

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 720.001.06  
в Международной межправительственной организации  
Объединенный институт ядерных исследований

№252 от 18 марта 2019 года

### Присутствовали:

Председатель совета:	Оганесян Ю.Ц.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Зам. председателя совета	Аксёнов В.Л.	доктор физ-мат наук	01.04.07
Ученый секретарь совета:	Попеко А.Г.	кандидат физ-мат. наук	01.04.16

### Члены совета:

Авдеев М.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Апель П.Ю.	доктор хим. Наук	01.04.01
Балагуров А.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Гикал Б.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Гледенов Ю.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Головков М.С.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Джолос Р.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Дмитриев С.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Изосимов И.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Иткис М.Г.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Пенионжкевич Ю.Э.	Доктор физ.мат наук	01.04.16
Плакида Н.М.	Доктор физ-иат наук	01.04.07
Скуратов В.А.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Тер-Акопьян Г.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Утенков В.К.	доктор физ-мат. наук	01.04.01

**Оганесян Ю.Ц.:** Рассматриваем защиту диссертации, которую подготовила Корнеева Екатерина Александровна на тему «Структурные эффекты облучения ионами высоких энергий в дисперсно-упрочненных оксидами сталях», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических

наук по специальности 01.04.07 «физика конденсированного состояния». Научный руководитель - Скуратов Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, начальник сектора ЛЯР, ОИЯИ. Официальные оппоненты – Приходько Кирилл Евгеньевич, доктор физико-математических наук, доцент, начальник отдела структурных исследований и радиационных технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» и Цепелев Аркадий Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории воздействия излучений на металлы ИМЕТ РАН присутствуют на защите. Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

**Попеко А.Г.:** Корнеева Екатерина Александровна родилась в городе Харьков, окончила Харьковский национальный университет, аспирантура – Белгородский государственный университет. В настоящее время – младший научный сотрудник НХП ЛЯР. Все документы представлены, оппоненты присутствуют, документы своевременно размещены на сайте ОИЯИ и информационной системе ВАК.

**Оганесян Ю.Ц.:** Вопросы есть?

**Пенионжкевич Ю.Э.:** А сколько лет в аспирантуре?

**Попеко А.Г.:** С 2009 года по 2012.

**Оганесян Ю.Ц.:** Еще вопросы? Если нет, тогда, Екатерина Александровна, пожалуйста.

**Корнеева Е.А.:** Здравствуйте! Позвольте представить диссертацию на тему: «Структурные эффекты облучения ионами высоких энергий в дисперсно-упрочненных оксидами сталях».

В настоящее время активно ведутся разработки новых конструкционных материалов для ядерных реакторов, которые способны выдерживать большие дозы повреждений при высоких температурах. Одними из перспективных материалов для оболочек тепловыделяющих элементов рассматриваются ферритные дисперсно-упрочненные оксидами стали или ДУО-стали.

В структуре ДУО-сталей содержатся наноразмерные термостабильные частицы

на основе оксидов иттрия, которые способны выступать в качестве стопоров для движения дислокаций, стоками для радиационных дефектов и подавлять вакансионное распухание. Наличие оксидных частиц обуславливает уникальные свойства самих ДУО-сталей, как например, высокие показатели сопротивления высокотемпературной ползучести и устойчивости к вакансионному распуханию. Поскольку при эксплуатации ДУО-сталей предполагается контакт с топливом, то вопрос радиационной стойкости оксидных частиц представляет особый интерес.

В настоящее время существует довольно большое количество работ, посвященных радиационной стойкости ДУО-сталей при облучении нейтронами или ионами с энергиями до 1 МэВ, в которых было показано, что оксидные частицы устойчивы к дефектообразованию по каналу упругих столкновений. В то же время известно, что диэлектрические материалы крайне восприимчивы к высоким уровням ионизации, которые имеют место при облучении осколками деления. В структуре таких материалов могут образовываться латентные треки, размерами несколько нм, что сопоставимо с размерами оксидных частиц в ДУО-сталях. Несмотря на то, что пробег ионов в ДУО-сталях составляет всего несколько микрон, изменения поверхностных слоев стали могут значительно изменить функциональные свойства материалов, которые должны быть использованы в качестве оболочек ТВЭЛОВ.

Актуальность диссертации обусловлена тем, что до настоящей работы не было проведено исследований радиационной стойкости оксидных частиц в металлической матрице по каналу электронного торможения и не было проведено соответствующей оценки изменения механических свойств ДУО-сплавов.

