

ОТЗЫВ

Официального оппонента на автореферат и диссертацию

Орлова Николая Николаевича

«Влияние облучения ионами на наноструктуру дисперсно-упрочненных оксидами сталей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Представленная работа посвящена изучению перспективных реакторных конструкционных материалов - дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) сталей под облучением. Одно из направлений их потенциального применения - активная зона реакторов на быстрых нейтронах. Высокая жаропрочность этих сталей и ожидаемая высокая радиационная стойкость должны существенно повысить выгорание топлива и, тем самым, повысить эффективность реакторов на быстрых нейтронах.

Известно, что ДУО стали за счет наличия в матрице упрочняющих оксидных частиц нанометрового размера, характеризуется высоким сопротивлением ползучести при повышенных температурах и нагрузках. Но детальные исследования радиационной стойкости этого класса материалов только стартовали и плохо изучены. С этим и связана **актуальность** данной диссертационной работы. А поскольку дисперсно-упрочненные оксидами стали также рассматриваются как перспективные конструкционные материалы термоядерных реакторов, изучение радиационной стойкости этих материалов является важной задачей и для развития термоядерной энергетики.

Диссертационная работа акцентирует внимание на одной из актуальных проблем реакторного материаловедения - низкотемпературном радиационном охрупчивании (НТРО) конструкционных материалов ядерных энергетических установок. Указанное явление приводит к деградации эксплуатационных макроскопических характеристик, вызванной радиационно-индуцированными изменениями микроструктуры и локального изменения химического состава материалов. Понимание и оценка данного эффекта необходима для безопасного функционирования и эксплуатации реакторной энергетической установки. Эта проблема важна для изучаемых в диссертационной работе ДУО сталей, поскольку температурный диапазон их применения включает область температур ниже 350°C, в которой заметно проявляется НТРО. Понимание процессов, происходящих в материале на атомарном уровне, а именно перераспределение химических элементов и стабильность упрочняющих частиц в ДУО сталях под облучением, необходимо для разработки новых моделей оценки рабочего ресурса материала. Изучению и описанию данных процессов, с использованием современных микроскопических методов, посвящена данная диссертационная работа. В работе используется метод атомно-зондовой томографии, который зарекомендовал себя при анализе радиационно-индуцированных наноразмерных изменений в реакторных материалах, например в материалах корпусов ядерных энергетических установок.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация изложена на 119 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка, 23 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель, научная новизна и практическая ценность результатов работы; приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации представлен обзор литературных данных, посвященных описанию процессов, происходящих в дисперсно-упрочненных оксидами сталей под облучением. Проведен анализ взаимосвязи низкотемпературного радиационного охрупчивания ДУО сталей и микроскопических изменений под воздействием реакторного облучения.

Во второй главе диссертации описаны исследуемые в работе ДУО стали, их химический состав, условия изготовления, финишных термообработок, микроструктура, а также используемые методики подготовки образцов, методики проведения томографических атомно-зондовых исследований и методика проведения экспериментов по облучению образцов пучками ионов металлов.

В третьей главе диссертации представлены результаты томографического атомно-зондового анализа, полученные при исследовании наноструктуры стали ODS Eurofer под воздействием облучения тяжелыми ионами в диапазоне доз до 32 сна. Проведено сравнение полученных результатов с данными нейтронного облучения этой же стали в реакторе BOR-60 до дозы 32 сна. Показано, что изменение атомно-масштабного состояния стали ODS Eurofer под воздействием облучения тяжелыми ионами в целом согласуются с изменениями после облучения нейтронами и демонстрируют процессы, происходящие в стали ODS Eurofer при облучении. Обнаружено, что основные наноструктурные изменения, характеризующиеся увеличением объемной плотности кластеров и изменением их состава, под облучением происходят уже при дозах порядка единиц сна.

В четвертой главе диссертации представлены данные об изменении наноструктуры модельных высокохромистых дисперсно-упрочненных оксидами сталей 13.5%Cr-ODS с различным содержанием Ti под воздействием облучения тяжелыми ионами. Проведенные томографические атомно-зондовые исследования модельной стали 13.5%Cr-ODS с различным содержанием титана в исходном состоянии демонстрируют роль легирования титаном в формировании наноструктуры дисперсно-упрочненных оксидами сталей. Показано влияние низкодозного тяжелоионного облучения на тонкую структуру сталей при комнатной температуре и при 300 °С. Проведено обсуждение процессов изменения тонкой структуры ДУО сталей под облучением.

Оценка новизны и достоверности полученных результатов.

