

7. Берела А.И., Былкин Б.К. Проблемно-ориентированная система проектирования технологии демонтажа оборудования при выводе из эксплуатации блоков АЭС. — Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 3, с. 189—196.
8. Берела А.И., Былкин Б.К., Шапошников В.А. Оптимизационные аспекты проектирования технологического процесса демонтажа оборудования при выводе из

эксплуатации блоков атомных станций. — Тяж. машиностроение, 2004, № 6, с. 9—14.

9. Черников О.Г., Шапошников В.А., Тихоновский В.Л., Былкин Б.К. Опыт разработки базы данных для вывода из эксплуатации блоков Ленинградской АС. — Журн. Росэнергоатома, 2005, № 9, с. 30—31.

Поступила в Редакцию 16.12.2010

УДК 621.039.531

ПОСЛЕРЕАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТВС И КАНАЛА СУЗ РЕАКТОРА ПЕРВОЙ В МИРЕ АЭС

*Иванов С.Н., Дворяшин А.М., Попов В.В., Поролло С.И., Шулепин С.В.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск)*

За 48-летний период эксплуатации первой в мире Обнинской АЭС с реактором АМ было облучено более 1500 технологических каналов (ТВС). Удачный выбор конструкции твэла и ТВС позволил обеспечить надежную эксплуатацию активной зоны реактора в течение всего срока работы. Тем не менее в отдельные периоды эксплуатации происходила разгерметизация ТВС и каналов СУЗ. Для определения характера и причин разрушения были проведены послереакторные материаловедческие исследования твэлов и трубок дефектных каналов. Часть результатов исследований, полученных методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа, была опубликована ранее [1].

В настоящей статье приводятся результаты послереакторных исследований конструктивных элементов ТВС и канала СУЗ реактора АМ и анализируются причины их разрушения.

Конструкция и условия облучения каналов. Технологический канал реактора АМ состоял из соединенных между собой графитовых втулок, в которых располагались центральная трубка диаметром 15 мм и четыре кольцевых твэла, в верхней и нижней частях соединенных с периферийными трубками из стали 08X18H10T диаметром 9,4 мм [2]. Каждая трубка в нижней части канала имела спиральные компенсаторы температурного удлинения. Вода по центральной трубке опускалась вниз, отводя тепло от графита, к нижней распределительной головке, из которой по четырем периферийным трубкам поднималась вверх и отводила тепло от внутренней поверхности твэлов.

Твэлы имели две коаксиально расположенные цилиндрические оболочки из коррозионно-стойкой стали 1X18H9T. Между ними располагалась дисперсионная топливная композиция из топливной крупки, диспергированной в магнелиевую матрицу. В твэлах серии Д в качестве топливной крупки использовался сплав U—9%Mo (ОМ-9), в твэлах серий Ж и 010 — диоксид урана. Длина активной части твэлов составляла 1700 мм, общая длина 1885 мм, внешний диаметр и толщина наружной оболочки твэлов — 14 и 0,2 мм, внутренней — 9 и 0,4 мм соответственно.

Твэлы во время облучения охлаждались водой под давлением 10 МПа, при этом температура теплоносителя на входе в канал составляла 150—190 °С, на выходе — 210—280 °С. Температура наружной оболочки твэлов не превышала 310 °С. Внешняя поверхность наружной оболочки находилась в среде азота графитового канала.

Канал СУЗ состоял из графитовых втулок, в которых располагались центральная трубка диаметром 32,5 мм со стержнем СУЗ и четыре периферийные охлаждающие трубки из стали 12X18H10T диаметром 9,4 мм, толщиной стенки 0,6 мм. Внутренняя поверхность трубок канала СУЗ охлаждалась водой температурой 40 ± 5 °С при давлении 0,5 МПа, внешняя находилась в газовой среде реактора.

Условия облучения ТВС и канала СУЗ, исследованных в горячей лаборатории ФЭИ с 1987 по 1998 г., приведены в таблице.

Методики исследования. Наружный диаметр твэлов измеряли в двух взаимно-перпен-

Условия облучения исследованных ТВС и канала СУЗ реактора АМ

Номер канала	Период работы	Продолжительность работы, эф. сут	Среднее выгорание, МВт·сут/кг	Флюенс быстрых нейтронов, 10^{24} м^{-2}	Дефектные элементы канала (местоположение разрушения)
Д-85	Октябрь 1979—март 1987	539,7	24,91	7,9	Дефектов нет
Д-117	Январь 1981—апрель 1987	433	23,22	7,4	Четыре твэла (0—400 мм от низа твэлов)
Ж-37	Сентябрь 1983—июль 1987	253,3	—	8,8	Центральная трубка (270—340 мм от низа активной зоны)
Ж-42	Август 1984—август 1987	197,1	13,74	1,9	Один твэл (110—125 мм от низа твэла)
Ж-52	Октябрь 1984—август 1987	154,7	14,9	1,5	Один твэл (1560—1590 мм от низа твэла)
Ж-72	Февраль 1986—август 1987	56,4	5,39	0,06	Один твэл (1630—1640 мм от низа твэла)
010208	Июль 1993—апрель 1998	308	28,3	4,5	Четыре твэла (5—120 мм от низа твэлов)
010275	Октябрь 1997—декабрь 1998	65,5	—	0,28	Две трубки (170 мм ниже активной зоны)
Канал СУЗ	Май 1987—сентябрь 1998	732	—	20	Одна охлаждающая трубка (5—150 мм от низа активной зоны)