Целью работы было исследование радиационно-стимулированных изменений структуры и свойств ДУО-сталей, облученных быстрыми тяжелыми ионами. В соответствии с целью были поставлены и решены следующие задачи:

-методами просвечивающей электронной микроскопии были изучены структурные изменения в оксидных частицах в ДУО-сталях в зависимости от различных параметров облучения и температуры пострадиационного отжига;

-проведены эксперименты по наноиндентированию ДУО-сталей, облученных быстрыми тяжелыми ионами и установлена зависимость уровня упрочнения от дозы радиационных повреждений.

В работе исследовались три типа ферритных сталей с двумя типами оксидных частиц. В таблице представлен элементный состав ДУО-сталей. Облучение ионами Хе и Кг с энергиями осколков деления проводилось при температурах облучения от комнатной до 700°C. Основные параметры облучения приведены в таблице. Структурные исследования проводились на базе Центра высокоразрешающей электронной микроскопии университета им. Нельсона Манделы.

Оксидные частицы в ДУО-сталях ЭП450 и Ст16 представлены титанатом иттрия  $Y_2Ti_2O_7$ , также присутствует небольшое количество орторомбической фазы  $Y_2TiO_5$ . Также в структуре фиксируется довольно большое количество карбидов хрома, которые декорируют ферритные зерна. Их наличие подтверждается рентгеновской дифракцией.

При облучении в режиме формирования индивидуальных треков в частицах пирохлора образуются контрастные области размером несколько нм, которые являются латентными треками. Их плотность совпадает с флюенсом ионов. На слайде представлены увеличенные изображения оксидных частиц с треками, а также картина высокоразрешающей электронной микроскопии. Можно видеть, что структура трека рентгеноаморфная.

Для определения порогового уровня удельных ионизационных потерь энергии для образования треков была проведена серия экспериментов с использованием поглощающих фильтров, что позволило варьировать энергию торможения. Основные параметры этих экспериментов приведены в таблице. Были проанализированы частицы с размерами более 10 нм и получена следующая зависимость диаметра трека от уровня энергии торможения. Можно видеть, что с увеличением энергии торможения размер трека возрастает. До настоящей работы была известна только одна работа, в которой наблюдались треки в пирохлоре, результаты этой работы отмечены на слайде. Также на график нанесены данные для ДУО-стали 15CRA-3. С учетом дисперсии ионов по энергии при прохождении пучка через фильтр, можно сказать, что пороговое значение энергии торможения для образования треков находится в интервале от 7,4 до 9,7 кэВ/нм. Поскольку размеры треков для разных ДУО-сталей близки, то можно сказать, что ферритная матрица не оказывает какого-либо существенного влияния на процессы образования треков.

Размер трека и пороговая энергия для их образования - это основные параметры, которые используются для верификации всех теоретических моделей, описывающих процессы трекообразования. В нашей работе мы получили хорошее согласие между экспериментально полученными данными и расчетными параметрами треков, полученными в рамках модели термического пика. В рамках данной модели радиус трека определяется как область вокруг ионной траектории, в которой температура решетки превысила температуру плавления. Из-за высокой скорости охлаждения расплавленная область не успевает эпитаксиально рекристаллизоваться и застывает в аморфном или мелкокристаллическом состоянии. Треки были обнаружены во всем диапазоне температур от комнатной до 700°C. При этом, наблюдалась тенденция к незначительному увеличению диаметра трека с ростом температуры. Это также согласуется с моделью термического пика, поскольку при одинаковом значении энергии, передаваемой в электронную подсистему, размеры расплавленной области будут зависеть от разницы между температурой решетки и температурой плавления, и чем меньше будет эта разница, тем больше будет размер трека.

Наличие латентных треков вызывает деформацию кристаллической решетки оксидных частиц, причем деформации могут достигать нескольких процентов. По всей видимости, наличие внутренних напряжений и размеры оксидной частицы могут оказывать влияние на процессы рекристаллизации при пострadiационном отжиге. На слайде приведены ПЭМ-изображения для двух оксидных частиц различного размера и с различной степенью деформации кристаллической структуры, в которых после отжига латентные треки либо полностью рекристаллизовались, либо все еще наблюдаются.

