

УДК 620.19.004.6+621.181.021

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЯ УЗЛА ПРИВАРКИ ГОРЯЧЕГО КОЛЛЕКТОРА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПЕРВОГО КОНТУРА К ПАТРУБКУ Ду 1200 ПАРОГЕНЕРАТОРОВ 5-го БЛОКА НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС

*Поваров В.П. (Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж),
Бакиров М.Б. (ЦМиР, г. Люберцы, Московская обл.)*

Безопасность эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 зависит от надежности оборудования и его отдельных элементов. Анализ эксплуатации основного оборудования первого контура показывает, что одним из наиболее критических элементов является узел приварки горячего коллектора теплоносителя к патрубку Ду 1200 парогенератора ПГВ-1000М — зона сварного соединения 111 (рис. 1). В этой зоне на различных энергоблоках АЭС с 1998 г. регулярно обнаруживаются эксплуатационные трещины, в том числе сквозные.

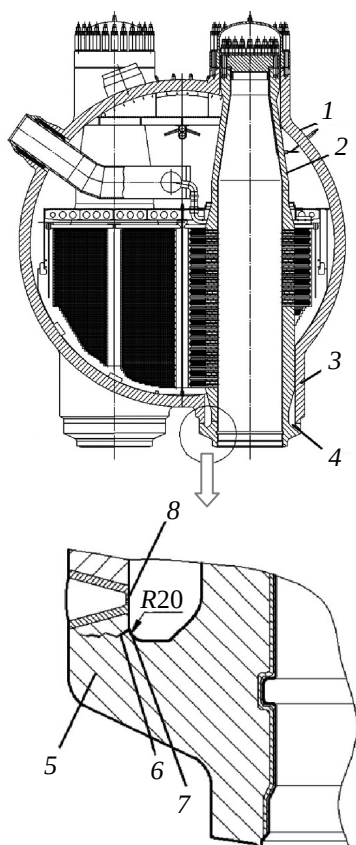
Анализ эксплуатации парогенераторов 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС показывает, что дефекты располагались в основном металле

по радиусу перехода кольцевого зазора металла сварного соединения 111 [1]. Закономерностей в периодичности и местах образования и развития дефектов за эти годы не выявлено. В 2013—2014 гг. на двух парогенераторах дефекты появились повторно в местах уже проведенного ремонта. Такая повреждаемость в ремонтных зонах может свидетельствовать о неблагоприятных условиях эксплуатации с точки зрения напряженного и коррозионного состояния основного металла и сварного соединения, включая влияние остаточных напряжений.

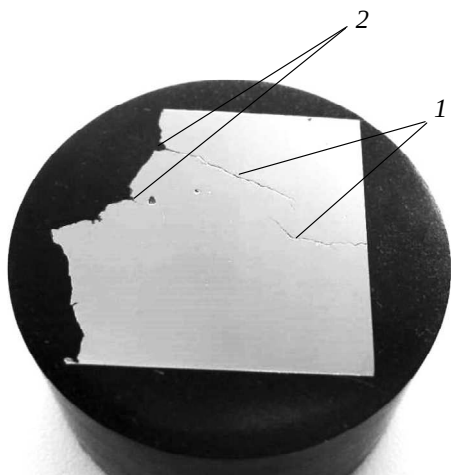
При ремонте дефектных зон в целях определения причин их образования вырезаются темплеты металла с трещинами. Установлено, что во всех случаях трещины зарождаются с внутренней поверхности основного металла коллектора в районе галтельного перехода R20 кольцевого зазора. По результатам ультразвукового контроля сварного соединения 111 на втором парогенераторе в 2014 г. были обнаружены превышающие браковочный уровень несплошности протяженностью ~110 мм, глубиной залегания 15 мм и условной высотой 57 мм в зоне, подвергавшейся ремонту с применением сварки в 2007 г. Второй парогенератор был введен в эксплуатацию в сентябре 1989 г. Срок службы до обнаружения этого дефекта составил 17 лет. Следует отметить, что ультразвуковой контроль, проведенный в 2013 г., дефектов в этой зоне не выявил.

Как показали исследования, начало обнаруженных трещин раскрытием 0,5—0,7 мм находится на внутренней поверхности на расстоянии 6—8 мм от нижней образующей кольцевого зазора. Вся внутренняя поверхность покрыта рыхлым слоем легко снимаемых отложений черного цвета. Под отложениями обнаружены коррозионные язвы глубиной до 1,5 мм (рис. 2).

