

*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

**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 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. в \_\_\_ час. \_\_\_ 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 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 720.001.06

к.ф.-м.н.,

А. Г. Попенко

## 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 пострadiационного 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 пироклора  $Y_2Ti_2O_7$ ;
- 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 пирохлора  $Y_2Ti_2O_7$ ;

- 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 бóльшего 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 Ar, 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<sup>-2</sup> 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<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Изменение температуры образцов при облучении контролировалось с помощью образцов-свидетелей, к которым были подсоединены термопары. 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

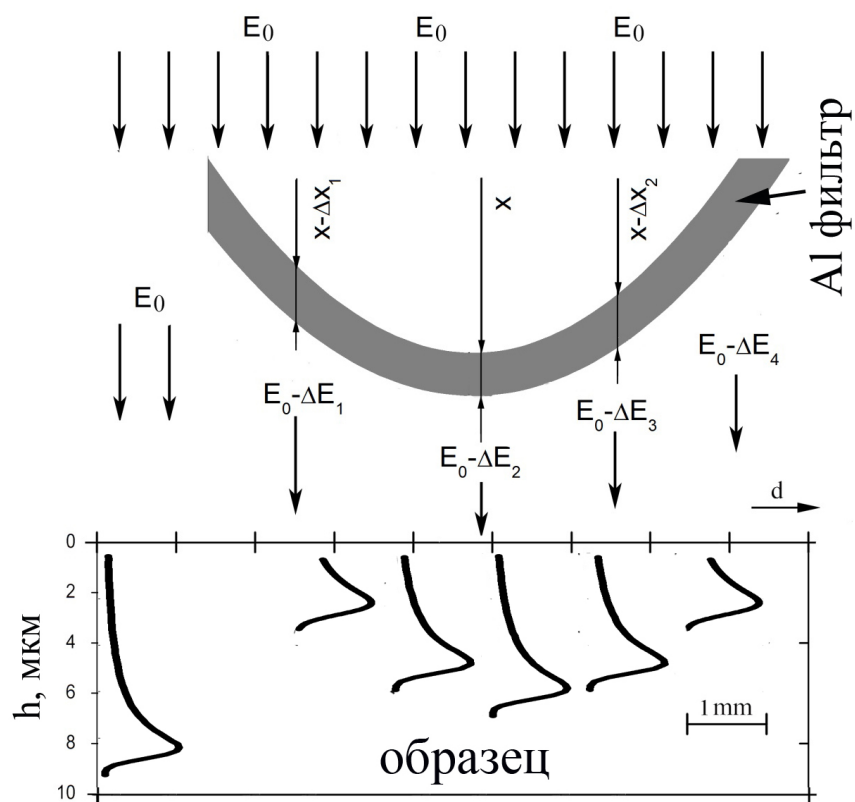


Рис. 1. Схема «развертки» профиля повреждений по поверхности образца с использованием поглощающего фильтра.

«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).

