



ФЭИ
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «НАУКА И ИННОВАЦИИ»

**Акционерное общество
«Государственный научный центр
Российской Федерации –
Физико-энергетический институт
имени А.И. Лейпунского»
(АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)**

**Заместитель генерального директора
по науке и инновационной деятельности**

пл. Бондаренко, д. 1, г. Обнинск,
Калужская область, 249033
Телефон (484) 399-46-06, факс (484) 399-89-25
E-mail: naygaretova@ippe.ru
ОКПО 08624390, ОГРН 1154025000590
ИНН 4025442583, КПП 402501001

05.10.2021 № 224/5-06/137

На № _____ от _____

Об отзыве официального оппонента

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Жучкова Георгия Михайловича

на тему: «Особенности фазообразования в сталях корпусов реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 после первичного и повторного облучений», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Срок службы ряда эксплуатирующихся энергетических реакторов типа ВВЭР приближается к проектному, что требует выполнения работ по обоснованию дальнейшей безопасной их эксплуатации, в том числе восстановительного отжига. В связи с этим представленная работа по исследованию радиационно-индуцированных изменений фазово-структурного состояния сталей корпусов реакторов (КР) ВВЭР как в процессе эксплуатации, так и под воздействием восстановительных отжигов и последующих облучений является весьма актуальной.

В представленной работе впервые проведены систематические атомно-зондовые исследования тонкой структуры сталей КР ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 и получен ряд новых научных результатов, позволяющих уточнить опережающий прогноз радиационного поведения сталей КР на весь планируемый срок службы.

Достоверность экспериментальных данных, обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивались совместным использованием взаимно дополняющих друг друга современных методов исследования, таких как количественная оже-электронная спектроскопия (ОЭС), аналитические методы просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и атомно-зондовой томографии (АЗТ), а также числом измерений, обеспечивающим необходимую статистику.

Первая глава работы представляет собой обзор современной научно-технической литературы, включающий анализ закономерностей изменения структуры и свойств материалов

КР, подвергающихся воздействию рабочих температур и облучения. Достоинством этой главы является большой объем проанализированных литературных источников, отражающих все вопросы, которые рассмотрены в диссертационной работе. В частности, рассмотрены механизмы, ответственные за тепловое и радиационное охрупчивание сталей КР, а также факторы, влияющие на эффект флакса в сталях с различным легированием. В результате делается вывод о том, что исследование особенностей фазообразования в сталях КР в процессе эксплуатации, а также после первичного и повторного отжига, характерных для ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, позволит углубить представления о механизмах охрупчивания с учётом различия используемых материалов и повысить надёжность предсказаний радиационного охрупчивания.

Вторая глава посвящена описанию исследуемых материалов и методов исследования. Следует отметить высокий уровень этой части диссертационной работы, содержащей подробное описание использованных в работе методик исследования с указанием их разрешающей способности и необходимой статистики измерений. При этом наибольшее внимание уделено методу АЗТ как основному методу в данной работе, а также как методу, который позволил выявить ранее неизвестные закономерности фазообразования.

В третьей главе исследована кинетика образования радиационно-индуцированных преципитатов в сталях КР ВВЭР-440, основного металла (ОМ) и металла сварного шва (МШ), в циклах: облучение – восстановительный отжиг – повторное облучение – восстановительный отжиг – ускоренное облучение. Здесь предложен прием разделения преципитатов по типам: первичные, вторичные, третичные, остаточные в зависимости от цикла «облучение-отжиг», который был реализован только благодаря использованию метода атомно-зондовой томографии. Такое разделение преципитатов помогло выяснить кинетику радиационного охрупчивания сталей на разных этапах циклов «облучения – отжига». При этом автору удалось объяснить причины как изменения состава преципитатов за счет образования фосфорных зернограницных сегрегаций в ОМ и накопления фосфора в матрице МШ, так и наблюдаемого снижения темпа радиационного охрупчивания МШ ВВЭР-440 по мере проведения повторных отжигов за счет снижения общей плотности преципитатов при каждом новом цикле облучения. Это очень важная часть работы, поскольку для дальнейшего заявленного продления срока службы сталей КР ВВЭР-440 и построения опережающих прогнозных зависимостей их радиационного охрупчивания до 60 лет, необходимо было понимание изменения структурно-фазового состояния сталей, влияющего на их служебные характеристики. Учет полученных в данной работе результатов позволяет избежать излишней консервативности при обосновании возможности продления срока службы КР ВВЭР-440 до 60 лет в части оценки их радиационного упрочнения.