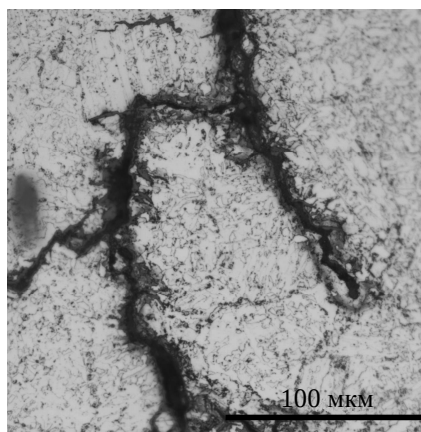
При анализе микрошлифов выявлены вторичные трещины (сателлиты) различной ориентации относительно магистральной (рис. 3). В плоскость шлифов выходят трещины, берущие начало в объеме металла.



Р и с. 1. Парогенератор ПГВ-1000М и критический элемент узла приварки коллектора теплоносителя первого контура к патрубку Ду 1200: 1 — корпус парогенератора; 2 — коллектор; 3 — патрубок Ду 1200; 4 — кольцевой зазор; 5 — переходное кольцо; 6 — трещина; 7 — галтель; 8 — сварное соединение 111



Р и с. 2. Темплет, вырезанный из зоны повреждения с эксплуатационными дефектами металла: 1 — трещина; 2 — коррозионные язвы



Р и с. 3. Микрошлиф с сателлитными микротрещинами различной пространственной ориентации

Металлографический анализ повреждения металла сварного соединения 111 показал, что доминирующей причиной разрушения является образование множественных трещин по механизму замедленного коррозионного растрескивания под напряжением. Это подтверждается морфологией трещин, их многоочаговым иницированием и распространением. Повреждения сварного соединения 111 связаны с совокупным действием следующих факторов: воздействие агрессивной коррозионной среды, приводящей к возникновению язв и способствующей дальнейшему развитию трещин от них, воздействие значительных растягивающих напряжений в зоне галтельного перехода и циклических эксплуатационных нагрузок, вызывающее распространение трещины вплоть до сквозного повреждения. Высокие напряжения в зоне повреждения обусловлены сочетанием эксплуатационных условий и конструктивных особенностей паро-

генератора и присоединительных трубопроводов главного циркуляционного контура.

В настоящее время однозначного ответа на вопрос о доминирующем факторе, приводящем к повреждению сварного соединения 111, нет. Несмотря на многообразие гипотез о причинах, ответственных за его повышенную эксплуатационную повреждаемость, большинство специалистов сходятся во мнении, что обязательным условием образования и развития трещин является наличие высоких растягивающих напряжений в зоне галтели кольцевого зазора на уровне предела текучести и выше. В таблице приведены профилактические меры, уменьшающие эксплуатационную повреждаемость сварного соединения 111.

Реализуемые в настоящее время профилактические меры в полной мере не устраняют проблему, что обуславливает необходимость использования новых подходов, в первую очередь, для анализа влияния эксплуатационных воздействий, в том числе непроектных нагрузок на кинетику повреждения зоны сварного соединения 111. Разработка и внедрение системы непрерывного расчетно-экспериментального контроля эксплуатационной повреждаемости наиболее нагруженных зон оборудования АЭС является одним из таких подходов.

Режимы эксплуатации, влияющие на нагруженность сварного соединения 111 парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000. Система мониторинга. Статическая и циклическая прочность парогенератора рассчитывается для режимов нормальных условий эксплуатации и нарушения нормальных условий эксплуатации.

Оценки показали, что условия статической и циклической прочности в этих режимах выполняются. В частности, наиболее повреждаемой зоной парогенератора при учете всех режимов является галтель R20 кольцевого зазора сварного соединения 111. Суммарная накопленная повреждаемость здесь достигает 0,25 за 60 лет работы, что значительно меньше единицы, следовательно, циклический ресурс данного узла должен быть обеспечен в течение всего назначенного срока эксплуатации. Таким образом, формально конструкция удовлетворяет требованиям норм расчета на прочность с обеспечением коэффициентов запаса, минимально гарантированных механических свойств металла, консервативного сценария циклического

Причины эксплуатационной повреждаемости парогенераторов 5-го энергоблока в зоне сварного соединения в 1998—2014 гг.

