важной особенностью спектров термодесорбции дейтерия для образцов сплава Zr-1 %Nb, после деформации экструзией при 78 К является почти полное отсутствие десорбции дейтерия в областях с максимумами при температурах 1100 и 1400 К (рис. 3, кривая **d**), наличие и интенсивность которых свидетельствует об образовании твердого раствора дейтерия в сплаве циркония. Такой результат позволяет сделать вывод, что в образцах с высокой степенью дефектности практически полностью не образуется твердый раствор дейтерия (упорядоченное распределение атомов дейтерия в решетке металла). При этом, низкотемпературная, широкая по температурной шкале область десорбции дейтерия характеризует температурный диапазон удержания дейтерия дефектной структурой.

Внедрённые атомы дейтерия вызывают дилатацию кристаллической решётки металла. Соответственно концентрационные неоднородности водорода приводят к образованию в металле «концентрационных» напряжений, которые способствуют в системе металл-водород твердого раствора водорода в металле (образование упорядоченной подсистемы атомов водорода в металлической матрице). Дальнейшее увеличение концентрации внедренного дейтерия сопровождается образованием гидрида циркония. В процесс нагрева образца происходит распад образовавшихся структур. Распад гидрида циркония проявляется в спектре термодесорбции дейтерия пиком с температурой максимума ~ 900 К, а твердого раствора дейтерия в цирконии в виде двух пиков с максимумами при температурах ~ 1080 и ~ 1400 К (рис. 1, рис. 3 кривая **a**).

В спектре термодесорбции дейтерия из сплава Zr-1%Nb, обладающего наномасштабной структурой, образованной в результате прокатки при комнатной температуре на степень $\varepsilon = 3,9$, появилась дополнительная, протяженная по температурной шкале низкоинтенсивная область десорбции дейтерия в диапазоне температур 700–1000 К (см. рис. 3, кривая **b**).

Различие в характере десорбции дейтерия из сплава Zr-1 %Nb, обладающего наномасштабной структурой и облучённой электронами наноструктуры, обусловлено не только возросшей концентрацией диффузионных путей в виде развитой граничной фазы, но и изменением наноструктуры в результате высокоскоростного нагрева. Прежде всего необходимо учитывать факт значительного уровня упругих искажений в материале, что, наряду с высокой степенью дефектности, существенно понижает температуру начала полигонизации и первичной рекристаллизации с образованием новых (равновесных) границ. Как показали электронномикроскопические исследования, в результате облучения нанокристаллических образцов, количество тройных стыков границ, как потенциальных мест зарождения новых зёрен, существенно возросло. Таким образом, в результате трансформации структуры возросло количество десорбированного дейтерия при более низких температурах (см. рис. 3, кривая *c*).

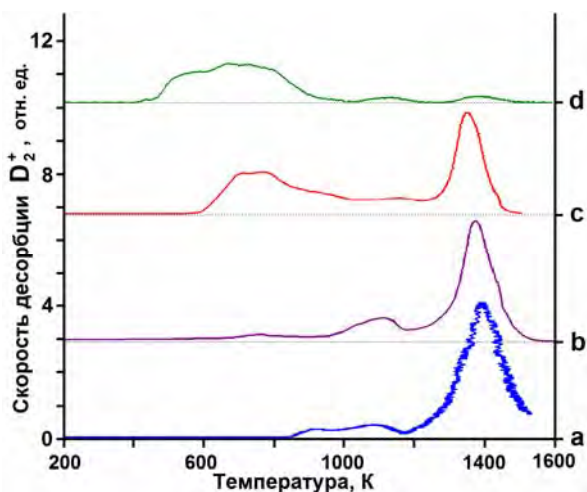


Рис. 3. Спектры термодесорбции дейтерия, имплантированного в сплав Zr-1 %Nb дозой $1,3 \times 10^{17} \text{ D/cm}^2$: а) – исходный сплав; б) – сплав, предварительно деформированный прокаткой при комнатной температуре со степенью 3,9; в) – сплав, предварительно деформированный прокаткой при комнатной температуре со степенью 3,9 и облученный электронами флюенсом $6 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ энергии 10 МэВ; д) – сплав после деформации экструзией при 78 К со степенью обжатия $\delta = 15\%$

Сравнительный анализ спектров термодесорбции дейтерия для образцов сплава Zr-1 %Nb после деформации экструзией при 78 К и подвергнутых пластической деформации с последующим облучением электронами (см. рис. 3, кривые *d* и *c*), позволяет описать особенности, наблюдаемые в спектрах. Обращаем внимание на наличие сходства спектров термодесорбции дейтерия в низкотемпературной области по интенсивности температурного диапазона десорбции дейтерия. В это же время, наблюдается отсутствие термодесорбции дейтерия в диапазоне температур 300–600 К для образцов, облученных электронами, что, по-видимому, обусловлено нагревом образцов в процессе облучения и, в связи с этим, отжигом дефектных структур, распадающихся при низких температурах (см. рис. 3, кривая *c*).