При увеличении флюенса ионов, т.е. при облучении в режиме перекрытия треков, частицы пироклора полностью аморфизуются, при этом рекристаллизации структуры оксидов при пострadiационном отжиге образцов, облученных в режиме перекрытия треков, не происходит.

Частицы карбидов рассматриваются как одни из наиболее радиационно стойких диэлектриков. В настоящее время ведутся разработки новых типов сталей, где основными упрочняющими частицами являются именно карбиды, поэтому радиационная стойкость карбидов также представляет интерес.

В нашей работе мы рассматривали частицы карбида  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Впервые было обнаружено образование треков в частицах карбида: на снимке можно видеть протяженные области размерами несколько нм по направлению пробега ионов. Эти области являются аморфными. В работе не было задачи точного определения порогового значения уровня торможения для образования треков в карбидах, однако, можно сказать, что верхняя граница составляет 35 кэВ/нм. При увеличении флюенса ионов, при облучении в режиме перекрытия треков все карбиды аморфизуются, что подтверждается как кольцами на дифрактограммах, так и отсутствием соответствующих пиков на картинах рентгеновской дифракции.

Эксперименты по облучению проводились как на объемных, там и на предварительно утоненных образцах, уже готовых для наблюдений в просвечивающем электронном микроскопе. Использование тонких образцов для структурных исследований позволяет оценивать одну и ту же оксидную частицу до и после облучения. Для образцов, облученных при комнатной температуре никакого различия в структуре латентных треков для массивных и тонких образцов обнаружено не было. Однако, было показано, что при воздействии температуры в предварительно утоненных образцах в приповерхностном слое формируются дополнительные оксидные фазы, которые могут взаимодействовать с уже имеющимися латентными треками. Эти фазы фиксируются как с помощью дифракции, так и на рентгеновских фотоэлектронных спектрах. Дополнительная чистка в камере спектрометра ионами аргона приводит к существенному уменьшению пика кислорода, что также свидетельствует о том, что оксидные фазы находятся именно на поверхности. Таким образом, результаты структурных исследований ДУО-сталей после высокотемпературного облучения или пострадиационного отжига на предварительно утоненных образцах некорректны.

В ДУО-стали КР4 оксидные частицы представлены частицами YAM –  $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_9$ . Частицы YAM демонстрируют большую радиационную стойкость по сравнению с частицами пироклора: они сохраняют кристаллическую структуру вплоть до облучения в режиме перекрытия треков и латентных треков в их структуре не наблюдается. При увеличении флюенса ионов, при облучении в режиме ионного перемешивания, YAM-частицы полностью аморфизуются. На месте их

первоначального нахождения фиксируются фазы хромитов, а в ферритной матрице регистрируются дислокационные петли с плотностью  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Изменение механических свойств было проведено с помощью метода наноиндентирования. В данном методе происходит внедрение жесткого аттестованного индентора в исследуемый материал и одновременная запись кривой нагрузка – глубина внедрения индентора. Поскольку существует однозначная связь между характеристикой, получаемой наноиндентированием, – нанотвердостью, и пределом текучести, метод наноиндентирования довольно широко применим в радиационном материаловедении. Он используется даже для материалов, которые были облучены ионами с энергиями несколько сотен кэВ, т.е. в которых поврежденный слой составляет всего несколько сотен нанометров. В нашем случае поврежденный слой находится на глубине в несколько микрон и одной из задач было определение критической глубины внедрения индентора, при которой бы не было влияния необлученной подложки.

Результаты, полученные наноиндентированием, были перестроены согласно модели Никса и Гао в координаты  $H^2-1/h$  и получены зависимости для необлученной и облученной ионами Кг и Хе ДУО-стали. Таким образом, был определен диапазон допустимых глубин внедрения индентора для определения радиационного упрочнения. Верхняя граница составила 300 нм и связана с размерным эффектом при индентировании, нижняя граница составила 1,5 мкм и связана с влиянием необлученного слоя. Таким образом, исследование радиационного упрочнения на глубине 1/10 от пробега ионов полностью исключает влияние необлученного материала. Была получена следующая зависимость предела текучести от дозы радиационных повреждений. Можно видеть, что уровень радиационного упрочнения выходит на стадию насыщения, начиная с дозы 0,05 сна и составляет 10-15% для всех типов ДУО-сталей. Полученное значение радиационного упрочнения удовлетворительно описывается моделью барьерного упрочнения, где в качестве основных дефектов, выступающих стопорами для движения дислокаций являются дислокационные петли.