Причина повреждения	Профилактические меры
Неблагоприятный водно-химический режим	Замена гидразинно-аммиачного водно-химического режима второго контура АЭС на морфолиновый или этаноламиновый
Отложения оксидов меди и железа в кольцевом зазоре	Гидромеханическая очистка и химическая отмывка кольцевых зазоров, увеличение расхода продувочной воды, в том числе через кольцевой зазор, исключение медьсодержащего оборудования из второго контура АЭС путем замены оборудования конденсатно-питательного тракта
Непроектное термомеханическое воздействия на металл кольцевого зазора	Исключение заброса холодной воды в кольцевой зазор через линии периодической продувки парогенератора путем изменения процедуры открытия арматуры на линиях периодической продувки
Защемление опор парогенератора, приводящее к возникновению высоких растягивающих напряжений в сварном соединении приварки коллектора к патрубку	Исключение непроектных перемещений и защемлений опорных конструкций в целях устранения дополнительных нагружающих факторов
Вибрация корпуса парогенератора (длительная нагрузка с частотой 8—16 Гц от воздействия паропровода)	Профилактических мер не требуется
Периодические нагрузки при гидроиспытаниях и малоцикловой термомеханической нагрузке в проектных режимах	Профилактических мер не требуется
Водородное охрупчивание металла	Недостаточно исследовано
Электрохимическая коррозия металла	Разработка и внедрение технологии пассивации кольцевого зазора
Термомеханическое воздействие в различных режимах эксплуатации	Дополнительное воздушное охлаждение зоны приварки горячего коллектора к патрубку Ду 1200. Эффективность не доказана

нагружения в течение всего срока службы, включая аварийные нагрузки. Однако на практике отмечаются повреждения с образованием недопустимых дефектов до окончания проектного срока службы. Это связано с тем, что при расчете в полной мере не используются фактические эксплуатационные нагрузки, которые могут для данного узла значительно отличаться от проектных. Поэтому для расчета повреждаемости необходимо использовать фактическую термосиловую нагруженность на всех этапах эксплуатации энергоблока. Такой расчетно-экспериментальный метод исследования является перспективным подходом к обоснованию остаточного ресурса конструкции в сложных условиях эксплуатационного нагружения. По экспериментальным результатам также верифицируют расчетную методику, что позволяет значительно повысить достоверность напряженно-деформированного состояния конструкции. Предложенный новый подход заключается в непрерывном контроле наиболее нагруженных зон элементов оборудования путем установки контрольных датчиков давления, температуры, перемещения и деформации элементов конст-

рукции. Данные непрерывно записываются в электронную базу с возможностью удаленного доступа к ней для экспресс-обработки и анализа. Датчики, расположенные в контрольных зонах, объединяются в единую систему непрерывного мониторинга технического состояния, которая, в свою очередь, объединяется с расчетной численной моделью исследуемого объекта. В итоге состояние объекта оценивается не только с помощью датчиков в зонах их установки, число которых всегда ограничено, но и по результатам оперативного расчета, что позволяет определить повреждаемость в любой точке конструкции [2]. Это особенно важно, так как датчики зачастую невозможно установить внутри конструкции в зонах наибольшего повреждения.

Такой расчетно-экспериментальный подход на основе непрерывного контроля технического состояния ответственного оборудования энергоблока в сочетании с методами компьютерного моделирования и численного расчета напряженно-деформированного состояния всей конструкции имеет следующие преимущества:

наблюдение за конструкцией в режиме реального времени;

всесторонний учет и анализ нагружающих факторов;

учет реального расположения имеющихся или образовавшихся за время наблюдения дефектов;

верификация расчетной модели;

