



Акционерное общество
Государственный научный центр
Российской Федерации –
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. Лейпунского
(АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)

Бондаренко пл., д. 1, г. Обнинск Калужской обл., 249033
Телетайп: 183566 «Альфа». Факс: (484) 396 8225, (484) 395 8477
Телефон: (484) 399 8249 (приемная), (484) 399 8412 (канцелярия)
E-mail: postbox@ippe.ru, <http://www.ippe.ru>
ОГРН 1154025000590, ИНН 4025442583, КПП 402501001

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Крикун Екатерины Владимировны
“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

Наиболее опасным радиационным явлением при эксплуатации корпусов ВВЭР является радиационное охрупчивание. Имеющийся опыт позволяет прогнозировать его лишь для материалов и температур эксплуатации действующих реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 в интервале 270-290°С. Разработка новых перспективных водо-водяных реакторов разной мощности требует существенного расширения температурного диапазона эксплуатации корпусов, поиска подходящих материалов и понимания механизмов их охрупчивания при разных температурах облучения.

В представленной работе впервые проведены исследования изменения микроструктуры, фазового состава и радиационного охрупчивания стали 15X2НМФА класс 1 после ускоренного облучения в исследовательском реакторе ИР-8 в широком температурном диапазоне: при 50°С, 140°С, 300°С, 400°С. Для выявления склонности стали к тепловому охрупчиванию и оценке максимально возможного вклада неупрочняющего механизма охрупчивания, связанного с сегрегацией на границах зерен (ГЗ) фосфора проведена специальная ступенчатая провоцирующая охрупчивающая термообработка. Во всех случаях получены подробные количественные данные о составе, концентрации и размерах карбидов (типа Me_7C_3 на основе железа и хрома с добавками ванадия и молибдена и типа Me_2C на основе хрома и молибдена), карбонитридов типа $Me(C,N)$ на основе ванадия и молибдена, а также радиационно-индуцированных упрочняющих фаз (Ni-Mn-Si преципитатов). Получены также данные о концентрации и размерах дислокационных петель, сегрегации на ГЗ фосфора (% покрытия монослоем), доле хрупкого межзеренного разрушения, изменении предела текучести и сдвиге критической температуры хрупкости стали.

Достоверность экспериментальных данных обеспечивалась совместным использованием взаимно дополняющих друг друга современных методов исследования, таких как количественная оже-электронная спектроскопия (ОЭС), аналитические методы

просвечивающей (ПЭМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) и атомно-зондовой томографии (АЗТ), а также числом измерений, обеспечивающим необходимую статистику.

Следует отметить высокий уровень обзорной части диссертационной работы, содержащей подробное описание использованных в работе методик исследования с указанием их разрешающей способности и необходимой статистики измерений.

В целом, полученные в работе исчерпывающие данные о микроструктуре и фазовом составе, данные фрактографических исследований, а также результатов механических испытаний позволили провести подробный анализ механизмов охрупчивания стали 15Х2НМФА класс 1 в широком температурном диапазоне и обеспечили высокую степень достоверности и обоснованности сделанных автором выводов.

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.

В результате проведенного исследования получен ряд важных новых результатов:

- Создан и зарегистрирован в Роспатенте и применен в данной работе программный пакет «DiffraCalc» для расшифровки электронных дифракционных картин, позволяющий существенно ускорить и автоматизировать определение фазового состава широкого класса материалов, включая корпусные стали.

- В результате специальной провоцирующей охрупчивающей термообработки, обеспечивающей лишь неупрочняющий механизм охрупчивания, получено соотношение между увеличением содержания фосфора на ГЗ и сдвигом критической температуры хрупкости стали.

- Показано существенное изменение основных механизмов радиационного охрупчивания стали 15Х2НМФА класс 1 с изменением температуры ускоренного облучения и их взаимосвязь с изменениями микроструктуры и фазового состава.