дикулярных направлениях на профилометре с погрешностью $\pm 0,02$ мм. Вид дефекта и его местоположение определяли внешним осмотром дефектного канала на приборе для макросъемки УМСД-2. Характер повреждения и его глубину устанавливали металлографическим методом. Микроструктуру материала оболочек твэлов и трубок исследовали на микроскопах МИМ-15 и ММР-4.

Методом сканирующей электронной микроскопии исследовали дефектные поверхности изделий и характер их разрушения (фрактография). Перед проведением исследований с изучаемой поверхности удаляли отложения и очищали химическими методами. Исследование проводили на сканирующей приставке ASID-4D электронного микроскопа JEM-100CX (Япония), оборудованного рентгеновским энергодисперсионным микроанализатором KEVEX (США).

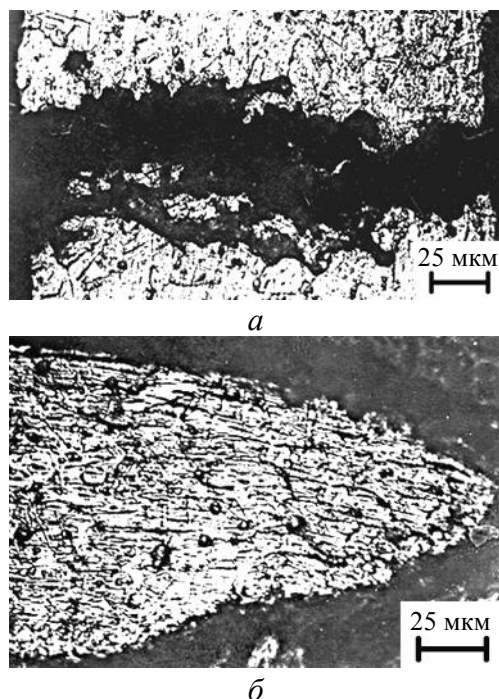
Методом рентгеновского микроанализа исследовали состав и распределение продуктов коррозии на поверхностях оболочек твэлов и трубок. Исследования проводили на рентгеновском микроанализаторе CAMEBAX-R (Франция) и энергодисперсионной приставке KEVEX. Анализ включал в себя качественное определение химических элементов (с атомным номером выше 8) в исследуемой точке по спектрограм-

мам, а также распределение концентрации элементов по поверхности образца или его шлифа.

Механические испытания кольцевых образцов оболочек твэла на растяжение были выполнены на дистанционной разрывной машине МД-2Т со скоростью перемещения активного захвата 1 мм/мин при 25 и 300 °С. При каждой температуре были испытаны по 3—4 кольцевых образца. В результате испытаний были определены предел прочности (σ_b), текучести ($\sigma_{0,2}$), общее (δ_o) и равномерное относительное удлинение (δ_p).

Измерение диаметра твэлов. При измерении было установлено увеличение диаметра герметичных твэлов серии Д по всей длине, которое достигало 0,9—1,25% в их средней части. Измерение показало, что изменение диаметра четырех дефектных твэлов серии Ж не зависело от выгорания топлива и не выходило за пределы технологического допуска на изготовление оболочечных труб, равного $\pm 0,05$ мм. В зоне вздутия оболочки относительное увеличение диаметра твэлов составило 2—3,5%.

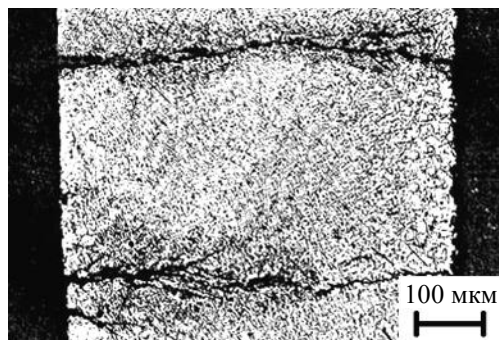
Внешний осмотр и металлографические исследования. Исследованиями установлены следующие особенности разрушения ТВС и канала СУЗ.