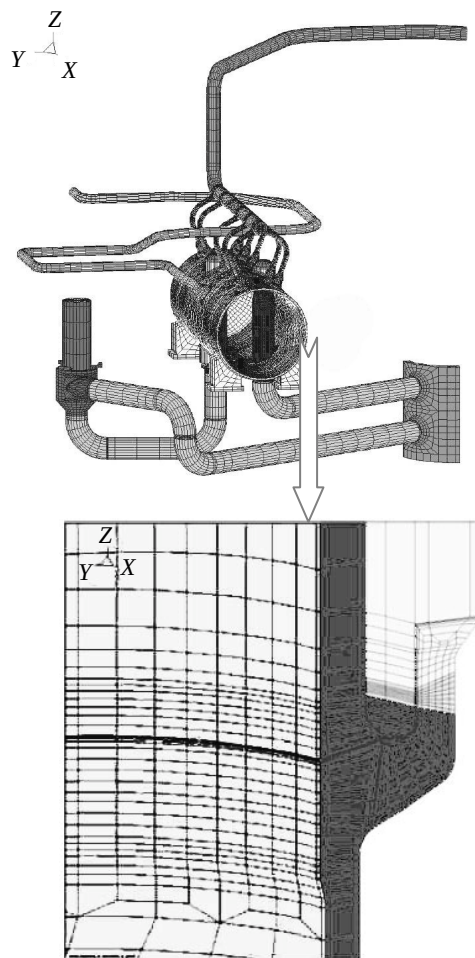
анализ воздействия каждого нагружающего фактора в отдельности;

обнаружение непроектных воздействий;

установление взаимосвязи между развитием дефекта и параметрами режимов эксплуатации.

Разработанная на базе изложенных принципов система непрерывного расчетно-экспериментального контроля эксплуатационной повреждаемости сварного соединения 111 четвертого парогенератора 5-го энергоблока находится в опытной эксплуатации с 2011 г. Система включает в себя датчики контроля термосиловой нагруженности — термодпары, тензорезисторы, датчики перемещений. Дополнительно к контрольным датчикам термосиловой нагруженности система мониторинга укомплектована датчиками акустико-эмиссионного и ультразвукового контроля для оценки момента зарождения и кинетики развития эксплуатационных дефектов в течение всей топливной кампании [3, 4]. Измерительная часть системы соединяется с электронным модулем сбора и первичной обработки экспериментальных данных. Расчетный модуль выполнен на базе программного средства UZOR-1.0 [5]. Трехмерная модель объекта мониторинга включает в полном объеме циркуляционную петлю парогенератора со всеми присоединительными трубопроводами — главный циркуляционный трубопровод, паропровод, трубопровод питательной воды (рис. 4). Отличительная особенность заключается в том, что расчетный модуль имеет возможность итерационной валидации данных на базе измеренных контрольными датчиками термосиловой нагруженности, установленными в наиболее показательных зонах конструкции.

Сбор и анализ данных мониторинга осуществлялся в режиме реального времени в течение трех топливных кампаний. По результатам расчетно-экспериментального анализа термосиловой нагруженности парогенераторов были выявлены непроектные режимы, приводящие к значимой эксплуатационной повреждаемости металла сварного соединения 111. Так, в зоне сварного соединения 111 в определенных режи-

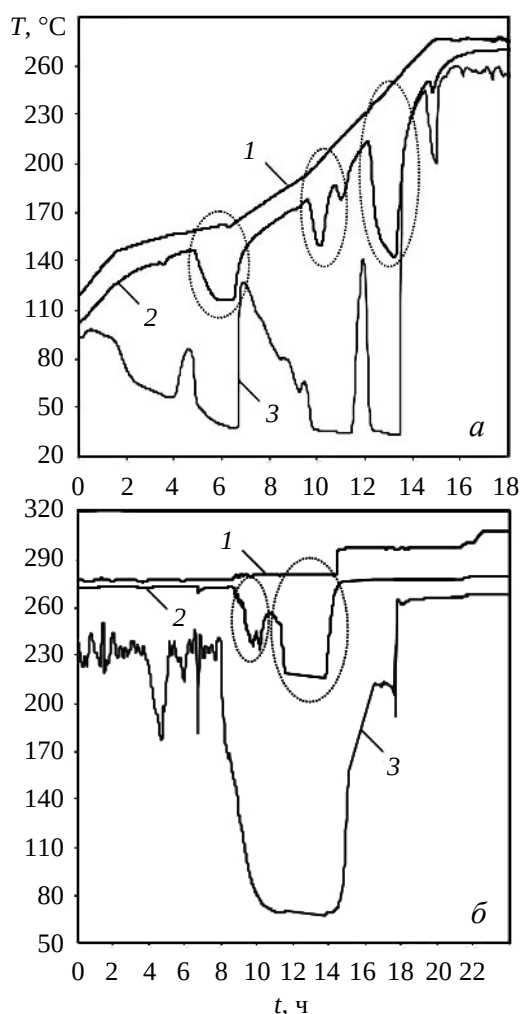


Р и с. 4. Расчетная модель четвертой петли и зоны сварного соединения 111 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС

мах работы происходит значительное изменение температуры (термошок), которое совпадает с резким уменьшением температуры трубопроводов продувки Ду 20 кольцевого зазора. Одновременно наблюдается существенное снижение температуры на наружной поверхности сварного шва (рис. 5).

