

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Жучкова Георгия Михайловича

«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»

Актуальность. Оценка ресурса корпусов реакторов (КР), возможное продление назначенных сроков их эксплуатации КР (до 60 лет и более) является важной задачей как в нашей стране, так и за рубежом. Для повышения надёжности прогнозных зависимостей изменения механических свойств материалов КР в процессе эксплуатации необходимо, в частности, уточнение действующих механизмов радиационного охрупчивания, связанных с радиационно-индуцированным фазообразованием, а также воздействием восстановительных отжигов. Это обстоятельство и определило актуальность диссертационной работы.

Структура и основное содержание диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 146 наименований, содержит 117 страниц, 37 таблиц и 42 рисунка.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и решаемые задачи, научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава работы представляет собой обзор современной научно-технической литературы по теме исследования, где, в частности, был сформулирован вывод о том, что проведение комплекса микроструктурных исследований средствами атомно-зондовой томографии (АЗТ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), оже-электронной спектроскопии (ОЭС) позволит получить более полное представление о закономерностях влияния структуры на свойства сталей КР, уточнить механизмы радиационного охрупчивания, как основы для повышения достоверности прогноза поведения сталей при эксплуатации.

Вторая глава посвящена описанию исследуемых материалов: образцов темплетов и трепанов сталей металла сварного шва и основного материала (ОМ) КР ВВЭР-440 марки 15Х2МФА, материалов МШ и ОМ КР ВВЭР-1000 в различных состояниях. Представлено описание методов исследования: ПЭМ, РЭМ, АЗТ и ОЭС с учётом пределов применимости каждого из них. Подробно описаны состояния, в которых находились образцы: длительность радиационного и теплового воздействия, флюенс и флакс быстрых нейтронов, а также режимы всех восстановительных отжигов.

В третьей главе исследованы и проанализированы радиационно-индуцированные элементы структуры, ответственные за упрочнение сталей темплетов и трепанов МШ и ОМ КР ВВЭР-440 в результате нескольких циклов «облучение-отжиг». Первично проведенный отжиг МШ КР ВВЭР-440 позволил продлить срок службы корпусов и, соответственно, реакторной установки в целом до 30 и 45 лет. Для продления срока службы до КР 60 лет за счет дальнейших восстановительных необходимо было изучить кинетику изменения фазового состава в процессе дальнейших последовательных облучений после восстановительных отжигов, что является отличительной стороной настоящей диссертационной работы.

Так, впервые было показано, что в сталях КР ВВЭР-440 в циклах «облучение-отжиг-повторное облучение-повторный отжиг-последующее облучение» роль меди в образовании

радиационно-индуцированных медно-обогащенных фаз снижается, в то время как роль фосфора, наоборот, усиливается со второго цикла облучения, поскольку в МШ фосфор участвует в образовании преципитатов, а в ОМ – образует зернограничную сегрегацию. При этом плотность упрочняющих радиационно-индуцированных преципитатов (выделений), как в ОМ, так и в МШ постепенно снижается в циклах «облучение-отжиг», а плотность этих выделений в ОМ на всех этапах эксплуатации, ниже, чем в МШ, что и обуславливает более низкий темп радиационного охрупчивания ОМ по сравнению с МШ.

Установленные закономерности фазообразования в сталях КР ВВЭР-440 позволили выявить причину постепенного снижения темпа их радиационного охрупчивания в процессе эксплуатации с промежуточными восстановительными отжигами, а также подтвердить эффективность проведения повторных восстановительных отжигов для продления срока эксплуатации КР ВВЭР-440 до 60 лет.

В четвертой главе расширены и уточнены (МШ и ОМ КР ВВЭР-1000) особенности фазообразования в условиях облучения, характерных для образцов-свидетелей (ОС) и ускоренно облученных образцов с использованием метода атомно-зондовой томографии. Проведение исследования фазообразования в ускоренно облученных образцах представляется полезным в связи продлением срока службы реакторов типа ВВЭР до 60 лет.