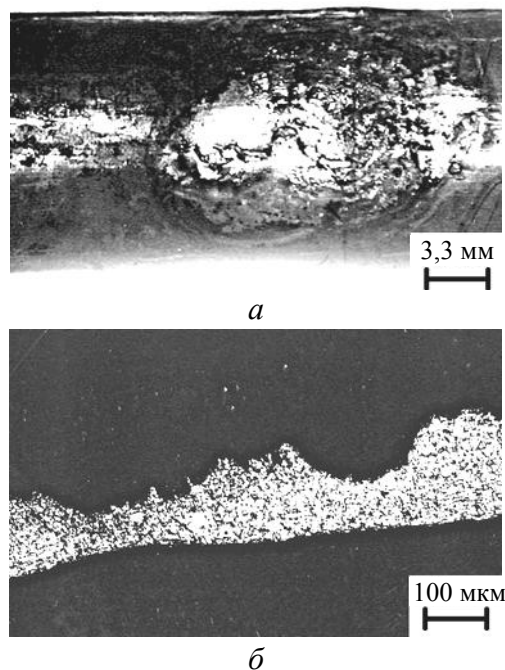
Р и с. 1. Транскристаллитная хрупкая трещина (а) и пластичное разрушение с образованием шейки (б) наружной оболочки твэла ТВС серии Д

При визуальном осмотре ТВС Д-117 обнаружены разрушение и вздутие твэлов, при этом части оболочки и топлива в месте разрушения не было. С внешней стороны наружной оболочки наблюдались многочисленные продольные транскристаллитные хрупкие трещины (рис. 1, а) длиной 10—100 мм, язвы и участки с фронтальной коррозией глубиной до 150 и 100 мкм соответственно, а также разрыв оболочки с образованием шейки и следами пластической деформации (рис. 1, б).

Разгерметизация канала ТВС Ж-37 произошла в результате разрушения центральной трубки на участке длиной ~70 мм из-за образования с ее внешней стороны сквозных продольных транскристаллитных хрупких трещин (рис. 2).



Р и с. 2. Микроструктура материала стенки центральной трубки канала ТВС Ж-37 в зоне разрушения



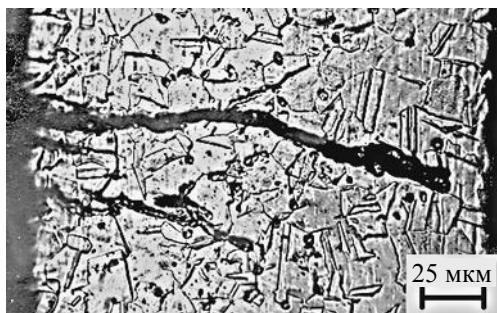
Р и с. 3. Внешний вид дефектного участка твэла (а) и очаги коррозионного повреждения с внешней стороны наружной оболочки твэла в зоне разрушения (б) ТВС серии Ж

На внешней оболочке твэла ТВС Ж-42 обнаружены сквозная извилистая трещина длиной 15 мм с вздутием оболочки (рис. 3, а), коррозионные очаги глубиной до 140 мкм, состоящие из скоплений язв (рис. 3, б), несквозные транскристаллитные трещины, а также разрыв оболочки с образованием шейки.

На внешней оболочке твэла ТВС Ж-52 на участке длиной 30 мм наблюдались многочисленные продольные транскристаллитные хрупкие трещины длиной 0,5—7 мм и вздутия оболочки в местах сквозных трещин (рис. 4, а). Общее число трещин в одном сечении оболочки твэла достигало 30, многие из них оказались сквозными.

На внешней оболочке твэла ТВС Ж-72 на участке длиной 10 мм обнаружены несколько сквозных продольных транскристаллитных трещин длиной 1—3 мм и два вздутия оболочки, а также язвы в форме цилиндра глубиной до 90 мкм (рис. 4, б) и участки с межкристаллитной коррозией глубиной 15 мкм.

В нижней части твэлов ТВС 010208 обнаружены разрушения и вздутия с частичным отсутствием внешней оболочки и топлива (рис. 5, а). С внешней стороны наружной оболочки в зоне разрушения наблюдались продольные транскристаллитные трещины (рис. 5, б) длиной 4—20 мм, в том числе и сквозные, язвы



а



б

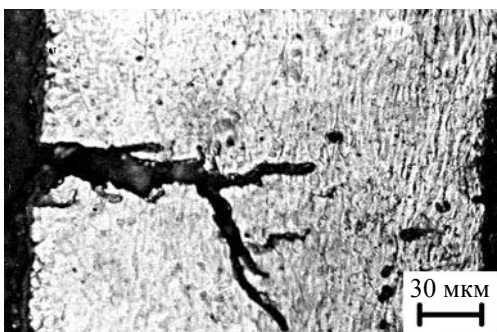
Р и с. 4. Транскристаллитные хрупкие трещины (а) и язвы цилиндрической формы (б) с внешней стороны наружной оболочки твэлов ТВС серии Ж в зоне разрушения

и участки с межкристаллитной коррозией глубиной до 15 и 8 мкм соответственно, а также разрыв оболочки с образованием шейки.

