

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Жучкова Георгия Михайловича на тему
**«Особенности фазообразования в сталях корпусов реакторов ВВЭР-440 и
ВВЭР-1000 после первичного и повторного облучений»,**

представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Исследование и уточнение механизмов радиационного охрупчивания конструкционных материалов ядерных энергетических установок актуально как для материалов активной зоны реакторов на быстрых нейтронах, так и для материалов корпусов реакторов типа ВВЭР, особенно в связи с продлением срока эксплуатации ядерных реакторов до 60 лет и более.

Диссертационная работа Г.М. Жучкова посвящена исследованию радиационно-индуцированных изменений структуры сталей корпусов реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 под воздействием эксплуатационных факторов, а также восстановительных отжигов с целью уточнения действующих механизмов радиационного охрупчивания этих материалов. Одним из основных методов исследования для решения этой задачи является атомно-зондовая томография (АЗТ), которая позволяет получать полную картину о радиационно-индуцированных элементах структуры материала (их плотности, пространственном распределении, а также так об их детальном химическом составе).

Метод АЗТ ранее использовали для исследования радиационной повреждаемости сталей корпусов реакторов (КР), в том числе для материалов сварного шва корпуса ВВЭР-440 после облучения, отжига и повторного облучения. Было показано, что кинетика радиационно-индуцированных изменений при повторном облучении может зависеть от скорости набора дозы (флакса) при первичном облучении, поскольку промежуточных отжиг, при быстром наборе первичной дозы, может приводить к практически полному растворению меднообогащенных преципитатов, а в обратном случае низкого флакса - к формированию крупных предвыделений меди за счет растворения мелких. В диссертационной работе Г.М. Жучкова впервые проанализированы и обобщены имеющиеся на сегодняшний день параметры радиационно-индуцированных изменений структуры образцов-свидетелей (ОС) из данных сталей, наиболее адекватно отражающие структурное состояние КР после воздействия эксплуатационных факторов и воздействия восстановительных отжигов реакторов типа ВВЭР.

В результате проведенных комплексных исследований особенностей фазообразования в металле сварного шва и основного металла корпусов реакторов ВВЭР-440 в цикле «Облучение – Отжиг – Повторное облучение – Повторный отжиг» впервые показано, что за счет проведения восстановительных отжигов наблюдается снижение общей плотности преципитатов на каждом из циклов «облучение-отжиг». Это, в свою очередь, приводит к снижению темпа радиационного охрупчивания металла сварного шва (МШ), демонстрирующего опережающий темп радиационного охрупчивания по

сравнению с основным металлом (ОМ). При этом плотность преципитатов в ОМ существенно ниже на всех этапах эксплуатации, чем в МШ, что и обуславливает более низкий темп радиационного охрупчивания ОМ по сравнению с МШ.

Исследования методом атомно-зондовой томографии особенностей радиационного охрупчивания металла КР ВВЭР-1000 при облучении в широком интервале флюенсов и флаксов позволили расширить и уточнить на широком круге материалов МШ и ОМ КР ВВЭР-1000 особенности фазообразования в условиях облучения, характерных для образцов-свидетелей и ускоренно облученных образцов. При этом было показано, что независимо от условий облучения (при разных флюенсах и флаксах), а также химического состава сталей, состав Ni-Mn-Si-фазовых преципитатов занимает довольно узкую область, соответствующую формированию соединений типа Ni_2Si , в котором часть атомов Ni заменена атомами Mn.

На основе определения радиационно-индуцированных элементов структуры с помощью методов АЗТ и просвечивающей электронной микроскопии был оценен их вклад в изменение под облучением предела текучести. Результаты оценки с использованием уравнения Орована показали хорошее согласие с полученными экспериментальными данными при испытаниях на статическое растяжение. Результат проведенного статистического анализа с помощью теста Чоу показал, что расчётные значения вклада в сдвиг предела текучести по результатам исследования ОС и ускоренно облученных образцов могут быть описаны единой зависимостью. Это факт означает, что вклад в наблюдаемый для МШ ВВЭР-1000 эффект флакса слабо зависит от упрочняющего механизма радиационного охрупчивания (связанного с образованием радиационно-индуцированных преципитатов), а определяется в большей степени неупрочняющим механизмом (образованием зернограничных сегрегаций фосфора и никеля).

Важным элементом работы являются проведенные сравнительные исследования структурных превращений в первично – и повторно облученных ОС МШ ВВЭР-1000 с высоким содержанием Ni (после восстановительного отжига по режиму $565^{\circ}C/100ч.$). До этой работы исследования эффективности восстановительного отжига были проведены на образцах сталей, ускоренно повторно (после отжига) облученных. В результате, было показано, что темп повторного радиационного охрупчивания должен быть не выше темпа радиационного охрупчивания при первичном облучении.

Результаты, полученные в работе, хорошо согласуются с современными теоретическими представлениями, а также не противоречат известным данным научно-технической литературы. Это дополнительно внушает доверие к полученным результатам и выводам. Работа является значимым научным вкладом в изучение радиационно-индуцированных эффектов в конструкционных материалах, а также имеет практическое применение для оценки остаточного ресурса КР.

Автор является соавтором 8 научных статей, материалы диссертации докладывались и обсуждались на 7 международных и молодёжных научно-практических конференциях.

Вклад автора в работу состоит в проведении исследования статей с использованием метода АЗТ на всех циклах эксперимента, а также в анализе полученных экспериментальных данных и их сопоставлении с механическими характеристиками.

Имеется ряд замечаний по тексту реферата:

- с самого начала используются сокращения ОМ, МШ и ОС, хотя их обозначения вводятся только на стр. 6 и 8;

- на стр. 8 имеется опечатка в обозначении состояния после повторного облучения: написано $I_1A_1I_3$, а должно быть $I_1A_1I_2$;

- неудачно сформулирован личный вклад автора (стр. 6): «автор принимал ... участие в анализе ... данных и их корреляции с механическими характеристиками».

На основе изучения реферата диссертационной работы Жучкова Г.М. считаю, что высказанные предложения и замечания не снижают достоинства представленной работы в целом. Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям, соответствует научной специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации, является законченным научным исследованием с научной новизной и практической значимостью, а ее автор Жучков Г.М. заслуживает присвоения ему искомой степени кандидата технических наук по данной специальности.

Начальник отдела атомно-масштабных и
ядерно-физических методов исследования
материалов ядерной техники,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ»,
доктор физико-математических наук



Рогожкин Сергей Василевич
05.10.21

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ)

Почтовый адрес: 117218, Россия, г. Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

Телефон: 8 (499) 789-63-74

Электронная почта: sergey.rogozhkin@itep.ru

Подпись Рогожкина С.В. удостоверяю:
ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ»,
кандидат физико-математических наук



Васильев В.В.