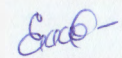


ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-2018-62

На правах рукописи



КОРНЕЕВА

Екатерина Александровна

СТРУКТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ОБЛУЧЕНИЯ
ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
В ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЯХ

Специальность: 01.04.07 — физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 03.12.2018.

Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 0,96. Тираж 100 экз. Заказ № 59559.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/

Дубна 2018

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флёрва
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель

Скуратов Владимир Алексеевич,

доктор физико-математических наук, начальник сектора ЛЯР ОИЯИ, г. Дубна

Официальные оппоненты

Приходько Кирилл Евгеньевич,

доктор физико-математических наук, доцент, начальник отдела структурных исследований и радиационных технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва

Цепелев Аркадий Борисович,

доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории воздействия излучений на металлы ИМЕТ РАН, г. Москва

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"

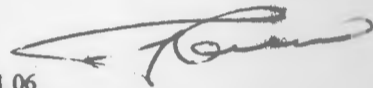
Защита диссертации состоится «28» сентября 2019 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 720.001.06 при Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) по адресу: 141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, д. 6.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ОИЯИ.

Автореферат разослан «24» сентября 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 720.001.06

к.ф.-м.н.



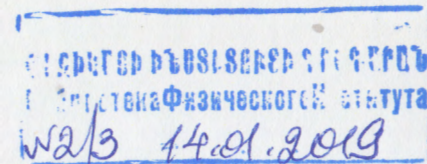
А. Г. Попоко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) сплавы рассматриваются в качестве перспективных конструкционных материалов для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) реакторов нового поколения [1,2]. Входящие в состав таких сталей дисперсные частицы оксида иттрия, характеризующиеся высокой термостойкостью, являются барьерами для движения дислокаций и эффективными стоками для радиационных дефектов, что повышает радиационную стойкость сталей в целом.

На сегодняшний день большинство научных работ, посвященных радиационной стойкости ДУО-сталей, направлены на исследование изменения механических свойств и микроструктуры под воздействием облучения нейтронами, а также легкими и тяжелыми ионами низких энергий (от нескольких десятков кэВ до единиц МэВ). Однако помимо нейтронов материалы трубок твэлов, контактирующих с ядерным топливом, подвергаются облучению осколками деления – тяжелыми ионами с энергией около 100 МэВ. Формирование в наночастицах оксидов специфических радиационных повреждений, характерных только для данного вида радиационного воздействия, таких как латентные треки, может привести к аморфизации оксидов и даже их диссоциации, что, в свою очередь, может отразиться на механических свойствах ДУО-стали. Практически все работы по структурным эффектам ионизации в наноразмерных материалах посвящены изучению металлических и полупроводниковых наночастиц в диэлектрических



матрицах, в то время как результаты исследований свойств оксидных частиц в металлических матрицах представлены всего в нескольких публикациях.

Глубина поврежденного слоя в металлах при облучении высокоэнергетическими ($E \geq 1$ МэВ/нуклон) тяжелыми ионами превышает несколько микрон, что значительно увеличивает диапазон возможных методик исследования, в частности, за счет применения методов наноиндентирования. Постоянно растущее число работ с использованием этих методов для изучения механических свойств реакторных материалов, в том числе и ДУО-сплавов, свидетельствует об их несомненной актуальности. Необходимо отметить, что в настоящее время в литературе практически нет данных по механическим свойствам ДУО-сплавов, облученных тяжелыми ионами высоких энергий.

Цель и задачи диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является исследование радиационно-стимулированных изменений структуры и механических свойств ДУО-сталей, вызванных облучением тяжелыми ионами с энергиями 1-3 МэВ/нуклон. В соответствии с целью исследования, поставлены и решены следующие задачи:

- методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изучены структурные изменения в наночастицах Y-Ti-O и Y-Al-O в ДУО-сталях ЭП450 и КР4 в зависимости от флюенса ионов, величины удельных ионизационных потерь энергии, температуры облучения и температуры пострадиационного отжига;

-проведены эксперименты по наноиндентированию ДУО-сталей, облученных ионами криптона и ксенона с энергиями осколков деления, и установлена зависимость уровня упрочнения от дозы радиационных повреждений.