Выводы по диссертационной работе:

- 1) Определена пороговая величина удельных ионизационных потерь энергии

для образования латентных треков в наночастицах  $Y_2Ti_2O_7$  при облучении быстрыми тяжелыми ионами, составляющая 7,4-9,7 кэВ/нм и зависимость диаметра треков от уровня электронного торможения в диапазоне от пороговой до 24 кэВ/нм. Формирование треков обнаружено в интервале температур облучения 300÷1000К, при этом размер трека имеет тенденцию к увеличению с ростом температуры.

2) Установлена верхняя граница уровня электронного торможения для формирования латентных треков в частицах  $Me_{23}C_6$  – 35 кэВ/нм.

3) Показано, что облучение в режиме многократного перекрытия латентных треков приводит к полной аморфизации частиц  $Y-Ti-O$  и  $Me_{23}C_6$ .

4) Установлено, что  $Y_4Al_2O_9$  в ДУО-стали КР4 являются более стабильными по сравнению с  $Y_2Ti_2O_7$  при облучении высокоэнергетичными тяжелыми ионами.

5) Показано, что рекристаллизация частично аморфизованных частиц  $Y_2Ti_2O_7$  при пострadiационном отжиге зависит от состояния их структуры. Восстановления полностью аморфизованных частиц  $Y_2Ti_2O_7$  не наблюдается.

6) Установлено, что геометрия образцов может способствовать появлению артефактов при структурных исследованиях: на предварительно утоненных образцах при воздействии температуры и облучения в результате взаимодействия между оксидной частицей и окружающей ферритной матрицей возможно формирование новых фаз.

7) Методами наноиндентирования изучены механические свойства ДУО-сталей Cr16, ЭП450 и КР4, облученных высокоэнергетическими ионами криптона и ксенона до дозы повреждений 0,4 сна. Установлено, что уровень радиационного упрочнения всех ДУО-сталей выходит на стадию насыщения при 0,05 сна и составляет 10-15%.

Положения, выносимые на защиту:

1) Определение порогового значения удельных ионизационных потерь энергии быстрых тяжелых ионов для образования латентных треков в наночастицах пирохлора  $Y_2Ti_2O_7$ ;

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 пострadiационного 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.

По материалам диссертации опубликовано 6 работ. На этом все, спасибо за внимание!

**Оганесян Ю.Ц.:** Для того, чтобы лучше организовать обсуждение диссертации, я прошу Виктора Лазаревича вести наше заседание. Ему эта тема ближе.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо, Юрий Цолакович. Пожалуйста, вопросы!

**Апель П.Ю.:** Почему на предпоследнем слайде Вы говорите, что нет восстановления структуры?

**Корнеева Е.А.:** Восстановления структуры не происходит, т.к. частицы полностью аморфизованы и нет центров рекристаллизации.

**Балагуров А.М.:** У Вас есть какие-нибудь соображения, почему частицы пирохлора и УАМ так по-разному себя ведут?

**Корнеева Е.А.:** Это зависит от их кристаллической структуры.

**Авдеев М.В.:** Из каких соображений подбираются энергии облучения и режимы отжига?

**Корнеева Е.А.:** В своих экспериментах мы имитировали воздействие осколков деления в ядерном реакторе. Хе и Кг – это основные осколки деления в реакторе, а температуры эксплуатации достигают 700°C.

**Пенионжкевич Ю.Э.:** Почему Вы используете тяжелые ионы высоких энергий? По сравнению с гамма-квантами какое преимущество? Сейчас очень модно вот эти синхротронные излучения, гамма-кванты для подобных исследований в радиационном материаловедении. Вы выбрали тяжелые ионы. Чем это лучше?

**Корнеева Е.А.:** Основной задачей в работе было определение воздействия высоких уровней ионизаций. А ионы ксенона и криптона – это основные осколки

деления в реакторах.

**Плакида Н.М.:** Восемнадцатый слайд можете показать? Это же практически кривые Брэгга?

**Корнеева Е.А.:** Нет, это профиль повреждений для ионов ксенона и криптона в сталях.

**Аксенов В.Л.:** Хорошо, вопросов больше нет. Спасибо Вам большое. Можете присесть. Переходим к отзывам. Первый отзыв – отзыв научного руководителя Владимира Алексеевича Скуратова, доктора физико-математических наук, начальника сектора ЛЯР ОИЯИ. Пожалуйста.

