

## 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».

Деградация эксплуатационных свойств конструкционных материалов ядерной техники в результате радиационно-индуцированной эволюции микроструктуры и локальных изменений химического состава материалов является важной и до конца не изученной проблемой. Одним из следствий такой эволюции структуры и изменения химического состава является низкотемпературное радиационное охрупчивание, заключающееся в повышении предела текучести и смещении температуры вязко-хрупкого перехода в область высоких значений. Радиационное охрупчивание может быть обусловлено образованием структурных дефектов, например, дислокационных петель, либо разупрочнением границ зерен за счет формирования зернограницных сегрегаций. Однако, как показывают экспериментальные исследования, в новых перспективных материалах - дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) сталях - в исходном состоянии присутствуют наноразмерные кластеры, объемная концентрация которых значительно превосходит объемную плотность радиационно-индуцированных дислокационных петель. Под облучением может происходить изменение количества, размеров, а также химического состава наноразмерных кластеров, что может повлиять на движение дислокаций и приводить к изменению предела текучести ДУО сталей. Детальному исследованию процессов, происходящих в ДУО сталях под облучением, с использованием методов томографической атомно-зондовой микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии посвящена данная работа. Значительный интерес к ДУО сталям, как перспективным материалам активной зоны ядерных и термоядерных реакторов, определяет **актуальность** диссертационной работы Орлова Н.Н.

Представленная 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.

Обзор работ, посвященных изучению влияния облучения на свойства дисперсно-упрочненных оксидами сталей, представлен **в первой главе** диссертации. Рассмотрены механические и коррозионные свойства различных ДУО сталей, имеющиеся экспериментальные данные по деградации этих сталей под облучением. Отмечается недостаточность данных по влиянию нейтронного облучения на радиационное охрупчивание, а также структуру сталей, в частности, с использованием современных аналитических методик исследования структуры на наномасштабном уровне. Подробно рассмотрен общий подход к проведению имитационных экспериментов с использованием ускорительной техники, особенности такого рода исследований. Литературный обзор составлен весьма квалифицировано.

В работе исследуются хромистая (9%Cr) сталь ODS Eurofer и модельные высокохромистые ДУО стали (13,5%Cr-ODS) с различным содержанием титана (до 0,4 мас.%). Для создания радиационных повреждений разработана оригинальная методика облучения образцов-игл дисперсно-упрочненных оксидами сталей тяжелыми ионами с последующим исследованием облученных образцов методом томографической атомно-зондовой микроскопии. Сведения о химическом составе и микроструктуре исследованных в работе дисперсно-упрочненных оксидами сталей и методики исследования и облучения образцов представлены во **второй главе** диссертации.

**Третья глава** диссертации представляет полученные в диссертационной работе результаты томографического атомно-зондового анализа изменения наноструктуры стали ODS Eurofer под воздействием облучения тяжелыми ионами. Облучение проводилось до различных повреждающих доз (вплоть до



32 сна) при комнатной температуре. Проведено сравнение полученных результатов с данными нейтронного облучения данной стали в реакторе БОР-60 до дозы 32 сна. Отмечено, что основные детали атомно-масштабных изменений стали ODS Eurofer при облучении ионами и нейтронами находятся в хорошем согласии: наблюдается изменение состава нанокластеров и увеличение их количества. Установлено, что основные изменения наблюдаются при низких (~нескольких сна) дозах радиационных повреждений.

Результаты исследования модельных высокохромистых дисперсно-упрочненных оксидами сталей 13,5%–Cr ODS с различным содержанием Ti в исходном состоянии описаны в **четвертой главе**. Показано существенное влияние легирующих добавок на формирование нанокластеров. Показано изменение наноструктуры модельных сталей под воздействием облучения тяжелыми ионами при различной температуре. Обнаружен заметный рост объемной плотности кластеров под облучением и изменение их состава. Проведено обсуждение механизмов изменений наноструктурного состояния сталей ODS Eurofer и высокохромистых сталей 13,5%Cr–ODS под воздействием облучения тяжелыми ионами.