Положения, выносимые на защиту.

- 1) Определение порогового значения удельных ионизационных потерь энергии быстрых тяжелых ионов для образования латентных треков в наночастицах пироксидов $Y_2Ti_2O_7$;
- 2) Результаты электронно-микроскопических исследований микроструктуры наночастиц Y-Ti-O и Y-Al-O в зависимости от флюенса ионов криптона (107 МэВ), ксенона (167 МэВ) и висмута (700 МэВ);
- 3) Данные электронно-микроскопических исследований морфологии латентных треков при разных температурах облучения и в процессе пострадиационного отжига;
- 4) Результаты исследования механических свойств ДУО-сталей ЭП450, Cr16 (Fe-16Cr-3W) и КР4, облученных ионами ксенона и криптона с энергиями осколков деления и установленная зависимость уровня радиационного упрочнения от дозы повреждений.

Научная новизна.

В настоящей работе впервые:

- изучено формирование радиационных дефектов в наночастицах оксидов в металлической матрице по каналу электронного торможения и установлено

пороговое значение удельных ионизационных потерь энергии для образования аморфных латентных треков в наночастицах пироклора $Y_2Ti_2O_7$;

- представлены результаты по эволюции микроструктуры наночастиц $Y-Ti-O$ и $Y-Al-O$ в зависимости от флюенса высокоэнергетических тяжелых ионов;

- получены данные о морфологии латентных треков в наночастицах $Y_2Ti_2O_7$ при разных температурах облучения и разных температурах пострadiационной термической обработки;

- методом наноиндентирования исследованы механические свойства ДУО-сталей, облученных быстрыми тяжелыми ионами, установлена зависимость уровня радиационного упрочнения от дозы радиационных повреждений.

Значимость полученных результатов.

Результаты исследований эволюции структуры вместе с изменениями механических свойств ДУО-сталей на примере ДУО-сталей ЭП450, Cr16 (Fe-16Cr-3W), КР123 и КР4 могут быть использованы для оценки эксплуатационных характеристик материалов, используемых в качестве оболочек твэлов в реакторах нового поколения.

Апробация работы.

Основные результаты проведенных исследований докладывались на следующих российских и международных конференциях: 5-ая Международная Конференция «Радиационные взаимодействия с материалами: теория и применение – 2014» (12-15 мая 2014 г., Каунас, Литва); XLIV Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (27-29 мая 2014 г.,

Москва, Россия); Международная конференция по Быстрым тяжелым ионам в материалах (SHIM-2015), (18-21 мая 2015 г., Дармштадт, Германия); 4-ый симпозиум сотрудничества ОИЯИ и Южно-Африканской республики (4th JINR-South Africa symposium), (21-25 сентября 2015 г., Дубна, Россия); XXII Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью 2015» (20-24 августа 2015 г., Москва, Россия); 15-ая Международная инженерная конференция «Наномеханические испытания материалов: научные исследования и разработки – V» (4-9 октября 2015 г., Албуфейра, Португалия); 43 совещание Программно-консультативного комитета ОИЯИ (РАС-2016), (Дубна, Россия, 28-29 января 2016 г.); 45 совещание Программно-консультативного комитета ОИЯИ (РАС-2017), (Дубна, Россия, 19-20 января 2017 г.).

Личный вклад.

Личный вклад автора является определяющим. Все результаты, приведенные в диссертации, полученные либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, двух приложений и списка цитируемой литературы, включающего 149 наименований. Работа содержит 113 страницы, 56 рисунков и 4 таблицы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность научной работы, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость. Приведены положения, выносимые на защиту. Кратко изложена структура диссертации.

В первой главе «Радиационное дефектообразование в ДУО-сплавах» (литературный обзор) представлен краткий обзор основных требований, предъявляемых к конструкционным материалам для оболочек твэлов реакторов IV поколения, рассмотрены особенности структуры и свойств ДУО-сталей. Приведены данные по радиационно-стимулированному изменению структуры оксидных наночастиц и механических свойств ДУО-сталей, представлены основные механизмы радиационного упрочнения, обоснован выбор методов исследования механических свойств материалов после облучения. В конце главы приведены постановка задачи и цель диссертационного исследования.