Новизна диссертационной работы определяется новизной примененных методов: атомно-зондовой томографией (АЗТ) для анализа наноструктуры сталей и методом ускоренного набора дозы путем облучения АЗТ образцов ионами металлов, а также новизной полученных автором результатов:

- продемонстрировано влияние облучения тяжелыми ионами на наноструктуру стали ODS Eurofer в диапазоне доз от единиц до 32 сна, которые позволили объяснить процессы происходящие в этом материале при реакторном облучении;

- впервые проанализировано изменение тонкой структуры модельных высокохромистых сталей 13.5%Cr-ODS за счет добавления титана в качестве легирующей добавки в диапазоне до 0.4 мас.%;

- выявлены основные закономерности изменения наномасштабного состояния дисперсно-упрочненных оксидами сталей в условиях низкотемпературного каскадообразующего облучения.

Достоверность результатов подтверждается комплексным использованием современных методов исследования, тщательностью проведения экспериментов и сопоставлением полученных результатов с данными других авторов, работающих в данной области науки.

Полученные в работе данные по изменению наномасштабного состояния дисперсно-упрочненных оксидами сталей ODS Eurofer и 13.5%Cr-ODS под облучением тяжелыми ионами представляют интерес для разработчиков новых конструкционных материалов ядерной и термоядерной техники, а также для исследователей, работающих в области радиационного материаловедения и исследования общих проблем взаимодействия излучений с твердым телом, что определяет **практическую значимость работы.**

Основные результаты диссертационной работы Орлова Н.Н. опубликованы в 34 печатных работах, из них 9 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией. Кроме того, результаты работы докладывались и обсуждались на основных международных, всероссийских и отраслевых конференциях и семинарах по радиационному материаловедению.

По содержанию диссертации можно высказать следующие замечания:

1. В работе не указано, какие именно требования, кроме коррозионной стойкости, предъявляются к исследуемым материалам, в частности важна ли для этих материалов такая характеристика, как склонность к хрупкому разрушению.

2. В диссертационной работе использовалось облучение тяжелыми ионами, которое дает заметно большую скорость набора дозы радиационных повреждений, но не обсуждается роль этого эффекта.

3. В работе получены данные об изменении наноструктурного состояния ДУО сталей под облучением методом атомно-зондовой томографии и показана корреляция между изменениями нанокластеров (изменение состава и количества) и низкотемпературным охрупчиванием. Для оценки этого эффекта автору полезно было бы провести исследования микроструктурных изменений с использованием других методик, в частности при помощи просвечивающей электронной микроскопии.

4. В диссертационной работе подробно описана методика расчета размеров и объемной плотности нанокластеров в исследуемых ДУО сталях. Однако не конца понятно, насколько равномерно распределение нанокластеров внутри зерен и в целом по материалу.

5. В работе указано, что одним из преимуществ ДУО сталей, являются хорошие свойства при высоких температурах ($> 600^{\circ}\text{C}$). Температура облучения оказывает значимое влияние на изменение свойств под облучением, при прочих равных условиях. Однако облучение образцов выполнялось при температурах $\leq 300^{\circ}\text{C}$. Это означает, что полученные результаты могут быть не применимы для более высоких температур эксплуатации исследуемых материалов. Автору

полезно было бы провести сравнительные исследования для нескольких температур облучения.

Редакционные замечания:

- 1) В литературном обзоре использованы рисунки с подписями на английском языке без расшифровки.
- 2) На странице 82 есть ссылка на рисунок 3.12, который отсутствует в тексте.

Данные замечания не влияют на и на положительную оценку диссертации и работы в целом. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Результаты диссертации достаточно полно изложены в научных работах и апробированы на конференциях.

По объёму, научному уровню и ценности результатов диссертационная работа соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утверждённым постановлением Правительства РФ (№ 842, от 24 сентября 2013 г), требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук и паспорту специальности 01.04.07 по физико-математическим наукам, а её автор – **Орлов Николай Николаевич** заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент
Доктор технических наук,
Начальник лаборатории
Федерального государственного
бюджетного учреждения Национальный
исследовательский центр
«Курчатовский институт»

А.А. Чернобаева

Шифр научной специальности, по которой была защищена докторская диссертация: 05.14.03- «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
www.nrcki.ru
Телефон: +7 495 196-9420
E-mail: Chernobaeva_AA@nrcki.ru

Подпись Чернобаевой Анна Андреевны удостоверяю:
Главный ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт»
кандидат физико-математических наук
Стремоухов Сергей Юрьевич



« 13 » июня 2018 г.