Разгерметизация канала ТВС 010275 произошла в результате образования на двух трубках-компенсаторах сквозных трещин длиной

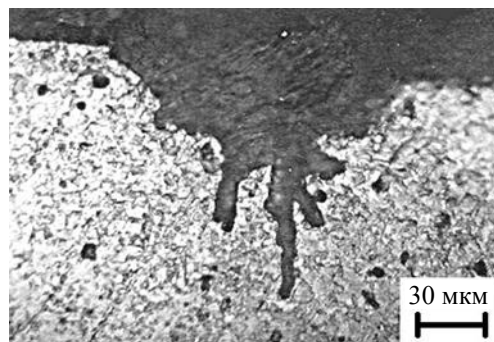


а



б

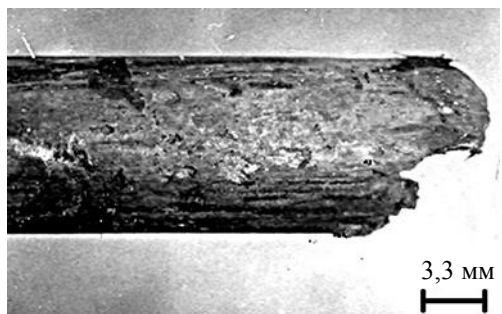
Р и с. 5. Внешний вид дефектного участка твэла (а) и микроструктура материала наружной оболочки твэла в зоне разрушения (б) ТВС серии 010



Р и с. 6. Микроструктура материала трубки-компенсатора ТВС 010275 в зоне разрушения

8 мм, располагающихся в поперечном направлении и под углом 45° к образующей. Трещины находились на участке, расположенном на расстоянии 3 мм от сварного шва и 80 мм от верха спиральной части трубок. В поперечном сечении дефектного участка трубки с внешней стороны обнаружены транскристаллитные хрупкие трещины глубиной до 250 мкм, которые в отдельных случаях распространялись от язв (рис. 6).

Разгерметизация канала СУЗ произошла в результате поперечного разрыва охлаждающей трубки (рис. 7, а) и образования на ней сквозных поперечных трещин длиной до 15 мм. На участке 0—1500 мм от низа активной зоны на внешней стороне трубки наблюдались повреждения в

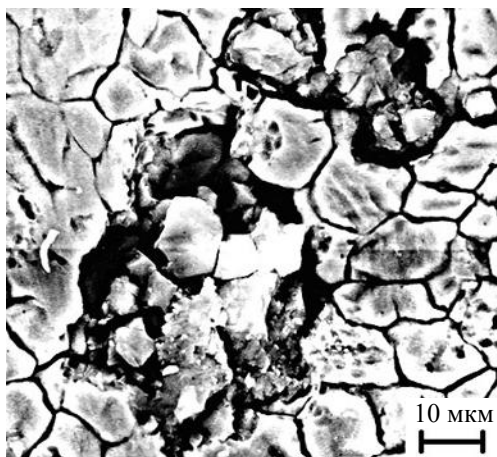


а



б

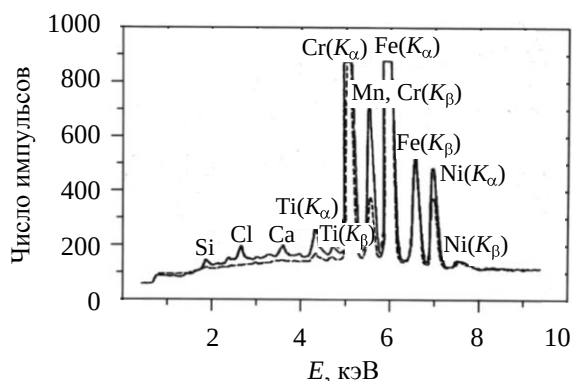
Р и с. 7. Внешний вид охлаждающей трубки канала СУЗ в месте разрыва (а) и микроструктура материала трубки в 50 мм от места разрыва (б)



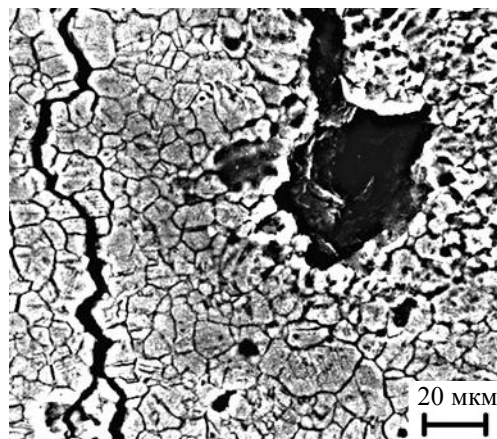
Р и с. 8. Микроструктура внешней поверхности наружной оболочки твэла ТВС Ж-72 в зоне разрушения

виде многочисленных язв и трещин длиной 0,5—5 мм различной ориентации. В поперечном сечении трубки вблизи сквозного разрыва на ее внешней поверхности обнаружены дефекты глубиной до 250—400 мкм в виде коррозионных очагов, язв в форме языка (рис. 7, б) и транскристаллитных трещин.