Вторая глава «Материалы и методы исследований» посвящена исследованию ДУО-сталей ЭП450, Cr16 (ВНИИМ им. А. А. Бочвара, Россия), КР4 (Университет Киото, Япония) [3,4] в исходном состоянии и использованным методам исследования. Данные ДУО-сплавы были предоставлены в рамках реализации координационного исследовательского проекта МАГАТЭ “Benchmarking of advanced materials preselected for innovative nuclear reactors”. Отдельные эксперименты проводились на ДУО-стали КР123 (Университет Киото, Япония) и на модельных образцах высокочистых меди и никеля (Advent Research Materials Ltd, MTI Corporation).

Оксидные частицы в ДУО-стали ЭП450 и КР123 представлены титанатом иттрия $Y_2Ti_2O_7$. Размеры частиц в ЭП450 варьируются от 5 до 200 нм, в КР123 — от 5 до 30 нм, средний размер и концентрация в обеих сталях составляет 10 нм и 10^{16} см^{-3} соответственно. $Y_2Ti_2O_7$ в ЭП450 с размерами до 10 нм имеют четкую огранку, частицы большего диаметра характеризуются округлой формой. В стали Cr16 присутствуют два типа оксидных частиц: Y_2TiO_5 и $Y_2Ti_2O_7$. Размеры частиц варьируются от 5 до 200 нм, средний размер — 10 нм, концентрация частиц составляет 10^{15} см^{-3} . Оксидные частицы в стали КР4 представлены алюмоиттриевым оксидом $Y_4Al_2O_9$ (YAM). Размеры частиц варьируются от 2 до 30 нм, средний размер составляет 5 нм, концентрация — 10^{16} см^{-3} .

Перед проведением структурных исследований и механических испытаний образцы подвергались механической шлифовке и полировке на установке DP-U2 (Struers, Denmark) с дальнейшей электрохимической полировкой.

Исследования микроструктуры ДУО-сталей были проведены методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на базе Центра высокоразрешающей электронной микроскопии университета им. Нельсона Манделы (Порт Элизабет, ЮАР). В работе использовались просвечивающие электронные микроскопы JEOL JEM 2100LaB6 и JEOL JEM-ARM200F с приставками для энергодисперсионного (ЭДС) анализа и спектроскопии характеристических потерь. Структурные исследования облученных материалов проводились на массивных (~400 мкм) образцах, и на предварительно утоненных перед облучением тонких фольгах. Тонкие образцы были приготовлены в геометрии

поперечного сечения (cross section), также были исследованы планарные образцы. Исследование поверхности ДУО-сталей после радиационно-термического воздействия осуществлялось методом РФЭС (рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии) на спектрометре K-Alpha (Thermo Fisher Scientific).

Для моделирования воздействия осколков деления образцы были облучены ионами Ag, Xe, Kr и Bi с энергиями 1-3 МэВ/нуклон на циклотронах ИЦ-100 и У-400 (ЛЯР ОИЯИ), и ионами Xe с энергией 1,67 МэВ/нуклон на циклотроне DC-60 (ИЯФ НЯЦ РК) при флюенсах $1 \cdot 10^{12}$ - $1 \cdot 10^{15}$ см⁻² в диапазоне температур от 300 до 1000К. Однородное распределение пучка ионов по площади мишеней достигалось за счет сканирования в вертикальном и горизонтальном направлениях (отклонение не превышало 5%). Контроль флюенса облучения с точностью 15% проводился при помощи цилиндра Фарадея, на нижнюю часть которого с помощью двустороннего углеродного скотча были прикреплены образцы. Средняя плотность потока ионов составляла $\sim 2 \cdot 10^{10}$ см⁻²с⁻¹. Изменение температуры образцов при облучении контролировалось с помощью образцов-свидетелей, к которым были подсоединены термодатчики. Благодаря специальным медным держателям образцов с водным охлаждением температура образцов в процессе облучения не превышала 80°C. Интегральная доза облучения для глубины 1 мкм от облученной поверхности и величина энергии электронных потерь рассчитывались с помощью программы SRIM-2013.