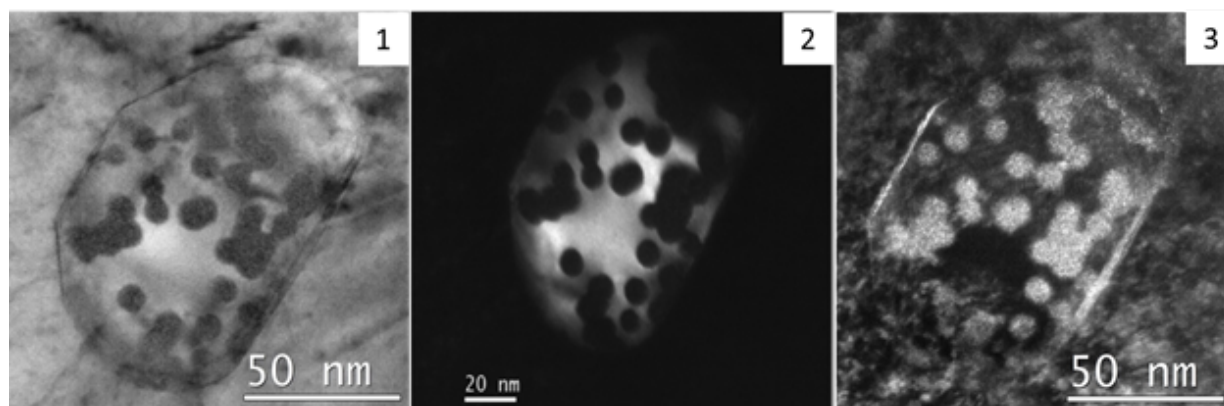


Рис. 2. ПЭМ-изображение частицы  $Y_2Ti_2O_7$  в ДУО-стали КР123, облученной 167 МэВ Хе в режиме СП (1), в рефлексе оксида в режиме ТП (2), в рефлексе трека в режиме ТП (3). Флюенс ионов  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

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  $7,4 \div 9,7 \text{ кэВ/нм}$ .

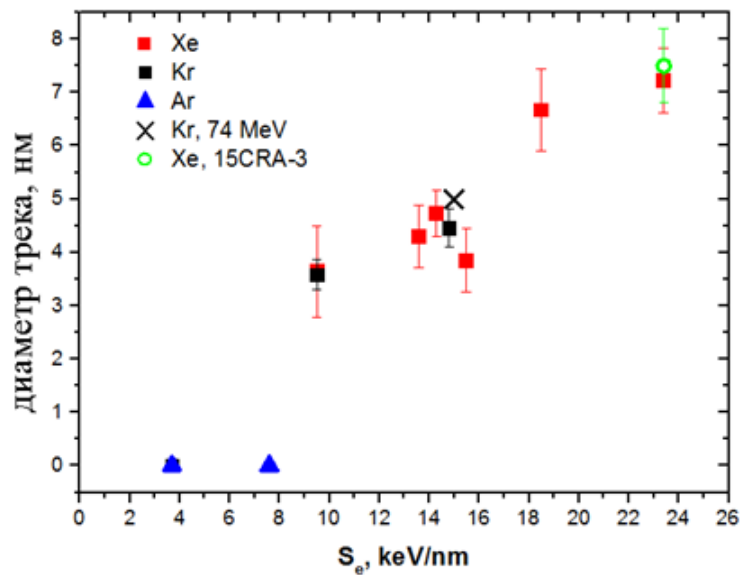


Рис. 3. Зависимость диаметра трека в наночастицах  $Y_2Ti_2O_7$  от уровня удельных ионизационных потерь энергии ионов.  $\times$  – данные работы [6].

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

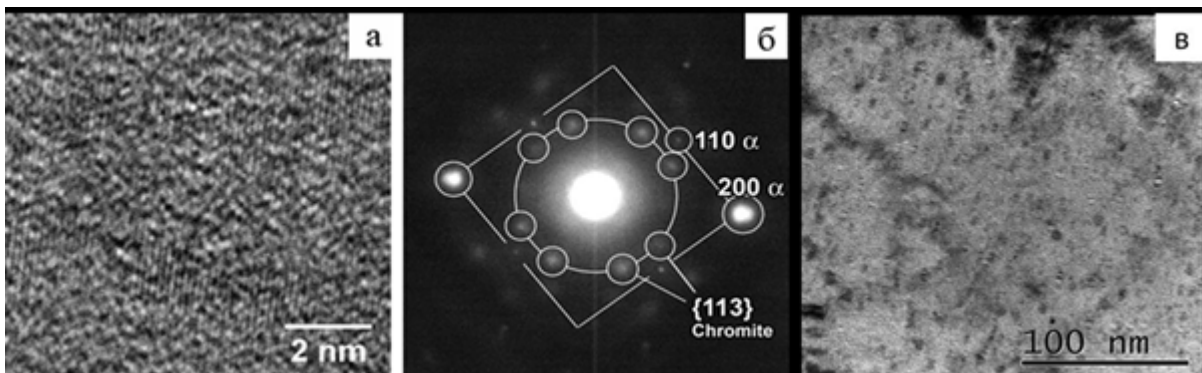


Рис. 4. Структура ДУО-стали КР4 после облучения 167 МэВ Хе до флюенса  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (1), соответствующая дифрактограмма (2), СП изображение ДУО-стали КР4 после облучения 167 МэВ Хе до флюенса  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (3).