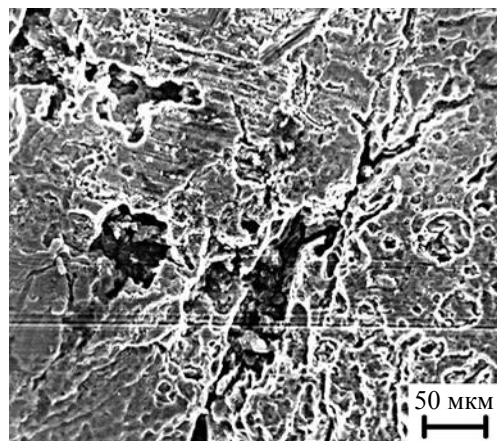
Исследования дефектных участков методом сканирующей электронной микроскопии. При исследовании образца из зоны разрушения твэла ТВС Ж-72 на внешней поверхности оболочки обнаружены сильная разрыхленность границ зерен, питтинговая (точечная) коррозия и язвы диаметром до 50 мкм, заполненные рыхлым налетом (рис. 8). Рентгеновским микроанализом установлено, что в язвах наряду с основными элементами материала оболочки присутствовали Cl, Ca и Si. Наличие этих элементов на поверхности оболочки вне язв не зафиксировано (рис. 9). Вдали от зоны разрушения на поверхности оболочки коррозионные повреждения отсутствовали.



Р и с. 9. Спектр рентгеновского излучения участков внутри коррозионной язвы (—) и наружной поверхности (---) внешней оболочки твэла ТВС Ж-72 в зоне разрушения



а



б

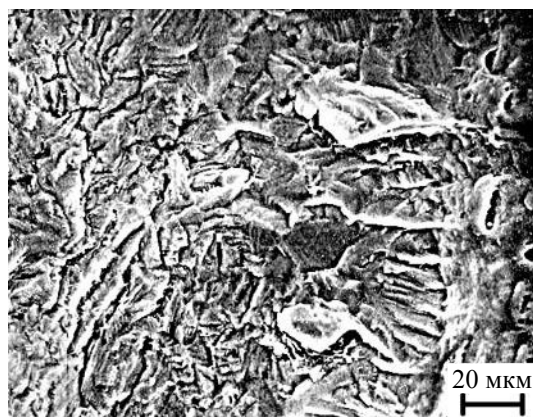
Р и с. 10. Дефекты на наружной поверхности внешней оболочки твэла ТВС 010208 (а) и охлаждающей трубки канала СУЗ (б)

При исследовании образца оболочки из зоны разрушения твэла канала ТВС 010208 на наружной поверхности наблюдалось сильное коррозионное воздействие среды, в результате которого произошло растравливание границ зерен вследствие межкристаллитной коррозии, образование мелких питтингов (ямок) размером до 10 мкм, крупных язв размером до 100 мкм и межзеренных трещин продольного направления (рис. 10, а).

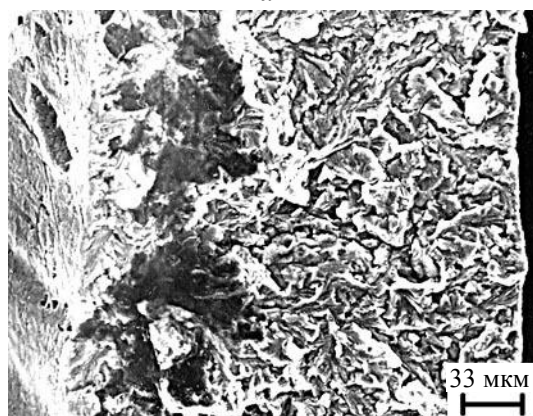
При исследовании образца из места разрыва охлаждающей трубки канала СУЗ на внешней поверхности обнаружено интенсивное локальное коррозионное повреждение в виде многочисленных питтингов, язв, раковин и канавок (рис. 10, б). Как правило, от язв размером 50—100 мкм в разных направлениях отходили канавки шириной 5—10 мкм и длиной до 100 мкм. Канавки от соседних язв сливались, образуя сплошную сеть. На внутренней поверхности трубки располагались глубокие лунки диамет-

ром до 30 мкм, которые являлись выходами на внутреннюю поверхность сквозных дефектов, начинающихся на внешней поверхности.

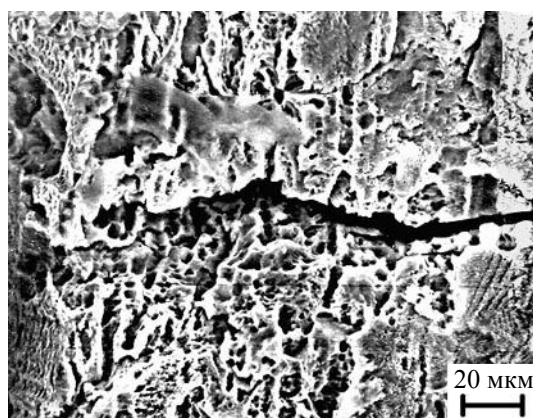
Фрактографические исследования. Фрактографический анализ сквозной трещины оболочки твэла ТВС Ж-72 показал, что морфологически поверхность излома состоит из транскристаллитных плоских фасеток скола (рис. 11, а). С внутренней стороны оболочки на поверхности излома проявляется ямочная структура, харак-



а



б



в

Р и с. 11. Фрактограмма сквозного разрушения (излом) внешней оболочки твэлов ТВС Ж-72 (а), 010208 (б) и стенки охлаждающей трубки канала СУЗ (в)

терная для вязкого разрушения (зона долома). Наблюдаемый рельеф поверхности излома является типичным для транскристаллитного коррозионного растрескивания в агрессивной среде [3].