Облучение образцов проводилось как по стандартной методике, так и с использованием специальных поглощающих фильтров, позволяющих провести

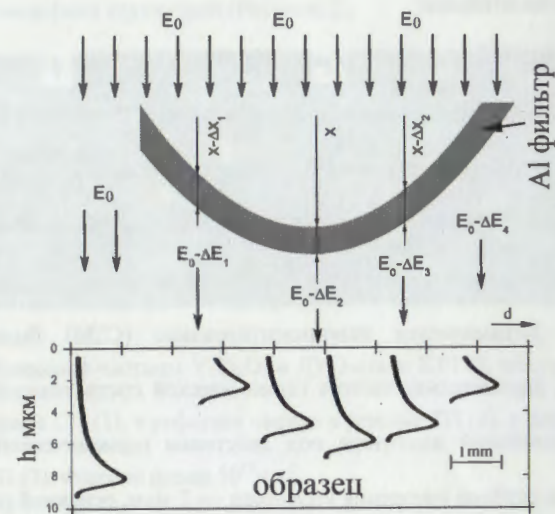


Рис. 1. Схема «развертки» профиля повреждений по поверхности образца с использованием поглощающего фильтра.

«развертку» профиля повреждений вблизи поверхности облученного материала [5]. Данные фильтры представляли собой Al фольги различной толщины, установленные либо плоско над образцом, либо на специальном U-образном стальном профиле (Рисунок 1), в последнем случае при исходной толщине фольги в 6 мкм толщина поглощающего фильтра варьировалась от 6 до 20 мкм.

Исследования механических свойств ДУО-сталей проводились методами квазистатического и динамического наноиндентирования с помощью NanoIndenter G200 (MTS NanoInstruments, США), Hysitron TI 750 Premier (Hysitron, США) и CSM

NHT (CSM Instruments). Квазистатическое наноиндентирование было проведено со скоростью относительной деформации $0,01 \text{ c}^{-1}$, контролируемой глубиной внедрения индентора и выдержкой при максимальной нагрузке в течение 10 секунд для ДУО-сталей и меди и 14 секунд для никеля. Глубина внедрения индентора составляла от 0,3 до 1 мкм. В квазистатическом режиме наноиндентирования было сделано не менее 20 измерений, на основании которых определялись величина твердости и стандартное отклонение. Динамическое наноиндентирование (CSM) было проведено со следующими параметрами: частота гармонической составляющей нагрузки 45 Гц, амплитуда колебаний индентора под действием гармонической нагрузки 2 нм, максимальная глубина внедрения индентора — 2 мкм, основной режим нагружения — с постоянной скоростью относительной деформации $0,01 \text{ c}^{-1}$ для исключения влияния скоростного фактора на величину твердости. Анализ данных для определения размерных эффектов проводился с использованием модели Nix и Gao, для обработки использовались данные по глубине внедрения индентора через каждые 20 нм.

В третьей главе «Результаты и обсуждения. Структурные исследования» представлены результаты структурных исследований ДУО-сталей при облучении тяжелыми высокоэнергетическими ионами в интервале температур от 300 до 1000К. Установлено, что оксидные частицы на основе Ti-Y-O в ДУО-сталях ЭП450, Cr16 и КР123 менее стабильны по сравнению с YAM-частицами: облучение ионами

криптона и ксенона приводит к формированию в частицах пирохлора латентных треков с рентгеноаморфной структурой (Рисунок 2).

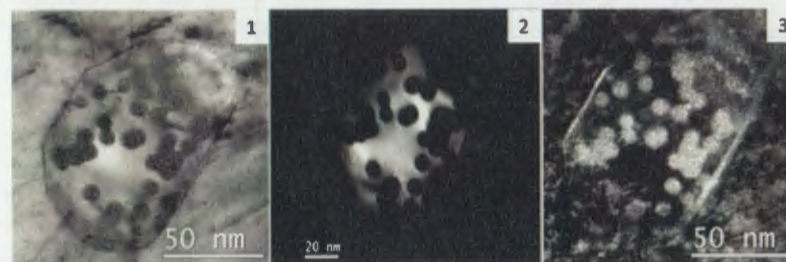


Рис. 2. ПЭМ-изображение частицы $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ в ДУО-стали КР123, облученной 167 МэВ Хе в режиме СП (1), в рефлексе оксида в режиме ТП (2), в рефлексе трека в режиме ТП (3). Флюенс ионов 10^{12} см^{-2} .