Использование метода атомно-зондовой томографии для исследования радиационно-индуцированных Ni-Si-Mn преципитатов и статистическая обработка результатов исследования позволили впервые показать, что изменение флюкса быстрых нейтронов при облучении МШ (с содержанием Ni > 1,4 %масс.) оказывает влияние на объемную долю и размер фазовых выделений при отсутствии влияния флюкса на объемную плотность преципитатов в ОМ с содержанием никеля (1,1-1,3) %масс. При этом объемная доля преципитатов при ускоренном облучении МШ значимо ниже по сравнению со значением для образцов-свидетелей МШ (в основном, за счёт меньшего их размера при ускоренном облучении). Однако средний химический состав преципитатов в ОМ и МШ не зависит существенно от условий облучения (флюенса и флюкса быстрых нейтронов), а также от химического состава сталей КР ВВЭР-1000 и близок к соединениям типа Ni₂Si.

Полученные в работе значения параметров Ni-Si-Mn преципитатов и дислокационных петель были использованы для оценки изменения предела текучести ($\Delta\sigma_{0,2}$) по уравнению Орована. Было показано, что расчётные значения предела текучести на основе данных АЗТ, ПЭМ коррелируют с экспериментальными значениями, определенными по испытаниям на статическое растяжение. Результат проведенного статистического анализа показал, что расчётные значения вклада в сдвиг предела текучести по результатам исследования ОС и ускоренно облученных образцов могут быть описаны единой зависимостью. Таким образом, установлено, что в ускоренно облученных образцах МШ (с содержанием Ni > 1,4 %масс.), вклад радиационного упрочнения в эффект флюкса незначителен (по сравнению с вкладом от сегрегационных процессов). Это повысит объективность долгосрочного прогнозирования свойств сталей КР по результатам механических испытаний ускоренно облученных образцов.

Было также показано, что темпы первичного и повторного (после восстановительного отжига) радиационного охрупчивания сталей КР ВВЭР-1000, облученных в составе образцов-свидетелей, идентичны. Отсюда вытекает возможность продления срока службы КР ВВЭР-1000 еще на один ресурсный период.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций.

- установлено, что уменьшение общей объёмной плотности радиационно-индуцированных преципитатов в цикле «облучение – восстановительный отжиг – повторное облучение – повторный восстановительный отжиг – ускоренное облучение» способствует постепенному снижению темпа радиационного охрупчивания сталей КР ВВЭР-440 в процессе эксплуатации с промежуточными восстановительными отжигами;

- впервые в широком диапазоне флюенсов и флаксов быстрых нейтронов установлены закономерности радиационно индуцированного фазообразования в образцах-свидетелях (ОС) сталей российских КР ВВЭР-1000 с получением химического состава, дозовых зависимостей: объёмной плотности, размера, объёмной доли Ni-Mn-Si преципитатов и радиационных дефектов;

- показано, что в ускоренно облученных образцах металла сварного шва (МШ) КР ВВЭР-1000 (с содержанием Ni > 1,4 %масс.) вклад радиационного упрочнения в эффект флакса незначителен (по сравнению с вкладом от сегрегационных процессов).

Достоверность полученных результатов. Подтверждается применением стандартизированных методов лабораторных испытаний и исследований сталей, воспроизводимостью и согласованностью анализируемых данных, использованием современных методов исследования и экспериментального оборудования.

В частности, следует отметить использование атомно-зондовой томографии (Cameca LEAP 4000 HR) для оценки объёмной плотности, размера и химического состава радиационно-индуцированных элементов структуры (преципитатов); просвечивающего электронного микроскопа FEI Titan 80-300 для оценки плотности и размера радиационно-индуцированных преципитатов и радиационных дефектов – дислокационных петель; оже-нанозонда Physical Electronics PHI 700 для определения уровня зернограницных сегрегаций примесей в границах зёрен материалов; растрового электронного микроскопа Zeiss Supra VP40 для определения доли хрупкого зернограницного разрушения в изломах.

Полученные экспериментальные данные были сопоставлены с результатами, имеющимися в научно-технической литературе.

Степень обоснованности научных положений и выводов. Все сформулированные автором научные положения и выводы основываются на необходимом и достаточном объеме теоретических и экспериментальных данных.

