



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**



Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт теоретической и экспериментальной
физики имени А.И. Алиханова Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ)

ул. Большая Черемушkinsкая, д. 25, г. Москва, 117218
тел.: (499) 125-32-97, факс: (499) 127-08-33

№ _____

На № _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор

НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ

д.ф.-м.н. В.Ю. Егорычев

_____ 2019 г.



Отзыв

ведущей организации, Федерального государственного бюджетного учреждения "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", на диссертацию КОРНЕЕВОЙ Екатерины Александровны «Структурные эффекты облучения ионами высоких энергий в дисперсно-упрочненных оксидами сталях», представленную на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Значительные усилия современного радиационного материаловедения направлены на разработку материалов, способных длительное время работать в экстремальных условиях активной зоны перспективных ядерных и термоядерных реакторов. Так, например, дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали рассматриваются как перспективные материалы практически для всех типов реакторов: в качестве оболочек тепловыделяющих элементов атомных реакторов деления, либо материала конструкций в термоядерных реакторах синтеза. Современные разработки ДУО сталей обеспечивают

188000

необходимые требования по низко- и высоко-температурным механическим свойствам. В то же время наименее изученным на сегодняшний день вопросом является радиационная стойкость ДУО сталей при облучении, в том числе при облучении осколками деления, поскольку оксидные частицы, входящие в состав ДУО сталей, весьма чувствительны к высоким уровням ионизации, имеющим место при данном виде облучения.

В диссертационной работе Корнеевой Е.А. рассматривается влияние высокоэнергетического облучения тяжелыми ионами, имитирующих воздействие осколков деления, на структуру и механические свойства ДУО сталей. Особое внимание уделено вопросам стабильности структуры оксидных частиц под действием облучения, типам и параметрам облучения, при которых идет образование латентных треков в оксидах и исследованию морфологии треков методами просвечивающей электронной микроскопии. Кроме этого, в диссертации также рассматривается влияние облучения на механические свойства ДУО сталей и исследуется зависимость упрочнения от дозы радиационных повреждений.

Актуальность данной работы обуславливается практически полным отсутствием на сегодняшний день работ по изучению структурной стабильности оксидных включений в металлической матрице сплавов, либо сталей при высоких уровнях ионизации и анализа влияния соответствующих изменений на механические свойства ДУО материалов.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, двух приложений и списка литературы.

Во введении диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цель, научная новизна, практическая значимость работы и представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена обзору работ по исследованию структуры дисперсно-упрочненных оксидами сталей, влиянию легирующих элементов на структуру оксидных частиц, стабильности ДУО сталей при нейтронном и ионном облучении. Приведены методики исследования упрочнения облученных материалов и обзор работ по исследованию радиационного упрочнения методом наноиндентирования.

Во второй главе дано описание исходной структуры изучаемых ДУО-сталей (ЭП450, Cr16 (Fe-16Cr-3W), КР123 и КР4), методов подготовки образцов перед облучением и структурными исследованиями, режимов облучения, методов структурных исследований и проведения механических испытаний наноиндентированием.

В третьей главе приведены результаты структурных исследований дисперсных оксидных частиц, карбидов и ферритной матрицы сталей после облучения тяжелыми ионами с энергиями осколков деления. Особое внимание уделено исследованию формирования латентных треков в частицах пирохлора при температурах облучения до 1000 К, определено пороговое значение уровня электронных потерь энергии для образования треков, экспериментально полученные результаты сопоставляются с результатами моделирования. Проведен сравнительный анализ стабильности структуры изучаемых ДУО сталей с различными оксидными частицами. Рассматривается вопрос влияния способа подготовки образцов после облучения для просвечивающей электронной микроскопии на возможные артефакты при структурных исследованиях.

В четвертой главе приведены результаты механических испытаний ДУО сталей методом наноиндентирования, продемонстрированы возможности метода непрерывного измерения жесткости при исследовании механических свойств материалов с неоднородным профилем повреждений. Показано, что величина радиационного упрочнения выходит на насыщение при дозах

порядка долей смещения на атом, полученные значения описываются в рамках модели дисперсного барьерного упрочнения.

В заключении приведены основные выводы проведенного в диссертационной работе исследования.

Личный вклад автора в диссертационную работу является определяющим. Автор принимал активное участие в постановке задач, результаты, приведенные в диссертации, получены при его непосредственном участии, а ряд результатов получен самим автором.

В диссертационной работе **впервые** для дисперсно-упрочненных оксидами сталей:

- изучено формирование радиационных дефектов в наноразмерных включениях оксидов в металлической матрице сталей за счет электронного торможения в диапазоне доз радиационного повреждений до 1 сна и температурах до 1000 К, установлено пороговое значение удельных ионизационных потерь энергии для образования аморфных латентных треков в наночастицах пироксидов $Y_2Ti_2O_7$;
- представлены результаты радиационно-индуцированной эволюции микроструктуры наноразмерных включений $Y-Ti-O$ и $Y-Al-O$ в металлической матрице сталей при увеличении флюенса высокоэнергетических ионов криптона (107 МэВ), ксенона (167 МэВ) и висмута (700 МэВ) до флюенсов $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$;
- получены данные о морфологии латентных треков в наноразмерных включениях Y_2TiO_7 в металлической матрице при разных температурах облучения высокоэнергетическими тяжелыми ионами;

- методом наноиндентирования исследовано радиационное упрочнение ДУО сталей ЭП450, Cr16 и КР4, облученных быстрыми тяжелыми ионами, получена зависимость уровня радиационного упрочнения от дозы радиационных повреждений до доз менее 1 сна.