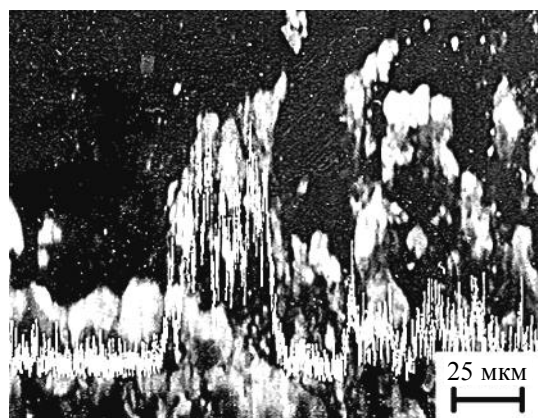
Сквозной излом наружной оболочки твэла ТВС 010208 состоял из двух характерных зон (рис. 11, б). С внешней стороны располагался узкий темный участок, покрытый слоем продуктов коррозии (зона интенсивной коррозии), с внутренней — широкий светлый, являющийся зоной долома. Долом был хрупким транскристаллитным и произошел, вероятней всего, по трещинам в оболочке. Его поверхность состояла в основном из гребней внутризеренного скола.

Поверхность разрушения охлаждающей трубки канала СУЗ имела две зоны: с наружной стороны трубки располагалась зона коррозионного повреждения, с внутренней — зона долома (рис. 11, в). Зона коррозии имела разрыхленную поверхность, состоящую из скоплений мелких язв, раковин и бороздок. В зоне долома наблюдались плоские поверхности скола, на которых видны ямки чашечного разрушения, что свидетельствовало о смешанном вязкохрупком характере излома.

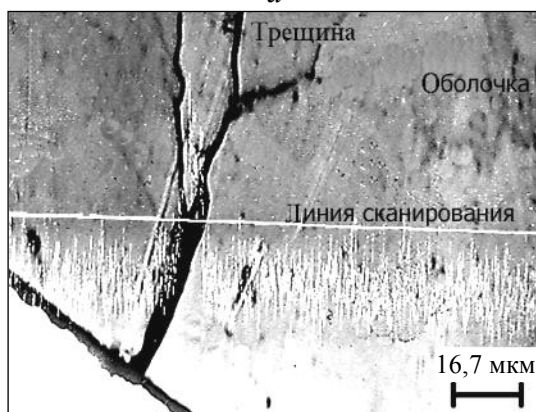
Рентгеновский микроанализ. На энергетическом спектре, снятом с наружной поверхности образца из зоны разрушения оболочки твэла ТВС Ж-42, кроме компонентов стали, обнаружены такие элементы, как Mg, Ca, Si и Cl. Сканограмма участков поверхности этого образца, выполненная в излучении ClK_{α} , свидетельствует о неравномерном распределении хлора, при этом его максимальное содержание наблюдалось в поверхностных язвах. В местах пересечения линии сканирования с этими язвами наблюдались пики на концентрационной кривой распределения хлора (рис. 12, а).

При исследовании шлифа из поперечного сечения этого же образца в язвах на внешней поверхности оболочки среди продуктов коррозии также обнаружен хлор. На шлифе оболочки твэла ТВС Ж-52 хлор обнаружен в сквозных трещинах, что хорошо видно из его распределения по поверхности шлифа: в месте пересечения линии сканирования с трещиной наблюдается пик на концентрационной кривой (рис. 12, б).

На наружной поверхности образца оболочки твэла ТВС 010208 наряду с компонентами стали обнаружено небольшое количество хлора



а



б

Р и с. 12. Концентрационные кривые распределения Cl K_α по наружной поверхности оболочки в зоне разрушения твэла ТВС Ж-42 (а) и по поперечному сечению оболочки твэла ТВС Ж-52 в зоне сквозной трещины (б)

и алюминия, причем хлор концентрировался преимущественно на дефектах поверхности (в трещинах и язвах).

Анализ элементов, находящихся в язвах на внешней поверхности образцов охлаждающей трубки канала СУЗ и трубки-компенсатора ТВС 010275, показал наличие алюминия и хлора. Алюминий имел высокую концентрацию и регистрировался на всей площади язвы, содержание хлора было близко к порогу чувствительности микроанализатора.

Механические свойства материала оболочки. Механические испытания проводили на кольцевых образцах внешней оболочки, вырезанных из средней части твэлов герметичной ТВС Д-85 и дефектной Ж-72. Испытаниями установлено, что материал внешней оболочки ТВС Д-85 имел высокие прочностные свойства и пластичность. Так, при комнатной температуре образцы имели следующие свойства: $\sigma_b = 1040 \pm 20$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1000 \pm 10$ МПа, $\delta_o =$

$= 22 \pm 1\%$, $\delta_p = 2,5 \pm 0,5\%$. При температуре испытаний 300°C наблюдалось снижение прочностных и пластических характеристик материала: $\sigma_b = 770 \pm 5$ МПа, $\sigma_{0,2} = 690 \pm 20$ МПа, $\delta_o = 1,8 \pm 0,5\%$, $\delta_p = 1 \pm 0,5\%$.