В частности, исследования радиационно-индуцированных элементов структуры методом АЗТ проведены, начиная от пробоподготовки, анализа трёхмерных реконструкций исследуемых материалов в программной среде IVAS 3.6.12, получения статистически достоверных данных, заканчивая анализом и сопоставлением с данными, полученными ПЭМ и ОЭС. Это позволило получить характеристики наноразмерных элементов структуры, хорошо

коррелирующие с исследованиями другими методами, с механизмами деградации структуры и свойств материалов под облучением.

Практическая значимость результатов работы. Подтверждена эффективность проведения повторных восстановительных отжигов для продления срока эксплуатации КР ВВЭР-440 до 60 лет.

Структура диссертации логична, работа написана доступным языком и аккуратно оформлена.

Автореферат диссертации и публикации автора в т.ч. 16 статей и докладов (из них 8 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ (индексируемых в базах данных WoS и SCOPUS), соответствуют содержанию диссертации и достаточно полно ее отражают. Результаты исследования были доложены и обсуждены на 3 международных и 5 российских научно-практических конференциях.

По работе можно сделать некоторые **замечания**:

1. В главе 3 при оценке эффективности повторных восстановительных отжигов на восстановление структуры и свойств сталей ВВЭР-440 после последнего отжига исследованы ускоренно облученные образцы. Однако не указано, как в этом случае учитывался вклад от эффекта флакса при оценке параметров преципитатов.

2. Из рис. 4.6 следует, что объемные плотности преципитатов в образцах МШ, облученных с разным флаксом, довольно близки по значениям. При этом объемные доли преципитатов (рис. 4.9) в тех же образцах значительно отличаются из-за того, что размер преципитатов в ускоренно облученных образцах меньше. В этой связи не вполне понятно, почему дозовая зависимость сдвига предела текучести оказалась одинаковой для образцов, облученных с разным флаксом при определении сдвига предела текучести по уравнению Орована в которое входят как плотности, так и размеры преципитатов как барьеров для движения дислокаций.

3. В главе 4 обсуждаются закономерности повторного радиационного охрупчивания металла сварного шва в структуре образцов-свидетелей после восстановительного отжига. Однако при отжиге металла сварного шва основной металл также подвергается длительному воздействию высоких температур ($565^{\circ}\text{C}/100\text{ ч}$). По-видимому, с учетом этого следовало бы также оценить влияние восстановительного отжига на развитие радиационного охрупчивания в образцах-свидетелях из основного металла в т.ч. дать прогноз охрупчивания в масштабах изделия с учетом дальних последствий ликвации.

4. При обсуждении вопросов, связанных с взаимосвязью концентрации фосфора и доли зернограницной составляющей в изломе, как характеристики склонности стали к охрупчиванию, было бы полезно обсудить фактор морфологии зернограницной составляющей в изломе, играющий далеко не последнюю роль в вариации температуры вязко-хрупкого перехода.

5. При оценках значений средней плотности преципитатов (табл. 3.9), было бы полезно получить статистику распределения расстояний между ними. Это в целом дало бы более полное

представление об неоднородности их размещения, позволило оценить корректность применяемых статистических оценок.

Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на оценку диссертационной работы Жучкова Г.М. Она представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные решения, необходимые оценки радиационной стойкости стелей корпусов реакторов типа ВВЭР и подтверждения прогнозных оценок радиационного охрупчивания КР, что имеет существенное значение для развития атомной отрасли.

Диссертация выполнена на необходимом теоретическом и экспериментальном уровне, полученные результаты подтверждаются модельными и экспериментальными исследованиями и имеют научную и практическую значимость. В этой связи цели и задачи исследования, поставленные в работе, достигнуты, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны. В целом, диссертационная работа Жучкова Георгия Михайловича по своему теоретическому, методическому и экспериментальному уровню, объему работы, актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям "Положением о порядке присуждения ученых степеней" (в ред. Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 N 842), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

Официальный оппонент,
профессор кафедры металловедения
и физики прочности НИТУ «МИСиС»,
профессор, доктор технических наук
по специальности 05.16.01 – Металловедение и
термическая обработка металлов



Кудря Александр Викторович

« 08 » октября 2021 г.

Почтовый адрес:
119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4
Телефон: +7-(495)-955-00-13
e-mail: AVKudrya@misis.ru

ПОДПИСЬ А.В. Кудря ЗАВЕРЯЮ
Директор по безопасности

И.М. Исаев