**Достоверность** полученных в диссертации данных, подтвержденная логично выстроенной структурой исследований, использованием разнообразных современных общепризнанных методов анализа (атомно-зондовая томография, метод фокусированного ионного пучка, просвечивающая электронная микроскопия) для получения хорошо согласующихся между собой экспериментальных результатов, не вызывает сомнений.

**Научная новизна.** К числу наиболее значимых новых результатов, полученных в диссертации, следует отнести следующие:

- показано, что при имитационном облучении дисперсионно-упрочненной оксидами стали ODS Eurofer ионами железа до дозы 32 сна изменения наноструктуры сплава находятся в хорошем согласии с аналогичными данными по нейтронному облучению этой стали в реакторе БОР-60 при достижении

такого же флюенса; тем самым подтверждены экспериментально адекватность и перспективность проводимых имитационных экспериментов;

- установлена корреляция резкого возрастания температуры вязкохрупкого перехода в диапазоне низких повреждающих доз, менее 10 сна, с наиболее интенсивным в этом дозовом и низкотемпературном (300-330°C) диапазоне изменением наномасштабного состояния стали ODS Eurofer, проявляющемся в значительном увеличении количества кластеров (служащих эффективными барьерами для скользящих дислокаций) и изменении их состава;

- методами томографической атомно-зондовой микроскопии автором впервые продемонстрировано влияние:

- - легирования ванадием и титаном на состав наноразмерных кластеров ДУО сталей,

- - облучения тяжелыми ионами на тонкую структуру сталей ODS Eurofer и высокохромистых сталей 13.5%Cr-ODS с вариацией содержания титана от 0 до 0,3 мас.% при различных повреждающих дозах. При этом установлено, что при легировании стали титаном до величины 0,3 мас.% состав кластеров остается неизменным до флюенса 2,4 сна при температуре облучения 300°C.

Полученные экспериментальные данные и выявленные закономерности могут быть использованы при разработке новых конструкционных материалов ядерной и термоядерной техники нового поколения, а также представляют интерес для исследователей, работающих в области радиационного материаловедения и исследования общих проблем взаимодействия излучений с твердым телом, что определяет **практическую значимость работы.**

**По содержанию диссертации можно высказать следующие замечания:**

1. В диссертационной работе представлены результаты облучения ДУО сталей до низких доз радиационного повреждения, вместе с тем эти стали должны выдерживать радиационные нагрузки до 150 сна.



2. В данной работе часть образцов для исследований изготавливалась методом фокусированного ионного пучка (ФИП). Однако не указано, какие дополнительные повреждения возникают в материале при использовании данной методики.

3. В диссертации проводилось облучение образцов ДУО сталей ионами Fe и Ti до близких повреждающих доз, но полученные изменения все же имели отличия, причины которых не проанализированы.

4. В диссертации не проведены оценки вклада в упрочнение ДУО сталей от обнаруженных нанокластеров и изменения этих вкладов под воздействием облучения.

5. В диссертации не представлены данные по микроструктуре исследуемых ДУО сталей и не обсуждается влияние микроструктуры и финишных термообработок на свойства исследуемых сталей.

6. В диссертации применяется метод ускоренного набора дозы с помощью пучков тяжелых ионов, но не обсуждается влияние ускоренного набора дозы на радиационные эффекты, а также не обсуждается влияние различия спектров первично-выбитых атомов в реакторных и ионных экспериментах.

7. В диссертации отсутствует рисунок 3.12, хотя он обсуждается в тексте.

Данные замечания не уменьшают научно-практической ценности проведенной работы. Исследования выполнены на достаточно высоком научном и техническом уровне. Автореферат верно отражает содержание диссертации.

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** - достоин присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
профессор Департамента электронной инженерии  
МИЭМ НИУ ВШЭ



Г.Г. Бондаренко

06.06.2018.

Шифр научной специальности, по которой была защищена докторская диссертация: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Адрес: Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», 123458, Москва, ул. Таллинская, д.34.

Телефон: 8(495)916-88-29

E-mail: [miem@hse.ru](mailto:miem@hse.ru); [bondarenko\\_gg@rambler.ru](mailto:bondarenko_gg@rambler.ru)

Подпись д.ф.-м.н. , проф. Бондаренко Г.Г. заверяю:

*специалист по магистранту демографологии*  
*Михайлов*



06.06.2018