Материал внешней оболочки ТВС Ж-72 также обладал высокими прочностными свойствами и пластичностью. При комнатной температуре испытания образцы имели следующие свойства: $\sigma_b = 685\text{—}775$ МПа, $\sigma_{0,2} = 620\text{—}670$ МПа, $\delta_o = 5,5\text{—}22,5\%$, $\delta_p = 5,5\text{—}17,5\%$, при температуре испытаний 370°C — $\sigma_b = 430\text{—}535$ МПа, $\sigma_{0,2} = 410\text{—}490$ МПа, $\delta_o = 3\text{—}8\%$, $\delta_p = 0,8\text{—}5,5\%$. Следует отметить существенный разброс прочностных и особенно пластических свойств этих образцов. Это можно объяснить наличием в оболочке несквозных трещин, обнаруженных при металлографических исследованиях ТВС Ж-72.

Обсуждение результатов. На основании полученных результатов можно выделить следующие закономерности, являющиеся общими для разрушенных твэлов и трубок дефектных каналов:

все повреждения находились на внешней стороне наружной оболочки твэлов и трубок (со стороны контакта поверхности с газовой средой реактора). На поверхностях элементов, контактирующих с водным теплоносителем, дефекты не обнаружены;

твэлы и трубки разгерметизировались вследствие сквозного поражения наружной оболочки твэлов или стенки трубок транскристаллитными хрупкими трещинами и (или) очагами коррозии;

в зоне вздутия оболочка твэлов разрушалась в результате пластической деформации с образованием шейки. Эти дефекты являлись вторичными и образовались, вероятней всего, после сквозного разрушения твэла в результате взаимодействия влаги с магниевой матрицей, что приводило к увеличению объема топливной композиции, вздутию твэла и разрыву внешней оболочки;

разрушение твэлов не зависело от выгорания топлива, которое изменялось от 2,5 до 48,2 МВт-сут/кг. Трещины располагались преимущественно в верхней и нижней частях твэлов;

на наружной поверхности внешних оболочек твэлов и трубок в зоне разрушения обнаружен хлор, максимальная концентрация которого зафиксирована в трещинах и язвах.

Наблюдаемый характер разрушения позволяет предположить, что основным механизмом, приводящим к сквозному разрушению элементов активной зоны реактора АМ, являлось хлоридное коррозионное растрескивание под напряжением. Для его возникновения необходимо воздействие на сталь постоянных или периодических растягивающих напряжений в водной среде с хлоридами концентрацией выше некоторого порогового значения [4]. Поэтому для протекания хлоридного коррозионного растрескивания с внешней стороны оболочек твэлов и трубок необходимо наличие растягивающих напряжений, хлор-ионов и влаги.

Напряжения. В наружной оболочке твэлов с уран-молибденовым топливом тангенциальные растягивающие напряжения возникали во время облучения из-за деформации оболочки распухающим топливом. В оболочках твэлов с диоксидаураниевым топливом растягивающие напряжения появлялись уже при их изготовлении (при заливке топливной крупки магнием окружающая деформация внешней оболочки достигала 0,7%), при выходе реактора на мощность их уровень значительно возрастал. Растягивающие напряжения в трубках ТВС и каналов СУЗ возникали от внутреннего давления теплоносителя.

Остаточные напряжения в зоне сварного шва, который являлся дополнительным концентратором напряжений, обусловили, по всей видимости, поперечное растрескивание трубок-компенсаторов ТВС 010275.

Наличие поперечных трещин на охлаждающей трубке канала СУЗ может свидетельствовать о том, что, кроме статических напряжений от давления воды, трубка подвергалась воздействию циклических напряжений, возникающих при ее колебании из-за возможных пульсаций давления охлаждающей воды. Циклические напряжения при наличии хлор-ионов и влаги на поверхности трубки могли вызвать ее разрушение в результате коррозионной усталости.

Хлориды. Основным источником хлора, находящегося на дефектных поверхностях оболочек и трубок, вероятней всего, являлся водный теплоноситель, в котором содержалось

0,02—0,05 мг/л СГ. При разгерметизации водяного тракта реактора вода, попадая в активную зону, испарялась, содержащиеся в ней СГ адсорбировались на поверхности твэлов, трубок и в графитовой кладке, вызывая повышение в них концентрации хлоридов. Химический анализ показал, что в пробе воды, отобранной из дренажа кладки реактора после разгерметизации водяного контура, содержание хлоридов составляло 0,19 мг/л.

Влага. Влага на поверхности твэлов или трубок каналов реактора АМ могла появиться при разгерметизации водного тракта во время работы, а также стояночного режима в результате ее конденсирования из атмосферы реакторного зала (при стояночном режиме активная зона реактора находилась в воздушной атмосфере).