В некоторых случаях нестационарные температурные процессы в зоне сварного соединения 111 приводили к снижению температуры на его внешней поверхности более чем на 70 °С (максимум до 100 °С) со скоростью до 200 °С/ч и выше. Следует отметить, что в период температурных аномалий зафиксирован высокий уровень деформаций во всех контрольных зонах тензорезисторами, установленными снаружи на поверхности сварного шва. Это свидетельствует о наличии в зоне сварного соединения 111 дополнительных нестационарных термических нагрузок высокой интенсивности.

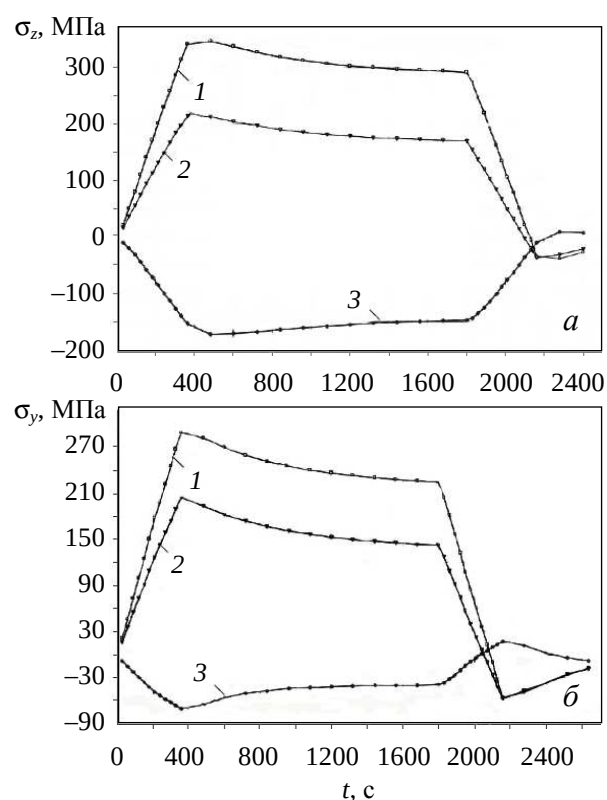
Исследованиями установлено, что изменение температуры на внешней стороне патрубка



Р и с. 5. Температурные аномалии при разогреве до горячего состояния (а) и повышении мощности в горячем состоянии (б): 1 — температура горячей нитки главного циркуляционного трубопровода; 2 — минимальная температура сварного соединения 111; 3 — температура трубопровода продувки кольцевого зазора (области температурных аномалий обведены)

Ду 1200 обусловлено поступлением охлажденной воды во внутреннюю полость кольцевого зазора по трубопроводам периодической продувки парогенератора [6]. При этом скорость охлаждения внутри кольцевого зазора неизвестна, поскольку ее измерение невозможно. Расчетным путем были определены режимы охлаждения внутренней полости кольцевого зазора, при которых скорость и диапазон изменения температуры снаружи патрубка парогенератора в зоне сварного соединения соответствовали измеренным [7].

Расчетно-экспериментальный анализ напряжений в зоне сварного соединения 111 для варианта с максимальной скоростью охлаждения кольцевого зазора при протекании температур-



Р и с. 6. Осевые (а) и кольцевые напряжения (б) при температурной аномалии на внутренней поверхности галтели кольцевого зазора (1), внутренней (2), внешней поверхности (3) сварного соединения 111 по центру шва

ной аномалии показан на рис. 6. Температура водной среды в кольцевом зазоре снижалась с 276 до 206 $^{\circ}\text{C}$ со скоростью 660 $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. Это соответствует скорости охлаждения наружной поверхности патрубка 210 $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$, измеренной датчиками контроля.

Расчеты напряженно-деформированного состояния кольцевого зазора четвертого парогенератора 5-го энергоблока при воздействии температурных аномалий, протекающих с разной скоростью изменения температуры, показали:

зона максимальной концентрации напряжений возникает на галтели кольцевого зазора и совпадает с зоной зарождения и роста эксплуатационных дефектов, приводящих к повреждениям в зоне сварного соединения 111, и является одним из факторов, способствующих разрушению при эксплуатации;

напряжения в галтели кольцевого зазора коллектора при высокой скорости протекания аномалий могут превышать предел текучести материала и приводить к образованию и накоплению в этой зоне значительных пластических деформаций.