Четвертая глава содержит большой объем экспериментальных данных о наноструктурных исследованиях материалов КР ВВЭР-1000 с различным легированием, облученных разным флаксом в широком интервале флюенсов быстрых нейтронов. Проведенные сравнительные исследования дозных зависимостей объемных долей и размеров радиационно-индуцированных преципитатов в ОМ и МШ КР ВВЭР-1000, облученных в составе образцов-свидетелей и ускоренно облученных в исследовательском реакторе ИР-8 (НИЦ «Курчатовский институт»), показали, что темп накопления радиационно-индуцированных преципитатов при ускоренном облучении ниже, чем при облучении в составе образцов-свидетелей. Кроме того, результаты исследований методом АЗТ показывают, что размер радиационно-индуцированных преципитатов в МШ при ускоренном облучении значительно ниже, чем при облучении в составе ОС. При этом показано, что, независимо от

флюенса, флакса быстрых нейтронов, а также от конкретного химического состава сталей в пределах марочного состава корпусных сталей ВВЭР-1000, химический состав радиационно-индуцированных преципитатов на основе Ni занимает узкую область составов и может являться соединением типа Ni_2Si .

Важной частью главы 4 является построение, с использованием уравнения Орована, дозовой зависимости изменения предела текучести на основе измеренных в диссертационной работе параметров радиационно-индуцированных элементов структуры (преципитатов и дислокационных петель). Построенная дозовая зависимость показала хорошее соответствие с экспериментально определенной зависимостью изменения предела текучести от флюенса быстрых нейтронов.

Важное практическое значение имеют также полученные на образцах-свидетелях сталей ВВЭР-1000 данные об идентичности их структурно-фазового состояния при первичном и повторном облучении после восстановительного отжига (по стандартному режиму $565^{\circ}C/100ч$), что дает основание полагать, что темп первичного и повторного радиационного охрупчивания одинаков. Этот результат подтвержден впервые в данной работе на образцах-свидетелях, поскольку ранее эффективность восстановительного отжига была подтверждена на образцах ускоренно облученных, с учетом эффекта флакса.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. В главе 3 методом АЗТ впервые проведено подробное исследование содержания элементов в составе преципитатов и в матрице в ОМ и МШ ВВЭР-440 на различных циклах «облучение-отжиг». На Рисунке 3.15 приведены гистограммы распределения концентрации фосфора в границе зерна ОМ в таких циклах, полученные методом ОЭС. Полезно было бы для сравнения привести подобные гистограммы и для материала МШ.

2. Для уточнения неупрочняющего механизма охрупчивания в материалах КР ВВЭР-1000 было бы полезно, кроме представленного в Таблице 4.12 ОЭС исследования относительного содержания элементов P, Cr, Ni, Mo, Si по границам зерен, исследовать методом АЗТ их содержание по глубине возле границ зерен. Это позволило бы оценить их относительные диффузионные подвижности, определяющие радиационно-индуцированную сегрегацию.

Сделанные замечания не снижают ценности работы, скорее это пожелания для дальнейших работ. В диссертации полностью реализована цель работы и решены поставленные задачи на высоком научном уровне. В целом, работа логично выстроена, эксперимент хорошо описан, использованы взаимно дополняющие друг друга методы исследования. Результаты работы опубликованы в 8 научных статьях, материалы докладывались и обсуждались на 8 научно-практических конференциях.

Вклад автора – Жучкова Георгия Михайловича в работу заключается в выполнении всех представленных исследований сталей с использованием методики АЗТ, а также в его участии в выполнении и обсуждении результатов исследований другими методиками, анализе полученных экспериментальных данных и выявлении корреляций с механическими свойствами. Применение широкого набора экспериментальных методик потребовало привлечения к участию в работе и других сотрудников, что отражено в автореферате, в диссертации и в списке публикаций, однако вклад диссертанта является определяющим.

Актуальность темы диссертации, использование нескольких взаимно дополняющих друг друга современных экспериментальных методик, большой объем выполненной диссертантом работы, новизна и практическая ценность полученных результатов позволяют сделать вывод о

том, что диссертация отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Жучков Георгий Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

Официальный оппонент:
ведущий научный сотрудник
Отделения прикладной физики
АО «ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского»,
кандидат физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – Физика
конденсированного состояния

Печенкин Валерий Александрович
05 октября 2021 г.

Печенкин Валерий Александрович
Почтовый адрес:
249033, г. Обнинск, Калужской обл.,
пл. Бондаренко, д.1
E-mail: var@ippe.ru

Подпись В.А. Печенкина заверяю:



Н.Г. Айрапетова

Печенкин Валерий Александрович
(8-484) 399-80-19