Еще одной характерной особенностью спектров термодесорбции дейтерия для образцов сплава Zr-1 %Nb после деформации экструзией при 78 К является почти полное отсутствие десорбции дейтерия в областях с максимумами при температурах 1100 и 1400 К (рис. 3, кривая **d**), наличие и интенсивность которых свидетельствует об образовании твердого раствора дейтерия в сплаве циркония. Такой результат позволяет сделать вывод, что в образцах с высокой степенью дефектности практически полностью отсутствует образование фазового состояния твердого раствора дейтерия (упорядоченного распределения атомов дейтерия в решетке металла).

Важно, что в сплаве Zr-1 %Nb, с высокой степенью дефектности, образовавшейся в результате пластической деформации прокаткой и облучении электронами, в спектре термодесорбции дейтерия присутствуют области с максимумами при температурах 1100 и 1400 К (рис. 3, кривая **c**). Образование фазового состояния твердого раствора дейтерия в сплаве циркония, прошедшего такую обработку, обусловлено тем, что в процессе облучения электронами образец нагревался до температуры ~370 К и, в связи с этим происходил частичный отжиг дефектных структур, распадающихся при более низких температурах. В результате этого происходит образование кристаллитов, в которых образуется твердый раствор дейтерия в сплаве циркония.

Из приведенных данных следует, что структурные изменения, происходящие в металлах, проявляются в спектрах термодесорбции дейтерия в виде наличия определенных температурных диапазонов десорбции дейтерия, характерных для данного исследуемого металла и зависящих от типа, характера и степени дефектности.

Отметим, что для аустенитной коррозионностойкой стали X18H10T после деформации прокаткой при 300 К обнаружено смещение температурной области десорбции ионно-имплантированного дейтерия на 150–170 К в область более высоких температур [22]. При этом температурные области десорбции дейтерия близки по температурной шкале как для образцов стали X18H10T, так и сплава Zr-1 %Nb. Наличие такой корреляции может свидетельствовать об образовании близких по конфигурации (природе) структурных дефектов.

Выводы

Проведено исследование температурных диапазонов десорбции дейтерия из сплава Zr-1 %Nb (диагностика водородом), исходного и прошедшего различные структуроизменяющие воздействия: пластическая деформация прокаткой при температуре 300 К со степенью $\epsilon = 3,9$; пластическая деформация прокаткой при температуре 300 К со степенью $\epsilon = 3,9$ и облучение электронами энергии 10 МэВ флюенсом $6 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$; низкотемпературная экструзия со степенью 15 % при температуре выдавливания 78 К.

При низких дозах имплантированного дейтерия образуется твердый раствор дейтерия в сплаве циркония, что в спектре термодесорбции проявляется в виде двух пиков с максимумами при температурах 1080 К и 1400 К, обусловленных распадом твердого раствора дейтерия в α -Zr и β -Zr. Увеличение

дозы имплантированного дейтерия стимулирует образование гидрида циркония, о наличие которого свидетельствует пик в спектре термодесорбции дейтерия с максимумом при температуре ~ 900 К.

Обнаружено, что образцах сплава Zr-1 %Nb, имеющих высокую степень дефектности, практически не происходит образование фазового состояния твердого раствора дейтерия в цирконии.

Структурные изменения, происходящие в металлах, проявляются в спектрах термодесорбции дейтерия в виде наличия дополнительных температурных диапазонов десорбции дейтерия в зависимости от типа, характера и степени структуроизменяющего воздействия.