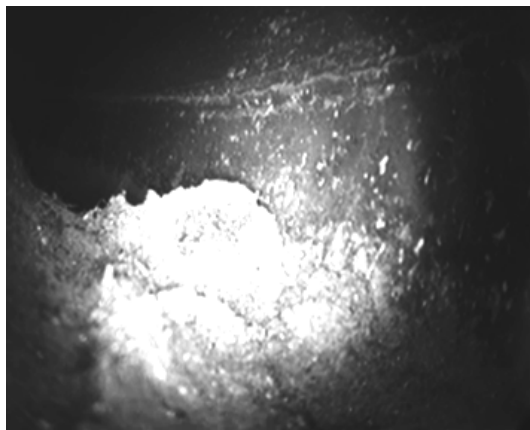
Напряжения в зоне галтели кольцевого зазора коллектора при выявленных непроектных воздействиях сопоставимы с напряжениями от давления при гидроиспытаниях второго контура на прочность, однако число повторений термошоков может быть значительно больше числа гидроиспытаний.

Таким образом, непроектные температурные воздействия приводят к повышенным деформационным нагрузкам на металл в зоне сварного соединения 111. Непрерывным контролем установлено, что периодические термоудары различной интенсивности (термошоки) происходят в различных режимах эксплуатации реакторной установки (гидроиспытания, разогрев, горячее состояние, повышение мощности, расхолаживание). При большой толщине обечайки и в условиях стесненности деформаций это может явиться одной из причин образования и развития дефектов во времени.

Непроектные температурные воздействия возникают вследствие заброса остывшей продувочной воды в полость кольцевого зазора через линии периодической продувки парогенератора. Для исключения данного фактора на Нововоронежской АЭС была введена дополнительная ревизия арматуры на всех линиях продувки и внесены изменения в технологическую инструкцию по эксплуатации системы продувки парогенератора.

Влияние водно-химического режима и коррозионных отложений на эксплуатационную повреждаемость сварного соединения 111 [8]. С 2011 г. на 5-м энергоблоке внедряется этаноламиновый водно-химический режим второго контура. Критерием химической промывки является удельное загрязнение трубного пучка 100 г/м^2 и более, определяемое по результатам коррозионного состояния парогенератора. Анализ показал, что примерно после 7 лет эксплуатации парогенераторов ВВЭР-1000 в зоне сварного соединения 111 могут зарождаться и развиваться трещиноподобные дефекты. Одной из причин появления таких дефектов является наличие отложений оксидов меди и железа в кольцевом зазоре парогенератора.

После вырезки темплета из узла приварки горячего коллектора к патрубку Ду 1200 в период планового ремонта 2013 г. из кольцевого зазора были взяты пробы отложений и определен их химический состав. В кольцевом зазоре об-



Р и с. 7. Полость кольцевого зазора горячего коллектора первого парогенератора

наружен рыхлый шлам, по химическому составу соответствующий составу отложений на теплообменной поверхности трубчатки парогенератора (рис. 7). Количество отложений, удаленных из кольцевого зазора горячего коллектора первого парогенератора в районе вырезки темплета, составило 4,5 кг. Их химический состав при pH водной вытяжки 6,3, % по массе: Fe_2O_3 85,2, CuO 3,1, SiO_2 2,9, $\text{CaO} + \text{MgO}$ 2,2, Cl 0,04, SO_4 0,092, Na 0,056.

Накопление продуктов коррозии приводит к увеличению концентрации коррозионно-активных элементов, в частности, меди в зоне разрушения. На внутренней поверхности кольцевого зазора горячего коллектора пятого парогенератора обнаружены коррозионные язвы диаметром до 6 мм и глубиной до 1 мм. Исследования [9] показали, что при совокупном влиянии напряжений, коррозионной среды и температуры низколегированная сталь проявляет склонность к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию с потерей пластичности. Это было учтено при расчетной оценке повреждаемости зоны сварного соединения 111 при воздействии 1000 циклов температурных аномалий с максимальной скоростью изменения температуры, исходя из измеренной. При расчете циклической прочности с заданием проектной пластичности металла при рабочей температуре (относительное сужение 50%) суммарное накопленное повреждение от 1000 циклов составило 0,12, при учете снижения пластичности материала (относительное сужение 10%) — 0,53. Также установлено, что при испытании образцов на растяжение в условиях контакта рабочей поверхности со шламом 75% Fe_2O_3 + 25% CuO