Для вариации уровня электронного торможения при определении порога образования латентных треков при облучении ионами Хе и Кг использовались поглощающие алюминиевые фильтры. Зависимость диаметра трека от величины ионизационных потерь энергии S_e была построена на основании подсчета не менее 10 значений диаметров треков для каждой энергии (Рисунок 3). Согласно полученной зависимости с учетом возможных эффектов рассеяния при облучении через фильтры порог образования треков в пирохлоре находится в интервале $7,4 \div 9,7 \text{ кэВ/нм}$.

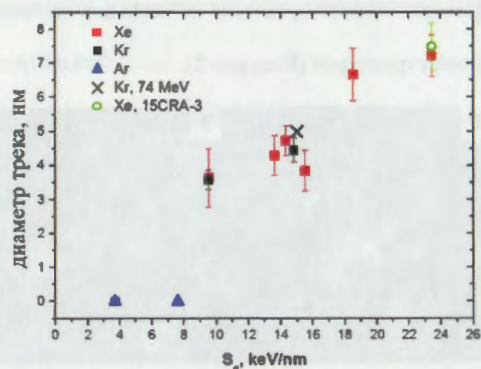


Рис. 3. Зависимость диаметра трека в наночастицах $Y_2Ti_2O_7$ от уровня удельных ионизационных потерь энергии ионов. × – данные работы [6].

При флюенсе ионов ксенона $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ латентные треки начинают перекрываться, приводя к полной аморфизации оксидов $Y-Ti-O$ при 10^{13} см^{-2} .

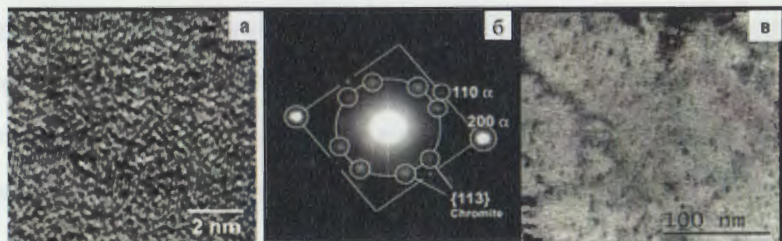


Рис. 4. Структура ДУО-стали КР4 после облучения 167 МэВ Хе до флюенса $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (1), соответствующая дифрактограмма (2), СП изображение ДУО-стали КР4 после облучения 167 МэВ Хе до флюенса $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (3).

При том же режиме облучения оксидные частицы $Y-Al-O$ с диаметром до 20 нм стабильны, однако в частицах с диаметром более 20 нм регистрируется нарушение кристаллической структуры со стороны воздействия пучка ионов. Аморфизация YAM -наночастиц была обнаружена только при флюенсе ионов Хе выше 10^{14} см^{-2} . При этом, предположительно в результате интенсивного ионного перемешивания, детектируются фазы хромитов, а в ферритной матрице наблюдаются дислокационные петли с плотностью $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (Рисунок 4).

Исследование структуры ДУО-сталей после высокотемпературного облучения показало, что латентные треки образуются во всем интервале температур от 300 до 700°C , при этом диаметр треков незначительно увеличивается с возрастанием температуры. Показано, что при высокотемпературном отжиге предварительно облученных тонких образцов, в приповерхностном слое происходит формирование оксидных фаз Me_xO_y , что подтверждается как ПЭМ-исследованиями (Рисунок 5), так и анализом РФЭС-спектров, снятых с постепенным травлением поверхности ионами Аг. Поскольку данные фазы могут взаимодействовать с уже имеющимися в структуре латентными треками, использование предварительно утоненных образцов для исследования радиационной стойкости ДУО-сталей при высоких температурах не корректно.