**Скуратов В.А.:** Оглашает отзыв, отзыв прилагается.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо большое. Андрей Георгиевич, пожалуйста, отзывы.

**Попеко А.Г.:** Имеется заключение НТС НХП ЦДФ ЛЯР. Отзыв положительный, замечаний не содержит. Есть два отзыва на автореферат. От главного научного сотрудника АО «ВНИИНМ», доктора физико-математических наук, профессора Чернова. Отзыв положительный, замечаний не содержит. Второй отзыв на автореферат от Вершининой Татьяны Николаевны, старшего научного сотрудника Научно-образовательного и инновационного центра «Наноструктурные материалы и нанотехнологии» Белгородского государственного национально-исследовательского университета. В отзыве есть одно небольшое замечание. Отзыв прилагается.

**Корнеева Е.А.:** С замечанием согласна. Действительно, плотность дислокаций обычно определяется в  $m^2$ . В нашем случае размеры дислокационных петель не позволяли рассчитать общую длину дислокаций, поэтому плотность дислокационных петель мы рассчитывали, как количество дислокационных петель в единице объема. Такой подход часто используют в работах по радиационному материаловедению.

**Попеко А.Г.:** Имеется отзыв ведущей организации – ИТЭФ национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Он положительный, но имеет довольно много замечаний. Отзыв прилагается.

**Корнеева Е.А.:** Спасибо, в целом, с замечаниями согласна. Хотела бы немного их прокомментировать.

Первое замечание: нет сравнения вклада повреждений от быстрых нейтронов и

от быстрых тяжелых ионов. Да, действительно, для оценки возможности применения ДУО-сталей в качестве конструкционных материалов в реакторе нового поколения в первую очередь необходимо определить устойчивость к нейтронному потоку. Исследованию устойчивости ДУО-сталей к облучению нейтронами посвящено довольно большое количество работ, в которых было показано, что к дефектообразованию по каналу упругого столкновения оксидные частицы стабильны. В некоторых работах отмечается только изменение размеров оксидных частиц и их плотности. Поскольку было известно, что при высоких уровнях ионизации оксидные частицы могут претерпевать значительные структурные изменения, основной интерес в нашей работе представляло исследование устойчивости оксидных частиц к дефектообразованию по каналу электронного торможения и связанное с этим изменение механических свойств самих сталей.

Второе замечание связано с отсутствием механических испытаний при высоких температурах. С замечанием согласна. Высокотемпературные механические испытания мы планируем проводить в дальнейших исследованиях. В настоящее время высокотемпературное наноиндентирование весьма популярно, идут разработки материалов для инденторов, которые были бы стабильны при высоких температурах при контакте с исследуемым материалом, и разработки методик испытаний в целом.

Третье замечание связано с тем, что исследование радиационной стабильности ДУО-сталей проводилось только до очень малых значений доз. С замечанием согласна, действительно, ДУО-стали должны выдерживать дозы до 200 сна, но подобные дозы на современных ускорителях не достижимы. Основным интересом в настоящей работе было определение радиационной стойкости оксидных частиц при высоких уровнях ионизации и было показано, что даже при небольших дозах повреждений в оксидах происходят структурные изменения.

Четвертое замечание: нет исследования изменений размеров и плотности оксидных частиц при воздействии быстрых тяжелых ионов. Мы не наблюдали изменения размеров оксидных частиц в результате облучения и не исследовали изменение плотности оксидов. Этот вопрос интересен для дальнейших исследований.

Пятое замечание связано с отсутствием исследования влияния размера частиц на величину энергии торможения для образования треков. В нашей работе наблюдаемые треки при одном и том же уровне электронного торможения были одинакового размера вне зависимости от размера оксидной частицы. Кроме того, полученное пороговое значение энергии электронных потерь близко к пороговому значению электронного торможения для структур с подобной кристаллической структурой, например,  $Gd_2(Zr_xTi_{1-x})_2O_7$ , где  $x=0, 0,5$  и  $1$  и где исследованные образцы были объемными. Исходя из этого, мы предполагаем, что порог образования треков не зависит от размера включений оксидов.

Шестое замечание связано с корректным использованием модели барьерного упрочнения. С замечанием согласна. В работе мы использовали полученные данные о структуре при помощи просвечивающей электронной микроскопии, которая не позволяет разрешить такие дефекты как нанокластеры. Оценка радиационного упрочнения, данная в диссертационной работе носит предварительный характер.

