

ОТЗЫВ

Официального оппонента на автореферат и диссертацию Никитина Александра Александровича «Влияние каскадообразующего облучения на распад твердого раствора в конструкционных материалах ядерных реакторов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Представленное исследование направлено на решение актуальной проблемы, анализу механизмов и процессов, лежащих в основе низкотемпературного радиационного охрупчивания конструкционных материалов ядерных энергетических установок. Данное явление приводит к деградации эксплуатационных свойств в результате радиационно-индуцированной эволюции микроструктуры и локальных изменений химического состава материалов. Наиболее ярким примером этого явления является радиационное охрупчивание корпусов ядерных энергетических установок. Прогнозирование и оценка данного эффекта имеет особое значение для обеспечения безопасного функционирования и эксплуатации ядерных реакторов, а также для проведения мероприятий, связанных с продлением срока службы корпуса реактора. Поскольку основной причиной, приводящей к деградации физических свойств, является формирование различного вида сегрегаций, то для оценки рабочего ресурса материала, а также разработки новых физически обоснованных моделей охрупчивания, необходимо понимание изменений, происходящих в тонкой структуре материала, а именно перераспределения атомов различных химических элементов в твердом растворе в результате облучения, происходящих на различных масштабах, вплоть до нескольких нанометров. Исследованию и описанию данных процессов и посвящена представленная работа. Особую актуальность диссертационная работа приобретает в связи с анализом механизмов радиационного охрупчивания для новых классов материалов, таких как титановые сплавы и ферритно-мартенситных сталей.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Диссертация изложена на 119 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков, 12 таблиц.

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 распада твердого раствора в сталях и сплавах систем Fe–Cu, Fe–Cr, Ti–V. Проведен анализ взаимосвязи характеристик радиационно-индуцированных предвыделений от состава материалов и условий радиационных воздействий.

Во второй главе описаны исследуемые в работе материалы, а также используемые методики исследования и облучения образцов. Приведено краткое описание метода томографической атомно-зондовой микроскопии, а

также особенность его применения при исследовании неоднородных твердых растворов.

В третьей главе автором описаны исследования процессов распада твердого раствора Fe–Cu под действием нейтронного облучения на примере материала сварного шва корпуса реактора ВВЭР–440. Показано, что при реакторном облучении происходит распад твердого раствора Fe–Cu. Отмечено, что с ростом повреждающей дозы усиливается корреляция во взаимном расположении атомов Cu, т.е. увеличивается доля кластеров, преимущественно обогащенных медью, а также наблюдается формирование высокой плотности наноразмерных кластеров, обогащенных медью. Предложена модель для оценки размера зародышей предвыделений меди (первичных кластеров) и скорости их зарождения. Проведен анализ экспериментально наблюдаемой скорости генерации предвыделений, а также сравнение с размером эффективной области, рассчитанной в рамках описанной модели.

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследования распада твердого раствора в сплаве Ti–5Al–4V–2Zr, под воздействием облучения ионами титана. Установлено, что облучение ионами титана приводит к распаду твердого раствора Ti–V в α -фазе сплава с образованием высокой плотности наноразмерных кластеров, обогащенных ванадием. Показано, что для наблюдаемой экспериментально генерации предвыделений, размер эффективной области, участвующей в процессе формирования предвыделения, приблизительно в два раза ($\epsilon \sim 2$) превышает размер каскада атом-атомных смещений.

В пятой главе диссертации приведены результаты по анализу распада твердого раствора Fe–Cr в ферритно-мартенситной стали Eurofer97 при облучении нейтронами и ионами железа. Приведены оценки скорости генерации кластеров на основе каскадной модели. Продемонстрировано, что экспериментально наблюдаемая скорость подавлена по сравнению с пересыщенными растворами. Предложенная модель указывает, что образование первичных кластеров, обогащенных хромом, может происходить только в больших каскадах (создаваемых первично выбитыми атомами с энергией более 400 кэВ).

Оценка новизны и достоверности полученных результатов.

Новизна работы заключается в том, что автор с использованием метода атомно-зондовой томографии смог показать:

- влияние химического состава материала и скорости набора дозы на состав радиационно-индуцированных предвыделений в материале сварного шва корпуса реактора ВВЭР–440 после реакторного облучения;
- влияние облучения тяжелыми ионами на тонкую структуру сплава Ti–5Al–4V–2Zr, а также происходящий в результате указанного облучения распад твердого раствора α фазы с образованием кластеров, обогащенных ванадием;
- процесс распада твердого раствора ферритно-мартенситной стали 9Cr1W0.2V0.1C (Eurofer97) с образованием Cr–Mn–Si кластеров в результате реакторного облучения и при воздействии ионов железа.

Кроме того, автором предложена модель, позволяющая связать объемную плотность радиационно-индуцированных кластеров, формирующихся на

начальных стадиях облучения материалов, с числом создаваемых при облучении каскадов атом-атомных смещений.

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

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные в работе результаты по изменению наномасштабного состояния сварных швов реакторов ВВЭР-440, титанового сплава Ti-5Al-4V-2Zr и ферритно-мартенситной стали Eurofer97 под облучением 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.

Основные результаты диссертационной работы Никитина А.А. опубликованы в 12 печатных изданиях, из которых 9 представлены в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией. Кроме того, результаты работы докладывались и обсуждались на основных международных, всероссийских и отраслевых конференциях и семинарах.

По содержанию диссертации можно высказать следующие замечания:

1. При расчетах скорости зарождения предвыделений считается, что эффективный объем области, охваченной каскадом, Ω пропорционален энергии первично выбитого атома $E_{\text{пва}}$, что не учитывает процессы формирования субкаскадов.

2. В проведенных оценках скорости формирования кластеров под облучением не учтена роль температуры среды, а также не учтены процессы роста кластеров. В то же время очевидно, что при высоких температурах (>500 °С) зародившиеся кластеры предвыделений могут раствориться, не создав устойчивых зародышей.

3. При рассмотрении распада твердого раствора стали Eurofer 97 автор рассматривает образование предвыделений хрома в больших каскадах атом-атомных смещений, при этом не учитывает возможных альтернативных механизмов обуславливающих данный процесс, например, сегрегацию хрома на структурные дефекты, такие как дислокационные петли.

Данные замечания не влияют на оценку диссертации и на положительную оценку 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», утвержденным 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 – **Никитин Александр Александрович** достоин присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,

Доктор физико-математических наук, профессор,

ведущий научный сотрудник научно-

исследовательского технологического института

Федерального государственного бюджетного образовательного

учреждения высшего образования

«Ульяновский государственный университет»



В.В. Светухин

Шифр научной специальности, по которой была защищена докторская диссертация: 01.04.10 – Физика полупроводников

Адрес: ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», НИТИ им. С.П.Капицы, 432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, улица Льва Толстого, дом 42

Тел.: +7 (8422) 41-20-88

E-mail: slava@sv.uven.ru; svetukhin@mail.ru

Подпись заверяю