Научная и практическая значимость работы. Результаты исследований эволюции структуры вместе с изменениями упрочнения дисперсно-упрочненных оксидами сталей на примере ДУО-сталей ЭП450, Cr16 (Fe-16Cr-3W), КР123 и КР4 могут быть использованы для оценки влияния высокоэнергетичных осколков деления на эксплуатационные характеристики оболочек ТВЭЛОВ из этих материалов в ядерных реакторах деления.

Публикации автора по теме диссертационного исследования: 4 печатных работы, опубликованных в ведущих международных научных журналах WoS, и 1 статья в журнале РИНЦ.

Диссертация Корнеевой Е.А. является завершенной работой, результаты которой неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Кроме нескольких опечаток, стоит отметить также некоторые **замечания по диссертационной работе:**

1. Основное прикладное значение проведенных исследований связано с перспективностью применения ДУО сталей в качестве материалов активной зоны перспективных энергетических установок, но в диссертационной работе нет анализа величины исследуемого вклада от быстрых осколков деления по сравнению с вкладом в радиационные

повреждения от быстрых нейтронов, высокая плотность потока которых имеется в любых реакторных установках.

2. В работе проведено исследование радиационного упрочнения при комнатной температуре, однако ДУО стали предназначены для эксплуатации при высоких температурах до 700 °С и значительный интерес представляют высокотемпературные механические свойства.
3. В литературном обзоре справедливо отмечается, что ДУО стали предполагается эксплуатировать до ~ 200 смещений на атом (сна), в то же время, в диссертационной работе проведено исследование радиационно-индуцированных изменений только до радиационных повреждений менее 1 сна.
4. В работе исследуются радиационные эффекты в наноразмерных оксидных включениях, но не представлены данные об изменениях средних размеров, распределения по размерам, а также изменения плотности оксидных включений, которые могут привести к изменению прочности этих сталей под облучением благодаря их изначально высокой объемной плотности.
5. В работе установлено пороговое значение удельных ионизационных потерь энергии для образования аморфных латентных треков в наночастицах пирохлора $Y_2Ti_2O_7$, но не обсуждается зависимость порога образования треков от размера включений оксидов.
6. В диссертации делается вывод о том, что полученная "величина уровня радиационного упрочнения ДУО стали согласуется с моделью барьерного упрочнения". В тоже время предлагаемая автором модель упрочнения в качестве единственных барьеров учитывает только дислокационные петли, в то время как в рассматриваемом случае необходимо учитывать перестройку системы наноксидов, а также нанокластеры легирующих элементов, плохо разрешимые просвечивающей электронной микроскопией. Оценка упрочнения на основе одних дислокационных петель представляется недостаточно

обоснованной также потому, что автор использовал величину силы барьера = 1, в то время как известно, что эта величина заметно меньше и находится в диапазоне от 0,25 до 0,6.

7. На ПЭМ изображениях оксидных частиц после облучения ионами аргона вокруг частицы присутствует ореол, свидетельствующей о возможном напряженном состоянии, однако, в тексте идет речь об отсутствии треков при данном виде облучения и наличие ореола никак не объясняется.
8. На Рисунке 2.13 приведены профили повреждений для ДУО стали, но не объясняется как в моделировании учитывалось наличие оксидных частиц в структуре стали.

Заключение

Приведенные недостатки не влияют на высокую оценку диссертационной работы. Диссертация Корнеевой Е. А. «Структурные эффекты облучения ионами высоких энергий в дисперсно-упрочненных оксидами сталях» представляет собой законченное научное исследование, соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, а ее автор, Корнеева Е. А., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв составлен по результатам обсуждения диссертации Корнеевой Екатерины Александровны «Структурные эффекты облучения ионами высоких энергий в дисперсно-упрочненных оксидами сталях» и утвержден на заседании секции № 3 Ученого совета НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ 28 декабря 2018 г., протокол № 2. На заседании присутствовали 5 докторов и 3 кандидата наук.

Текст отзыва составил д.ф.-м.н. Сергей Всеволодович Степанов,
Тел. +7 (499) 789 6663, E-mail: Sergey.Stepanov@itep.ru

Председатель секции №3 Ученого совета
НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ,
к.ф.-м.н.



Кулевой Т.В.

Секретарь секции НТС №3 Ученого совета
НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ,
к.ф.-м.н.



Кац М.М

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт
теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ)

Адрес: 117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

Телефон: 8 (499) 789-66-00

Электронная почта: director@itep.ru

Официальный сайт: <http://www.itep.ru>