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. Амorfизация YAM-наночастиц была обнаружена только при флюенсе ионов Хе выше  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>. При этом, предположительно в результате интенсивного ионного перемешивания, детектируются фазы хромитов, а в ферритной матрице наблюдаются дислокационные петли с плотностью  $\sim 5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> (Рисунок 4).

Исследование структуры ДУО-сталей после высокотемпературного облучения показало, что латентные треки образуются во всем интервале температур от 300 до 700°С, 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 Ar. 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.

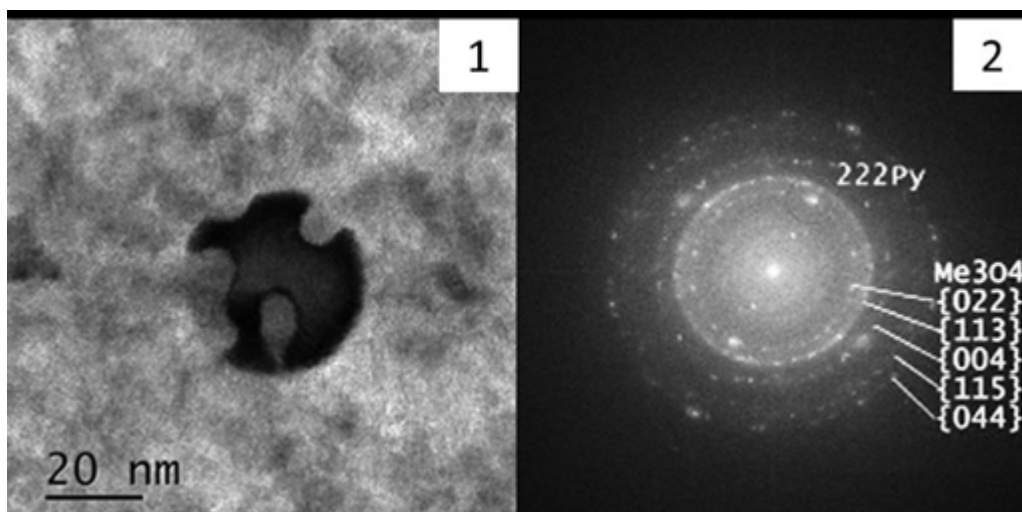


Рис. 5. Наночастица пирохлора в стали ЭП-450 после облучения 167 МэВ Хе до флюенса  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> с последующим отжигом при температуре 450°С в режиме СП (1), соответствующая дифрактограмма (2).

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 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Треки регистрировались в образцах сталей Cr16 и ЭП450, облученных ионами Вi с энергией 700 МэВ ( $S_e = 53$  кэВ/нм) и Хе с энергий 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  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . 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 ( $h \gg h^*$ ).

