

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»
(ННТУ «МИСиС»)

Ленинский проспект, 4, Москва, 119991
Тел. (495)955-00-32; Факс: (499)236-21-05
<http://www.misis.ru>
E-mail: kancela@misis.ru

ОКПО 02066500 ОГРН 1027739439749
ИНН/КПП 7706019535/ 770601001

№ _____

На № _____

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**на диссертационную работу КРИКУН Екатерины Владимировны
на тему «Механизмы радиационного охрупчивания стали 15X2НМФА класс 1
корпуса реактора ВВЭР-1000 под действием облучения в диапазоне температур (50-
400)°С», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации»**

Актуальность работы. Диссертационная работа посвящена определению влияния различных температур облучения на микроструктуру, фазовый состав и механизмы радиационного охрупчивания стали корпуса реактора ВВЭР-1000. Актуальность этого исследования связана с тем, что анализ полученных результатов по стойкости сталей корпусов реакторов (КР) ВВЭР-1000 против радиационного и теплового охрупчивания в результате облучения при различных температурах позволит, выявить закономерности влияния температуры облучения и уточнить механизмы радиационного охрупчивания сталей, а так же обосновать возможность применения стали данного класса для безопасного использования в качестве материалов корпусов новых перспективных реакторов ВВЭР со сверхкритическими параметрами воды с разогревом теплоносителя до 500°С и температурой эксплуатации корпуса до 400 °С (для перспективного реактора ВВЭР-СКД)

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций. Выбранное соискателем направление является на сегодняшний день новым, поскольку на данный момент практически не имеется данных по стойкости легированных корпусных сталей против радиационного охрупчивания под действием облучения при температурах, существенно отличающихся от температур эксплуатации корпусов реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. В настоящее время ведутся работы по созданию проектов реакторов типа ВВЭР самой разной мощности, что связано с сильными различиями в параметрах теплоносителя, различиями в эксплуатационных параметрах для ряда конструктивных узлов реактора. В

связи с этим проведение комплексных исследований радиационной стойкости корпусных сталей после облучения при различных температурах (в диапазоне от 50°C до 400°C) своевременно и востребованности. Эти обстоятельства позволяют говорить о том, что проведенное соискателем исследование обладает не только актуальностью, но и несомненной научной новизной.

Новые научные результаты представлены в третьей и четвертой главах диссертации к основным из которых следует отнести следующие.

Проведенный сравнительный анализ микроструктуры и фазового состава исследованной стали в исходном состоянии, после низкотемпературного облучения (50-140)°С, облучения при температуре, характерной для эксплуатации КР ВВЭР-1000 (300°C), при повышенной температуре (400°C), а также для оценки термической стойкости стали - после охрупчивающей термической обработки показал, что даже после провоцирующей охрупчивающей термообработки сталь 15X2НМФА класс 1 демонстрирует хорошую термическую стабильность: наблюдаемый сдвиг критической температуры хрупкости (35°C); при аналогичной охрупчивающей термообработке сталь ВВЭР-1000 (15X2НМФА-А) демонстрирует сдвиг $\Delta T_k = 55^\circ\text{C}$.

Исследования радиационно-индуцированных фаз в стали 15X2НМФА класс 1 после низкотемпературного облучения при низких температурах (50,140)°С показали отсутствие радиационно-индуцированных упрочняющих фаз (преципитатов), характерных для стали, облученной при рабочих температурах корпусов реакторов ВВЭР-1000. Отсутствие преципитатов и зернограничных сегрегаций вызвано низкой диффузионной подвижностью атомов. В данном температурном интервале облучения эффект радиационного охрупчивания рассматриваемой стали связан только с действием упрочняющего механизма, обусловленного образованием радиационных дефектов - дислокационных петель сверхвысокой плотности.

Для облучения корпусной стали при температуре 400°C, повышенной по сравнению с рабочей температурой ВВЭР-1000, характерна большая вероятность рекомбинации дефектов (отжиг) за счет повышенной подвижности точечных дефектов, а также усиление термической диффузионной подвижности атомов примесей.

Проведенный методами ПЭМ, РЭМ и АЗТ фазовый анализ стали, облученной при данной температуре показал отсутствие не только радиационных дефектов — дислокационных петель, что было ожидаемо из-за отжига дефектов, но и отсутствие радиационно-индуцированных преципитатов, которые под облучением в изученном интервале флюенсов быстрых нейтронов всегда наблюдаются в сталях КР после облучения при рабочих температурах (~ 300°C) КР ВВЭР. Этот факт является наиболее интересным в данной главе и свидетельствует о том, что для образования радиационно-индуцированных выделений, наряду с достаточной диффузионной подвижностью, необходимо присутствие радиационных дефектов, с которых начинается зарождение фаз.

Новым экспериментальным фактом, обнаруженным автором при выполнении диссертационной работы, являются наблюдаемые карбидные превращения. При этом

численные плотности исходных карбидов Me_7C_3 и Me_2C незначительно уменьшились по сравнению с исходным состоянием, а численная плотность основной упрочняющей фазы - карбонитридов увеличилась в $\sim 2,3$ раза при уменьшении их размеров. В результате облучения стали 15X2НМФА класс 1 при температурах 50,140 и 300 °С карбидные фазы оставались стабильными и их параметры не отличались от исходного состояния.