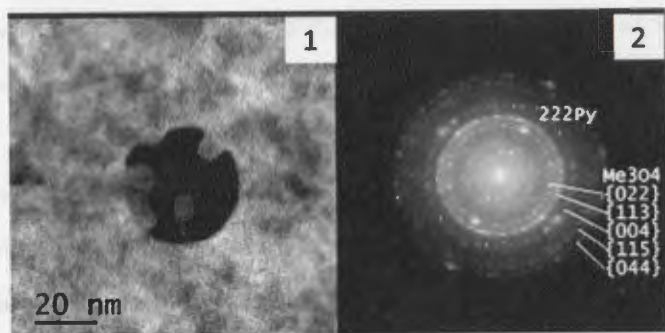


Рис. 5. Наночастица пирохлора в стали ЭП450 после облучения 167 МэВ Хе до флюенса 10^{12} см⁻² с последующим отжигом при температуре 450°C в режиме СП (1), соответствующая дифрактограмма (2).

В структуре ДУО-стали ЭП450 отмечается большое количество частично когерентных ферритной матрице оксидных частиц с деформированной кристаллической решеткой, уровень деформации может достигать 10%. Остаточные напряжения, вызванные такими деформациями, во многом определяют изменение структуры при высокотемпературном ионном облучении, в частности, они могут способствовать рекристаллизации латентных треков. В режиме перекрытия треков вне зависимости от температуры облучения и температуры послерадиационного отжига восстановления структуры оксидов не происходит – все частицы находятся в рентгеноаморфном состоянии.

Латентные треки наряду с частицами Y-Ti-O были обнаружены также в карбидах Cr₂₃C₆. Треки регистрировались в образцах сталей Cr16 и ЭП450, облученных ионами Вi с энергией 700 МэВ ($S_e = 53$ кэВ/нм) и Хе с энергией 167 МэВ

($S_e = 35$ кэВ/нм). Таким образом, значение 35 кэВ/нм может рассматриваться как верхняя граница уровня электронного торможения для формирования треков в наночастицах карбидов Cr₂₃C₆. Облучение в режиме многократного перекрытия трековых областей переводит карбиды в аморфное состояние, что подтверждается как результатами ПЭМ анализа, так и данными, полученными методом рентгеновской дифракции.

В четвертой главе «Результаты и обсуждения. Механические свойства» представлены результаты механических исследований ДУО-сталей и модельных образцов Cu и Ni методами наноиндентирования. Допустимый интервал по глубинам внедрения индентора для определения уровня радиационного упрочнения был определен с помощью метода CSM вместе с использованием модели Nix и Gao, базирующейся на концепции геометрически необходимых дислокаций (1) [7]:

$$\left(\frac{H}{H_0}\right)^2 = 1 + \frac{h^*}{h}, \quad (1)$$

где h — глубина внедрения индентора при наноиндентировании, h^* — характерная величина, зависящая от индентируемого материала и угла при вершине индентора, H_0 — значение микротвердости при большой глубине внедрения индентора ($h \gg h^*$).

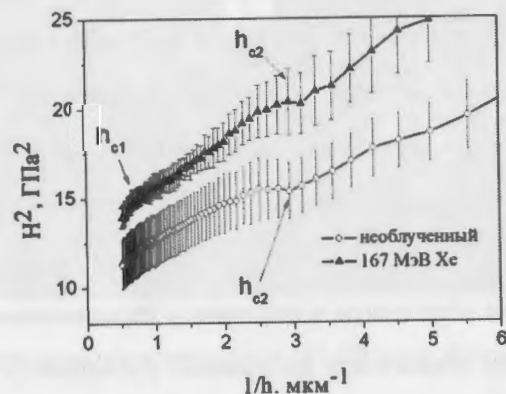


Рис. 6. Результаты наноинdentирования в режиме CSM исходной и облученной ионами ксенона ДУО-стали КР4 в координатах H^2-1/h . Флюенс ионов $- 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Результаты наноинdentирования ДУО-стали КР4 в исходном состоянии и после облучения ионами Кг и Хе (Рисунок 6) в координатах H^2-1/h показали, что допустимый интервал глубин внедрения индентора ограничен двумя типами точек перегиба, которые соответствуют критическим величинам h_{c1} и h_{c2} . Величина h_{c2} соответствует глубине 300 нм и характеризует наличие размерного эффекта при инdentировании (англ. indentation size effect – ISE), что одинаково работает как для облученного, так и для исходного материала. Точки перегиба второго типа характерны только для облученных образцов, при этом для облучения ионами Хе значение h_{c1} составляет 1,6 мкм, а ионами Кг—1,3 мкм.