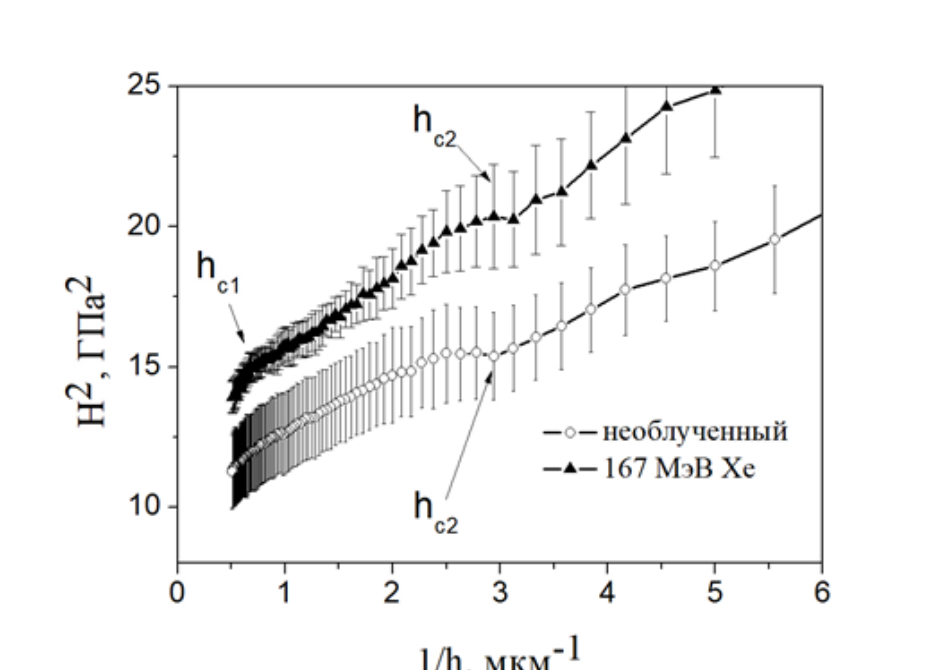


Рис. 6. Результаты наноиндентирования в режиме CSM исходной и облученной ионами ксенона ДУО-стали КР4 в координатах  $H^2-1/h$ . Флюенс ионов –  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

Результаты наноиндентирования ДУО-стали КР4 в исходном состоянии и после облучения ионами Kr 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 индентировании (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 Kr—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  $HV = 3,06 \times \sigma_{\text{ду}}$ . Зависимость предела текучести сталей ЭП450, КР4 и Cr16, облученных ионами Хе и Кг от дозы радиационных повреждений представлена на Рисунке 6.

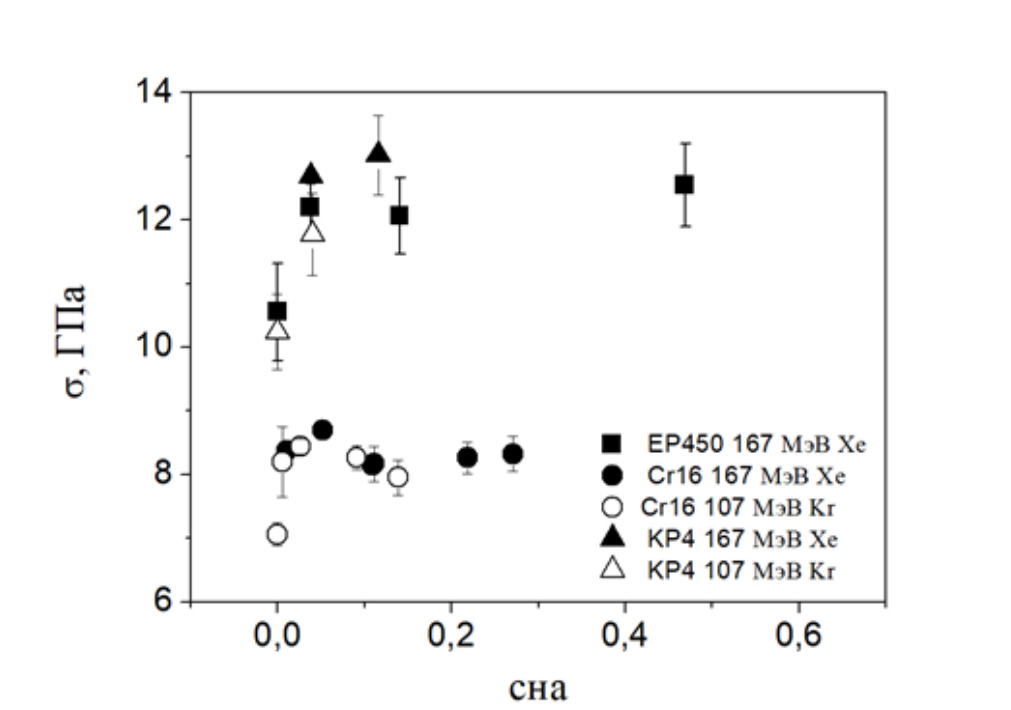


Рис. 6. Предел текучести ДУО-сталей как функция дозы радиационных повреждений.

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 **заклучении** 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 ( $\geq 1$  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.

- б) Методами наноиндентирования изучены механические свойства ДУО-сталей ЭП-450, Cr16 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<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 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.