Седьмое замечание: нет объяснения присутствия ореола вокруг оксидной частицы после облучения ионами аргона. Ореол, присутствующий вокруг оксидной частицы появился в результате длительного наблюдения данной частицы в ПЭМ и является артефактом, и никак не связан с напряженным состоянием.

Восьмое замечание – как учитывались оксидные частицы при моделировании профиля повреждений. При моделировании наличие оксидных частиц не учитывалось, поскольку их количество составляет всего около 0,3 вес.%. Модельная сталь состояла из железа, хрома и никеля. Подпись к рисунку не точная.

**Аксенов В.Л.:** Из того, что здесь было озвучено, замечания все правильные, но они носят такой рекомендательный характер. На все замечания ответы были даны. В целом, работа исследовательская сделана, какие-то допущения, приближения имеются. Полностью решить задачу радиационного материаловедения вообще в принципе невозможно. Пожалуйста, у членов совета есть какие-то замечания? Нет? Спасибо! Теперь мы заступаем к заслушиванию оппонентов. Кирилл Евгеньевич Приходько, доктор физико-математических наук, начальник отдела структурных исследований и радиационных технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

**Приходько К.Е.:** Оглашает отзыв, отзыв прилагается.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо. Екатерина Александровна, прошу ответить на замечания.

**Корнеева Е.А.:** Спасибо за замечания, с замечаниями согласна. Что касается недостаточного исследования ферритной матрицы, то единственные эффекты которые мы обнаружили от ионного облучения – это дислокационные петли. В дальнейшем мы планируем более подробно этот вопрос изучить.

**Аксенов В.Л.:** Все, спасибо. Второй оппонент – Аркадий Борисович Цепелев – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории воздействия излучений на металлы ИМЕТ РАН.

**Цепелев А.Б.:** Оглашает отзыв, отзыв прилагается.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо, Аркадий Борисович. Екатерина Александровна, пожалуйста, ответьте на замечания.

**Корнеева Е.А.:** Спасибо за замечания. Что касается отсутствию данных по исследованиям на ДУО-стали КР123 и никеля, то с замечанием частично согласна. Дело в том, что у стали КР123 имеется еще одно название – 15CRA-3 и именно это название мы использовали в работе, к сожалению, это существование еще одного названия не было отражено в тексте. Что касается никеля, то исследования проводились и на никеле, и на меди, но на финальной стадии написания работы данные о никеле не вошли в текст для того, чтобы не перегружать работу.

Второе замечание связано с правомерностью использования модели Никса и Гао. Действительно, экспериментальные результаты не идеально описываются моделью, на двух участках наблюдаются отклонения от линейности.

Предлагаю рассмотреть модель немного подробнее, чтобы было понятно почему именно она была использована в работе.

При исследовании механических свойств образцов малых размеров имеет место размерный эффект, который заключается в возрастании прочностных свойств с уменьшением размеров.

Модель Никса и Гао, описывает размерный эффект дислокационными механизмами. Согласно модели Никса и Гао для аккомодации кривизны кристаллической решетки, возникающей при неоднородной пластической

деформации, необходимы геометрически необходимые дислокации. Эти дислокации существуют вместе со статистически запасенными дислокациями, возникающими при однородной деформации, и вызывают возрастание дополнительного компонента упрочнения, который увеличивается при уменьшении области контакта.

Считается, что область, в которых находятся геометрически необходимые дислокации, ограничена радиусом  $a$ , который совпадает с радиусом контактной области индентора с поверхностью.

В статье Nix и Gao, где впервые было дано описание данной модели видно, что модель хорошо описывает экспериментальные результаты, зависимость линейная.

Однако, со временем, с развитием методики наноиндентирования, дальнейшие исследования показали, что в области малых глубин (десятки нанометров в зависимости от материала, обычно говорят о 100 нм) модель не позволяет хорошо описать размерный эффект, и этому может быть несколько причин. Основной причиной является то, что область геометрически необходимых дислокаций распространяется на область, превышающую радиус  $a$ . При необходимости учета твердости на малых глубинах применяют модифицированную модель, в которой задается предел плотности геометрически необходимых дислокаций и производится моделирование методом конечных элементов.