- Показано, что при температурах облучения 50°C сдвиг критической температуры хрупкости стали является максимальным в рассмотренном температурном диапазоне и вызван только сильным упрочнением стали, связанным с образованием высокой плотности дислокационных петель.

- Облучение при температуре 140°C проведено при двух различных флюенсах, но и разных флаксах. Показано, что и в этих случаях сдвиг критической температуры хрупкости стали вызван упрочнением, связанным с образованием высокой плотности дислокационных петель. Радиационно-индуцированных фаз (Ni-Mn-Si преципитатов) и дополнительной зернограницной сегрегации фосфора не обнаружено.

- Показано, что радиационное охрупчивание стали в результате ускоренного облучения при рабочей температуре корпуса ВВЭР-1000 (300°C) обусловлено в основном действием упрочняющего механизма, связанного с образованием радиационно-индуцированных преципитатов и дислокационных петель, а также небольшим вкладом неупрочняющего механизма, связанного с образованием зернограницных сегрегаций фосфора. Однако общее изменение концентрации фосфора не достигает значений, характерных для образцов-свидетелей, облученных до близкого флюенса с меньшим флаксом.

- Проведенный фазовый анализ стали методами ПЭМ и РЭМ показал, что в отличие от облучения в интервале температур (50-300)°C, при 400°C в ней происходят карбидные превращения. При этом концентрации карбидов Me₇C₃ и Me₂C незначительно уменьшились по сравнению с исходным состоянием, а концентрация карбонитридов увеличилась в ~ 2,3

раза при уменьшении их размеров. Радиационно-индуцированных преципитатов и дислокационных петель не обнаружено. Кроме того, некоторый вклад в охрупчивание вносит и неупрочняющий механизм из-за увеличения уровня зернограницной сегрегации фосфора.

Нужно отметить, что полученные результаты дают также более полное понимание вклада отдельных механизмов в охрупчивание стали 15X2НМФА класс 1 и при температурах эксплуатации действующих реакторов ВВЭР-1000.

Вместе с тем по работе можно высказать следующие замечания:

1. На с. 24 на рисунке 1.2 показано «Влияние суммарного содержания фосфора и никеля на радиационное охрупчивание стали 15X2НМФА». По оси X стоит $\Delta C_{P\text{отн}} + \Delta C_{Ni\text{отн}}$, но эти обозначения не поясняются в тексте.

2. На с.39 в Таблице 2.3 – «Состояния, в которых были исследованы образцы стали 15X2НМФА класс 1» приведены температура, флюенс и флакс для проведенных ускоренных облучений. Полезно было бы для сравнения привести эти параметры и для нормальных условий эксплуатации стали в позициях образцов-свидетелей и внутренней поверхности корпуса.

3. На с.78 внизу говорится «...подвижность вакансий не настолько высока, чтобы обеспечить достаточный уровень рекомбинации, и потому концентрация точечных дефектов при среднетемпературном облучении превышает термически равновесную». Но скорость рекомбинации точечных дефектов под облучением пропорциональна сумме коэффициентов диффузии вакансий и междоузельных атомов, а последний на порядки величины выше, поэтому подвижность вакансий не влияет на рекомбинацию.

Сделанные выше замечания не ухудшают общей высокой оценки диссертационной работы. Актуальность темы диссертации, использование нескольких взаимно дополняющих друг друга экспериментальных методик, большой объем выполненной диссертантом работы, новизна и практическая ценность полученных результатов позволяют сделать вывод о том, что диссертация соответствует пункту 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор обладает высокой квалификацией и достоин присуждения искомой степени по специальности 05.14.03 – ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Печенкин Валерий Александрович,
к.ф.-м.н., снс, начальник лаборатории АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»
Служебный телефон: (484)3998019,
e-mail: var@ippe.ru



Подпись В.А. Печенкина заверяю:
Заместитель генерального директора АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»
по науке и инновационной деятельности



Н.Г. Айрапетова