Список литературы

1. Чернов И. П., Иванова С. В., Кренинг М. Х., Коваль Н. В., Ларионов В. В., Лидер А. М., Пушилина Н. С., Степанова Е. Н., Степанова О. М., Черданцев Ю. П. Свойства и структурное состояние поверхностного слоя циркониевого сплава, модифицированного импульсным электронным пучком и насыщенного водородом. Журнал технической физики. 2012. Т. 82. Вып. 3. С. 81.
2. Krasheninnikov A. V., Nordlund K. Ion and electron irradiation-induced effects in nanostructured materials // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 107. P. 071301.
3. Glazoff M. V., Tokuhiko A., Rashkeev S. N., Sabharwall P. Oxidation and hydrogen uptake in zirconium, Zircaloy-2 and Zircaloy-4: Computational thermodynamics and ab initio calculations. Journal of Nuclear Materials. 2014. Vol. 444. P. 65.
4. Гиндин И. А., Дятлов В. П., Лазарева М. Б., Стратиенко В. А. Радиационное упрочнение меди, деформированной прокаткой. ФММ. 1972. Т. 33. С. 671.
5. Демин Н. А., Конобеев Ю. В. Влияние предварительной холодной деформации на радиационное распухание металла. Атомная энергия. 1980. Т. 48. Вып. 1. С. 20.
6. Ибрагимов Ш. Ш., Реутов В. Ф., Фархутдинов К. Г. О двух этапах упрочнения облученных металлов // Атомная энергия. 1983. Т. 54. Вып. 5. С. 339.
7. Стародубов Я. Д., Хаймович П. А. Квазигидроэкструдирование металлов в диапазоне температур 300-4,2°К // Пробл. Прочности. 1975. Вып. 10. С. 116.
8. Гиндин И. А., Стародубов Я. Д., Старолат М. П., Хаймович П. А. Структура и свойства меди после низкотемпературного экструдирования // Физика металлов и металловедение. 1975. Т. 40. Вып. 2. С. 403.
9. Гиндин И. А., Стародубов Я. Д., Старолат М. П., Хаймович П. А. Особенности дефектной структуры меди, экструдированной при низких температурах // Физика металлов и металловедение. 1979. Т. 48. Вып. 5. С. 1004.
10. Хаймович П. А., Мац А. В. Барокриодеформирование стали X18N10T. Физика и техника высоких давлений. 2009. Т. 48, № 1. С. 69.

11. Неклюдов И. М., Морозов А. Н., Кулиш В. Г. Температурные диапазоны стабильности гидридных фаз системы TiD. *Материаловедение*. 2005. № 11. С. 45.
12. Rybalko V. F., Morozov A. N., Neklyudov I. M. and Kulish V. G. Observation of new phases in Pd-D systems // *Phys.Lett.* 2001. Vol. 287A. P. 175.
13. Неклюдов И. М., Рыбалко В. Ф., Морозов А. Н., Кулиш В. Г., Борц Б. В., Черняева Т. П. Накопление и выделение ионно-имплантированного дейтерия из циркония. *Материаловедение*. 2002. № 10. С. 51.
14. Неклюдов И. М., Морозов А. Н., Кулиш В. Г., Журба В. И., Галицкий А. Г. Удержание изотопов водорода в стали X18H10T, имплантированной ионами гелия // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. 2008. Вып. 2. С. 41.
15. Neklyudov I., Morozov O., Kulish V., Azhazha V., Lavrinenko S., Zhurba V. The Effects of Helium on Temperature Ranges of Hydrogen Isotopes Retention in Hastelloy-N Alloy // *J. Nucl. Mater.* 2011. Vol. 417. P. 1158.
16. Neklyudov I. M., Morozov O.M., Kulish V.G., Zhurba V.I., Khaimovich P.A., Galitskiy A.G. Hydrogen diagnostics of structural states 18Cr10NiTi steel // *Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36. P. 1192.
17. Ружицкий В. В., Грибанов Ю. А., Рыбалко В. Ф., Хазан С. М., Морозов А. Н., Мартынов И. С. Многоцелевая экспериментальная установка «СКИФ» // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационного материаловедение»*. 1989. Вып. 4(51). С. 84.
18. Хаймович П. А. Криодеформация металлов при всестороннем сжатии // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. 2006. Вып. 4(89). С. 28.
19. Брык В. В., Неклюдов И. М., Соколенко В. И., Стародубов Я. Д., Хаймович П. А. Низкотемпературная квазигидроэжекция как способ упрочнения конструкционных материалов // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2005. Т. 27, № 4. С. 551.
20. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник / Под ред. Лякишева Н. П. / Том 2. М.: Машиностроение, 1997. С. 871.
21. ASM Handbook. Vol. 3. Alloy Phase Diagrams, 1992, 500 p.
22. Неклюдов И. М., Ожигов Л. С., Шиляев Б. А., Лаптев И. Н., Пархоменко А. А., Морозов А. Н., Брык В. В., Бородин О. В. Водород в нержавеющих сталях элементов внутрикорпусных конструкций реактора ВВЭР-1000 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационного материаловедение»*. 2003. Вып. 3(83). С. 47.