С учетом полученных данных о допустимом диапазоне твердость определялась на глубине 1 мкм от облученной поверхности. Предел текучести $\sigma_{ду}$

находился из соотношения $HV = 3,06 \times \sigma_{ду}$. Зависимость предела текучести сталей ЭП450, КР4 и Сг16, облученных ионами Хе и Кг от дозы радиационных повреждений представлена на Рисунок 6.

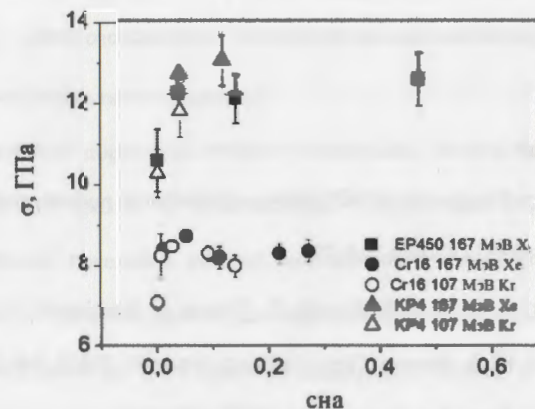


Рис. 6. Предел текучести ДУО-сталей как функция дозы радиационных повреждений.

Приведенные данные свидетельствуют о выходе зависимости предела текучести на стадию насыщения при дозе выше 0,05 сна. Величина уровня радиационного упрочнения на этой стадии составляет 10-15%, что согласуется с моделью барьерного упрочнения.

В заключении диссертации кратко обобщены результаты проведенных исследований.

В Приложении 1 приведено описание методики использования поглощающих фильтров при исследовании механических свойств методом непрерывного измерения жесткости на примере монокристаллической меди (MTI Corporation).

В Приложении 2 приведены теплофизические параметры $Y_2Ti_2O_7$, использовавшиеся при расчетах в модели неупругого термического пика.

Цитируемая литература

1. S. Ukai, M. Fujiwara Perspective of ODS alloys application in nuclear environments // J. Nucl. Mater. 307–311 (2002) 749–757.
2. A. Kimura, H.-S. Cho, N. Toda, R. Kasada, K. Yutani, H. Kishimoto, N. Iwata, S. Ukai, M. Fujiwara High Burnup Fuel Cladding Materials R&D for Advanced Nuclear Systems // J. Nucl. Sci. Technol. 44 (2007,) 323–328.
3. A.A. Nikitina, V.S. Ageev, A.P. Chukanov, V. V. Tsvelev, N.P. Porezanov, O.A. Kruglov R&D of ferritic-martensitic steel EP450 ODS for fuel pin claddings of prospective fast reactors // J. Nucl. Mater. 428 (2012,) 117–124.
4. L.L. Hsiung, M.J. Fluss, S.J. Tumey, B.W. Choi, Y. Serruys, F. Willaime, A. Kimura Formation mechanism and the role of nanoparticles in Fe-Cr ODS steels developed for radiation tolerance // Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. 82 (2010,) 1–13.
5. V.F. Reutov New methods of materials irradiation with high energy (≥ 1 MeV) charged particles // J. Nucl. Mater. 233 (1996,) 1586–1589.
6. V.A. Skuratov, A.S. Sohatsky, J.H. O'Connell, K. Kornieieva, A.A. Nikitina, J.H.

Neethling, V.S. Ageev Swift heavy ion tracks in $Y_2Ti_2O_7$ nanoparticles in EP450 ODS steel // J. Nucl. Mater. 456 (2015,) 111–114.

7. W.D. Nix, H.J. Gao Indentation size effects in crystalline materials: A law for strain gradient plasticity // J. Mech. Phys. Solids 46 (1998,) 411–425.