Все это относится к однородным материалам. В нашем же случае мы исследовали облученные ионами материалы с неоднородным профилем повреждений. Известно, что пластическая зона под индентором превосходит глубину проникновения индентора примерно в 5 раз. Поэтому проводить измерения для определения радиационного упрочнения можно в некотором диапазоне в пределах однородного участка повреждений. Нашей основной задачей было определение критической глубины проникновения индентора, при которой пластическая зона не будет выходить за пределы поврежденного слоя, которую мы определяли по отклонению от модели Никса и Гао.

Что касается второй области отклонения, связанной непосредственно с размерным эффектом, то в этом случае критическая глубина составила 300 нм, что значительно больше встречающихся в других работах значениях. По-видимому, на

это влияют включения в ДУО-сталях размерами несколько десятков нм с отличающейся от феррита твердостью, таким образом, для преодоления этой неоднородности пластическая зона должна быть больше. Например, при аналогичных экспериментах с высокочистой медью отклонений, соответствующих 300 нм не наблюдается.

Третье замечание – большая разница значений твердости у стали Cr16 с другими ДУО-сталями. В тексте, действительно, этот эффект не обсуждался. Разница связана с различной исходной микроструктурой ДУО-сталей.

Четвертое замечание связано с использованием модели барьерного упрочнения. Да, с замечанием согласна, на подобное замечания уже был дан ответ. Объяснение полученного уровня радиационного упрочнения основывается только на данных, полученных с помощью просвечивающей электронной микроскопии и носит предварительный характер.

**Аксенов В.Л.:** Аркадий Борисович?

**Цепелев А.Б.:** Да, я ответами удовлетворен. Основное замечание относительно применимости модели. Я ознакомился с текстом диссертации и там такого подробного объяснения не было. Может, он и не нужен был, но, в общем, я удовлетворен.

**Аксенов В.Л.:** На все замечания ответы были даны. В целом, работа исследовательская сделана, какие-то допущения, приближения имеются. Полностью решить задачу радиационного материаловедения вообще в принципе невозможно. Считаю нужным поблагодарить оппонентов, поскольку они очень подробно разъяснили нам то, что за короткое время доклада невозможно было осветить, так что полная картина вполне складывается. Я думаю, у членов совета сложилось положительное впечатление о диссертации. По регламенту можно провести дискуссии. Пожалуйста, кто хочет выступить, задать вопросы, замечания сделать? Желающих не вижу и не вижу особой необходимости. Так что если никто не настаивает на том, чтобы еще нам что-то рассказать, то предоставляем Екатерине Александровне возможность сделать заключительное слово, возможно, что-то еще добавить.

**Корнеева Е.А.:** Я хотела бы поблагодарить членов диссертационного совета,

научного руководителя – Скуратова Владимира Алексеевича, коллег из Лаборатории ядерных реакций, особенно Сохацкого Александра Станиславовича за ценные указания при работе и всех присутствующих за интерес к работе. Спасибо большое.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо большое, Екатерина Александровна. Сейчас мы будем голосовать. Предлагается следующий состав комиссии: Авдеев М.В., Апель П.Ю. и Балагуров А.М. Есть возражения у членов совета? Возражений нет.

**ПОСТАНОВИЛИ:** Избрать счетную комиссию в составе: Авдеев М.В., Апель П.Ю., Балагуров А.М.

**СЛУШАЛИ:** Утверждение протокола счетной комиссии по проведению тайного голосования о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Корнеевой Е.А.: состав совета утвержден в количестве 18 человек, присутствовали на заседании 18 членов совета из 23, 4 доктора наук по профилю диссертации, роздано бюллетеней - 18, подано с отметкой "за" - 18, подано с отметкой "против" - нет, недействительных бюллетеней - нет.

**Аксенов В.Л.:** Вопросы к председателю счетной комиссий есть? Вопросов нет. Тогда нам нужно утвердить протокол счетной комиссии. Протокол счетной комиссии утвержден единогласно. Поздравляем Вас, Екатерина Александровна.

У всех есть проект решения совета. Посмотрите, пожалуйста. Замечаний нет? Кто за то, чтобы утвердить это заключение? Единогласно утверждено. Заседание окончено.

Заместитель председателя диссертационного совета,

Член-корреспондент РАН

Ученый секретарь

диссертационного совета



Аксёнов В.Л.

Попеко А.Г.

Дата оформления стенограммы: 22 марта 2019 г.