Кроме того, в работе было показано, что повышение до 400°С температуры облучения по сравнению с рабочей температурой ВВЭР-1000 из-за повышенной диффузионной подвижности закономерно приводит к увеличению уровня зернограничной сегрегации примесей по сравнению с исходным состоянием, однако концентрация фосфора на границах зерен заметно ниже, чем зернограничная концентрация фосфора после провоцирующей охрупчивающей термообработки.

В четвертой главе обобщены результаты структурных исследований и механических испытаний образцов стали 15X2НМФА класс 1 в исходном состоянии и после облучения в диапазоне температур (50-400)°С. Кроме того, уточнены механизмы радиационного охрупчивания стали 15X2НМФА класс 1, действующие при различных температурах.

Показано, что по сравнению с 300°С, наибольший темп радиационного охрупчивания (максимальные сдвиги ΔT_k) демонстрирует сталь 15X2НМФА класс 1, облученная при температурах 50°С и 140°С, что обусловлено действием упрочняющего механизма за счет формирования только дислокационных петель сверхвысокой плотности, что коррелирует с полученными изменениям предела текучести.

Радиационное упрочнение изученной стали при 400°С обусловлено только изменением параметров исходных упрочняющих фаз – карбонитридных. При этом наблюдается значительно меньшее изменение предела текучести по сравнению с облучением при 300°С, что связано с отсутствием после облучения при 400°С радиационно-индуцированных фаз. Однако накопление зернограничных сегрегаций под облучением при 400°С происходит более интенсивно, чем при 300°С.

Перечисленные результаты экспериментальной части работы и сделанные на их основе обоснованные выводы свидетельствуют о несомненной научной новизне диссертационной работы, степень обоснованности научных положений и выводов которой так же не вызывает сомнений.

Достоверность полученных результатов. Подтверждается применением стандартизированных и оригинальных методов исследований структуры и фазового состава, лабораторных и реакторных испытаний, воспроизводимостью и согласованностью анализируемых данных, использованием современных методов исследования и новейшего экспериментального оборудования.

Это подтверждается представленной во второй главе диссертации совокупностью большого числа современных высокоразрешающих методов исследований (ПЭМ, оже-электронной спектроскопии, атомно-зондовой томографии). Наиболее полно проведены исследования фазового состава и микроструктуры методом ПЭМ. Для определения

фазового состава исследуемой стали была использована комплексная методика, созданная на основе модификации метода микродифракции с использованием программного пакета «DiffrCalc», разработанного с участием автора и зарегистрированного в Роспатенте.

Автором показано, что программа «DiffrCalc» обладает широкими возможностями для проведения анализа фазового состава различных кристаллических материалов: сталей, циркониевых сплавов, сверхпроводников и других материалов, для которых известны данные о кристаллической структуре.

Практическую значимость результатов работы представляет разработанная комплексная методика микродифракции, позволяющая повысить точность и ускорить процесс индифракционирования дифракционных картин для широкого круга материалов за счет использования созданного и запатентованного программного пакета «DiffrCalc».

Установленные и уточненные в работе механизмы радиационного охрупчивания сталей КР ВВЭР-1000, позволяют прогнозировать радиационную стойкость корпусных сталей в широком интервале температур возможной эксплуатации корпусов реакторов ядерных установок различного назначения.

Замечания:

1. В диссертации подробно не обоснован выбранный для исследования диапазон низких температур облучения (50...140°C), а также не понятно, почему для температуры облучения 400°C было проведено облучение только до одного флюенса, что не позволяет определить коэффициент радиационного охрупчивания при этой температуре облучения.
2. Экспериментально доказанный в главе 3 (с.78) сдвиг критической температуры хрупкости $\Delta T_k=35^\circ\text{C}$ после провоцирующей термообработки для стали стали 15X2НМФА класс 1 является достаточно большим, что плохо для ее работы в реакторе при повышенных температурах. Возникают вопросы к утверждению о высокой термической стойкости этого материала.
3. Структура диссертации вполне логична, но следует отметить некоторую неравноценность глав по объему излагаемого материала (обзор литературы и описание методик в главах 1 и 2 - 57с.; результаты, в главах 3 и 4 – 37с.).

Сделанные замечания не снижают ценности и общей положительной оценки работы.

Заключение.

В диссертационной работе полностью решены поставленные задачи на высоком научном уровне, с привлечением большого объема экспериментальных результатов исследований на современном исследовательском оборудовании, что обеспечило их достоверность и обоснованность выводов. Работа написана ясным технически грамотным языком, хорошо оформлена, содержит достаточный для понимания и оценки результатов фактический экспериментальный материал и иллюстрации.

Автореферат диссертации и основные публикации автора (результаты диссертации опубликованы в 22-ух статьях и докладах, в том числе, в 7 журналах из списка ВАК) соответствуют ее содержанию и полностью отражают основные результаты работы.

В целом, диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены новые обоснованные результаты, необходимые для создания и обоснования материалов корпусов перспективных атомных реакторов.

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 Крикун Екатерина Владимировна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Металловедения
и физики прочности НИТУ «МИСиС»

С.А. Никулин

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
почтовый адрес: Ленинский проспект, д. 4,
119991, г. Москва,
тел.: 8 (495) 955-00-13,
E-mail: nikulin@misis.ru

