

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»

Деградация материалов при воздействии потоков нейтронного излучения является важной проблемой для большинства конструкций ядерных энергетических установок. Наиболее существенными считаются радиационное набухание и охрупчивание. С продвижением разработок материалов с пониженной склонностью к набуханию, например, ферритно-мартенситных сталей, охрупчивание становится важной проблемой не только корпусов реакторов, но и материалов активной зоны. Данный процесс обусловлен рядом причин, связанных с формированием различных структурных дефектов, например, дислокационных петель, либо разупрочнением границ зерен за счет формирования зернограничных сегрегаций. Ключевую роль при этом играет образование в результате распада твердого раствора в материале наноразмерных предвыделений, обогащенных различными легирующими, либо примесными элементами. Состав и объемная плотность образований зависят как от химического состава материала, так и от режима эксплуатации, но в целом это явление носит достаточно общий характер. Современные модели образования таких предвыделений предполагают, что центром их зарождения являются области каскада атом-атомных столкновений, либо кластеры дефектов, образовавшиеся в результате развития каскада. При этом достаточно мало детальной информации о начальных стадиях формирования радиационно-индуцированных особенностей, которые трудны для экспериментального изучения. Детальному изучению причин формирования такого рода особенностей в различных конструкционных материалах ядерных реакторов методами томографической атомно-зондовой микроскопии и посвящена данная работа, что определяет её **актуальность**.

Представленная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Диссертация изложена на 119 страницах, 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 проведен обзор работ, посвященных описанию процессов распада твердого раствора в сталях и сплавах систем Fe–Cu, Fe–Cr, Ti–V, аналогичных исследуемым в представленной работе. Описана специфика распада твердого раствора при каскадообразующем облучении с образованием наноразмерных предвыделений. Отмечено, что химический состав, размеры и объемная плотность предвыделений в значительной степени зависят как от состава материала, так и от температуры и других условий радиационного воздействия. В случае многокомпонентных сплавов и сталей легирующие добавки в значительной степени оказывают влияние на скорость

распада твердого раствора под облучением и процессы формирования сегрегаций и предвыделений.

Во второй главе диссертации представлено описание исследуемых материалов, методик исследования и облучения образцов. В работе выбраны три типа актуальных конструкционных материалов, использующихся в эксплуатируемых и проектируемых ядерных установках. К ним относятся: металл сварных швов, изготовленный по стандартной технологии сварки стали 15X2МФА, корпусов реакторов ВВЭР-440 первого поколения; титановый сплав Ti-5Al-4V-2Zr, разрабатываемый для нового вида энергетических реакторов малой мощности; малоактивируемая ферритно-мартенситная сталь Eurofer97 (9Cr1W0.2V Ta0.1C), разрабатываемая в качестве конструкционного материала проектируемого термоядерного реактора DEMO. Приведено краткое описание метода томографической атомно-зондовой микроскопии, а также особенность его применения для анализа информации при исследовании неоднородных твердых растворов.

В третьей главе представлены результаты томографического атомно-зондового анализа распада твердого раствора Fe-Cu под действием нейтронного облучения на примере материала сварного шва корпуса реактора ВВЭР-440. Показано, что при реакторном облучении до повреждающих доз $\sim 0,011$, $0,025$ и $0,06$ сна при температуре 270°C происходит распад твердого раствора Fe-Cu. Предложена модель для оценки размера зародышей предвыделений меди (первичных кластеров) и скорости их зарождения. Проведены расчеты для различных значений доз нейтронного облучения и концентраций меди в твердом растворе, которые показали хорошее согласие с полученными экспериментальными данными и данными из ряда литературных источников по аналогичным экспериментам. Установлено, что для наблюдаемой экспериментально скорости генерации предвыделений размер эффективной области, участвующей в процессе формирования предвыделения, превышает область каскада на динамической стадии в ϵ раз ($\epsilon \approx 1-4$).

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 при температуре 260°C до повреждающей дозы 1 сна 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 исследованию томографического атомно-зондового анализа распада твердого раствора Fe-Cr в ферритно-мартенситной стали Eurofer97 при облучении нейтронами и ионами железа. Обнаружено, что при облучении материала ионами железа до повреждающих доз $\sim 1,5$; ~ 3 и ~ 24 сна при температуре 20°C и до дозы 1 сна при температуре 300°C происходит распад твердого раствора Fe-Cr. Показано, что в исследованном термически стабильном твердом растворе Fe-9Cr,

составляющем основу стали Eurofer97, образование первичных кластеров, обогащенных хромом, может происходить только в больших каскадах, создаваемых первично выбитыми атомами с энергией более 400 кэВ.

Научная новизна и достоверность полученных в диссертации результатов не вызывают сомнений.

Следует отметить, что автор смог на основании проведенных экспериментов показать роль влияния химического состава материала на закономерности формирования наноразмерных предвыделений на начальной стадии их зарождения при распаде твердого раствора в сплавах на основе железа (ферритно-мартенситная сталь и материал сварного шва реактора ВВЭР-440) в результате каскадообразующего облучения (как реакторного, так и с использованием ускоренных ионов металлов).

Методами томографической атомно-зондовой микроскопии автором впервые продемонстрировано влияние облучения тяжелыми ионами на тонкую структуру сплава Ti-5Al-4V-2Zr, а также происходящий в результате указанного облучения распад твердого раствора.

Кроме того, автору удалось установить взаимосвязь между объемной плотностью радиационно-индуцированных кластеров, формирующихся на начальных стадиях облучения материалов, с числом создаваемых каскадов атом-атомных смещений.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные экспериментальные данные и выявленные закономерности могут быть использованы при разработке новых конструкционных материалов ядерной и термоядерной техники, для прогноза эксплуатационного ресурса исследуемых материалов, а также представляют интерес 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 формирования меднообогащенных предвыделений (глава 3) использовался спектр нейтронов для активной зоны реактора ВВЭР-440/1000 с учетом уменьшения плотности потока вблизи корпуса реактора. Даже с учетом используемых автором перенормировок более верным было бы использовать спектр, непосредственно соответствующий зоне, в которой облучались образцы, изучаемые в диссертационной работе.

2. При сравнительном анализе результатов ионных и реакторных экспериментов следует учитывать отличие в спектрах первично-выбитых атомов, а также скорости набора повреждающей дозы, и делать на это необходимые поправки.

3. Исследуемые в работе материалы проходили облучение при температурах близких к 300 °С. Для более полного анализа эффекта формирования радиационно-индуцированных предвыделений, анализу которого посвящена диссертационная работа, автору полезно было бы провести сравнительные исследования для нескольких температур облучения в диапазоне температур 250-400 °С, характерных для эффекта низкотемпературного радиационного упрочнения и связанного с ним охрупчивания.

Данные замечания носят рекомендательный характер и 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 – **Никитин Александр Александрович** достоин присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент
Ведущий научный сотрудник,
доктор технических наук, с.н.с.,
Виктор Степанович Неустроев
Отделение реакторного материаловедения
АО «ГНЦ НИИАР», Ульяновская область,
г. Димитровград, Западное шоссе, 9
Тел: (84235)65324,
e-mail: neustroev@niiar.ru



В.С. Неустроев

Подпись д.т.н. Неустроева В.С. заверяю:
Ученый секретарь АО «Государственный
научный центр Научно-исследовательский
институт атомных реакторов»,
кандидат технических наук



Ю.А. Валиков