Кроме транскристаллитных трещин, обусловивших сквозное разрушение твэлов и трубок каналов реактора АМ, обнаружены многочисленные глубокие дефекты в виде питтингов, язв различной конфигурации и коррозионных очагов, причем последние образовались в результате слияния питтингов. Их образование вызвано питтинговой (точечной или язвенной) коррозией, сильным активатором которой, как и в случае коррозионного растрескивания, являлся хлор-ион [5].

Закключение. Исследованиями установлено, что выход из строя ТВС и канала СУЗ реактора АМ обусловлен разрушением наружной оболочки твэлов и трубок (центральной или периферийных) вследствие образования с внешней стороны сквозных транскристаллитных хрупких трещин и (или) очагов коррозии.

В зоне образования дефектов наблюдалась повышенная концентрация хлора. Наличие хлора в сочетании с растягивающими напряжениями, а также влаги, появляющейся на поверхности твэлов и трубок при разгерметизации водного тракта реактора или конденсирующейся из атмосферы воздуха во время его стояночного режима, вызвало разрушение материала внешней оболочки твэлов и трубок по механизму хлоридного коррозионного растрескивания под напряжением.

Помимо трещин, хлор, являясь сильным активатором питтинговой (язвенной) коррозии, вызывал образование глубоких коррозионных повреждений внешней оболочки твэлов и сквоз-

ное поражение трубок канала СУЗ. Основным источником хлора являлась вода, попадающая в активную зону реактора при разрушении трубок ТВС и каналов СУЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov S.N., Dvoriashin A.M., Shulepin S.V. et al. Application of scanning electron microscopy and X ray microanalysis for investigating pins of the world's first nuclear power plant. — In: Proc. of a Techn. Com. Meeting of Advanced Post-Irradiation Examination Techniques for Water Reactor Fuel. Dimitrovgrad, 14—18 May 2001. IAEA-TECDOC-1277, March 2002, p. 137—145.

2. Ушаков Г.Н. Первая атомная электростанция (опыт строительства и эксплуатации). М.—Л.: Гос. энергетич. изд-во, 1959, с. 17—19.
3. Энгем Л., Клингем Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение. Справочник. М.: Металлургия, 1986, с. 90—94.
4. Погодин В.П., Богоявленский В.Л., Сентюров В.П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющих сталей в водных средах. М.: Атомиздат, 1970.
5. Сокол И.Я., Ульянов Е.А., Фельдгандлер Э.Г. и др. Структура и коррозия металлов и сплавов. Атлас. Справочник. М.: Металлургия, 1989, с. 72—75.

Поступила в Редакцию 30.06.10

УДК 669.15'26'786

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В КОРПУСЕ ВВЭР-1000

*Сумин В.В., Васин Р.Н., Папушкин И.В., Балагуров А.М. (ОИЯИ, г. Дубна, Московская обл.),
Ведерников П.А., Свириденко Ю.В. (ОАО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, Московская обл.),
Вимпори Р., Шнайдер Р. (Центр по исследованию материалов и энергии им. Гельмгольца,
г. Берлин, Германия)*

Нейтронография высокого разрешения существенно расширяет возможности определения остаточных деформаций и напряжений в поликристаллических материалах. Сравнительно слабое поглощение нейтронов большинством конструкционных материалов позволяет измерять эпюры остаточных деформаций и напряжений в объеме изделий с линейным размером несколько сантиметров. При этом возможно определение полных тензоров деформаций и напряжений в заданных точках изделия [1].

В настоящее время созданы и успешно функционируют специализированные нейтронные дифрактометры для неразрушающего контроля остаточных напряжений. Первый отечественный нейтронный фурье-стресс-дифрактометр действует на импульсном реакторе ИБР-2 в ОИЯИ [2]. Он является корреляционным нейтронным спектрометром, в котором для получения необходимой высокой разрешающей способности используется быстрый фурье-прерыватель. При стандартных условиях эксперимента и близком к 90° угле рассеяния разрешение ФСД по межплоскостному расстоянию составляет $\Delta d/d \approx 0,004$ и почти не зависит от межплоскостного расстояния в широком интервале d_{hkl} . Это разрешение позволяет снизить погрешность определения остаточных напряжений в стали до 20 МПа.

Нейтронные дифракционные спектры фурье-дифрактометр регистрирует методом времени пролета, что позволяет одновременно измерять большое число (~ 10) пиков. Однако интенсивность отдельных пиков при этом сравнительно невелика. Напряжения на большой глубине следует определять с помощью стресс-дифрактометров, использующих монохроматические пучки нейтронов стационарного реактора.

Изготовление обечайки с последующим получением образцов для исследования остаточных напряжений включает следующие операции:

изготовление заготовки, включая выплавку, обработку давлением, механическую обработку и основную термическую обработку в соответствии с технологией изготовления корпуса ВВЭР;

наплавка антикоррозионного покрытия на внутреннюю поверхность;

термическая обработка для снятия остаточных напряжений;

разрезка и получение образцов.

Образцы для экспериментальных исследований остаточных напряжений вырезали из модельной обечайки активной зоны корпуса ВВЭР-1000. Эта обечайка была изготовлена в целях комплексного анализа основных физико-