Основные результаты и выводы

- 1) Определены пороговая энергия электронных потерь энергии для образования латентных треков в наночастицах $Y_2Ti_2O_7$ при облучении ДУО сплавов быстрыми тяжелыми ионами, составляющая $7,4 \div 9,7$ кэВ/нм и зависимость диаметра треков от уровня удельных ионизационных потерь энергии в диапазоне от пороговой до 24 кэВ/нм. Формирование треков в $Y_2Ti_2O_7$ обнаружено в интервале температур облучения $300 \div 1000$ К, при этом размер трека имеет тенденцию к увеличению с ростом температуры.
- 2) Установлена верхняя граница уровня электронного торможения для формирования латентных треков в частицах карбидов $Me_{23}C_6$ - 35 кэВ/нм.
- 3) Показано, что облучение в режиме многократного перекрытия латентных треков приводит к полной аморфизации наночастиц Y-Ti-O и $Me_{23}C_6$.
- 4) Установлено, что оксидные частицы $Y_4Al_2O_9$ в ДУО-стали КР4 являются более радиационно-стойкими к воздействию высокоэнергетических тяжелых ионов по сравнению с $Y_2Ti_2O_7$.
- 5) Показано, что рекристаллизация частично аморфизованных частиц $Y_2Ti_2O_7$ при послерадиационной термической обработке зависит от состояния их исходной

структуры. Восстановление полностью аморфизованных наночастиц Y-Ti-O не наблюдается.

- 6) Методами наноиндентирования изучены механические свойства ДУО-сталей ЭП-450, Ст16 и КР4, облученных ионами криптона и ксенона с энергией 1,2 МэВ/нуклон. Показано, что зависимость уровня радиационного упрочнения сталей от дозы радиационных повреждений выходит на стадию насыщения при 0,05 сна. Величина радиационного упрочнения, составляющая 10-15% на стадии насыщения, хорошо описывается моделью барьерного упрочнения.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Kornieieva K., Sohatsky A., O'Connell J., Skuratov V., Golovin Y., Korenkov V., Neethling J. Low-temperature radiation hardening of EP450 and KP4 ODS steels irradiated with 1.2 MeV/amu Xe ions. In: Radiation interaction with materials: fundamentals and applications-2014. Kaunas, Lithuania, 2014, pp. 25-28.
2. Skuratov V. A., Sohatsky A.S., O'Connell J.H., Kornieieva K., Nikitina A.A., Neethling, J.H., Ageev V.S. Swift heavy ion tracks in $Y_2Ti_2O_7$ nanoparticles in EP450 ODS steel //Journal of Nuclear Materials. – 2015. – v. 456. – pp. 111-114.
3. Skuratov V. A., Sohatsky A. S., O'Connell J. H., Kornieieva K., Nikitina A. A., Neethling J. H., Ageev V. S., Zdorovets M., Volkov A. D. Stability of Y-Ti-O nanoparticles in ODS alloys during heat treatment and high temperature swift heavy ion irradiation //physica status solidi (c). – 2016. – v. 13. – №. 10-12. – pp. 927-931.

4. Skuratov V. A., Sohatsky A.S., O'Connell J.H., Kornieieva K., Nikitina A.A., Uglov V.V., Neethling J.H., Ageev V.S. Latent tracks of swift heavy ions in $Cr_{23}C_6$ and Y-Ti-O nanoparticles in ODS alloys //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2016. – v. 374. – pp. 102-106.
5. Kornieieva K., Skuratov V., Sohatsky A., O'Connell J.H., Golovin Yu., Korenkov V., Neethling J.H. Nanomechanical testing of ODS steels irradiated with 1 MeV/amu heavy ions //Philosophical Magazine. – 2016. – v. 96, № 32-34, pp. 3430-3441.
6. Корнеева Е.А., Сохацкий А.С., О'Connell J., Скуратов В.А., Никитина А.А., Головин Ю.И., Коренков В.В., Neethling J. Радиационное упрочнение ДУО-сталей, облученных тяжелыми ионами с энергиями осколков деления // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 4. с. 10-17.

1. The first part of the paper discusses the general theory of the...
2. The second part of the paper discusses the general theory of the...
3. The third part of the paper discusses the general theory of the...
4. The fourth part of the paper discusses the general theory of the...
5. The fifth part of the paper discusses the general theory of the...
6. The sixth part of the paper discusses the general theory of the...
7. The seventh part of the paper discusses the general theory of the...
8. The eighth part of the paper discusses the general theory of the...
9. The ninth part of the paper discusses the general theory of the...
10. The tenth part of the paper discusses the general theory of the...