наблюдалось квазихрупкое разрушение образцов по механизму замедленного деформационного коррозионного растрескивания. При содержании в шламе менее 10% CuO отмечалось вязкое разрушение образцов, замедленное деформационное коррозионное растрескивание не наблюдалось. Испытания со шламом на компактных образцах толщиной 20 мм с начальной усталостной трещиной при постоянной нагрузке, не вызывающей текучести в металле, показали отсутствие подроста трещин [9]. На основании этих результатов можно сделать вывод, что при концентрации оксида меди в отложениях менее 10% условий для проявления склонности стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию нет. При уровне растягивающих напряжений в металле ниже предела текучести даже при наличии избыточной концентрации оксида меди замедленное деформационное коррозионное растрескивание не должно происходить.

В настоящее время оптимальным методом предотвращения коррозионного износа теплообменных труб и удаления шламовых отложений из кольцевого зазора парогенератора является периодическая химическая промывка со стороны второго контура. Химическая промывка парогенераторов 5-го энергоблока проводилась с 1997 г. в соответствии с нормативными документами с периодичностью 1 раз в 4 года. Кольцевые зазоры промывали одновременно с трубным пучком.

Таким образом, чистоте кольцевых зазоров в зоне сварного соединения 111 должно уделяться повышенное внимание, что обуславливает необходимость модернизации системы периодической продувки, а также внедрение новых эффективных технологий очистки в период плановых остановов энергоблока.

Непроектная работа опор парогенераторов. В нормальных условиях эксплуатации вклад усилий от главного циркуляционного трубопровода в напряженное состояние зоны сварного соединения 111 мал. Защемление или непроектная работа опор парогенератора ведет к росту усилий со стороны главного циркуляционного трубопровода и увеличению растягивающих напряжений в зонах с максимальными напряжениями от давления второго контура (зона повреждений). Система непрерывного контроля четвертого парогенератора в 2011—

2013 гг. не зафиксировала непроектных перемещений и защемлений его опор. Таким образом, влияние непроектной работы опор парогенератора на повреждение зоны сварного соединения 111 можно считать несущественным.

Вибрационное воздействие. В зоне исследуемого узла кольцевые напряжения в 2 раза ниже продольных. При изменении на 20% минимально контролируемой мощности до 100% увеличиваются характеристики вибрационной нагруженности. Максимальная амплитуда зарегистрированных вибронапряжений составила 5 МПа, виброускорение 0,5g, или 4,9 м/с². Наиболее интенсивные спектральные компоненты вибронапряжений — 8, 16,6, 33,2, 66,4, 83, 99,6, 132,8, 149,4, 166 Гц. При этом частота 99,6 Гц соответствует пульсациям давления от лопаток главных циркуляционных насосов. Повреждение в зоне сварного соединения 111 за счет вибраций составило 0,016, за счет реализации всех проектных режимов — 0,25. Таким образом, вклад вибрационных нагрузок в усталость металла меньше, чем от термосилового нагружения, их совместное воздействие не приводит к критическому повреждению металла.

Водородное охрупчивание металла в зоне сварного соединения 111. Анализ методом термодесорбции зоны повреждения сварного соединения 111 показал, что на поверхности трещины, как и вблизи устья, содержится примерно в 1,5—3 раза больше водорода, чем на других участках [10, 11]. Увеличенное содержание водорода с образовавшимися трещинами указывает на возможную связь его накопления и растрескивания металла. Вблизи устья трещины происходят окислительно-восстановительные коррозионные процессы, сопровождающиеся выделением водорода, который, в свою очередь, способствует локальному охрупчиванию металла. Этот вывод коррелирует с наблюдаемым на практике квазихрупким характером разрушения стали 10ГН2МФА в зоне сварного соединения 111, сочетающим в себе элементы хрупкого и вязкого изломов. Анализ показывает, что прослеживается прямая аналогия между характером и условиями повреждения металла сварного соединения 111 и металла перемычек холодных коллекторов.

Воздействие водорода на повреждение зоны сварного соединения 111 изучено недостаточно и требует дополнительных исследований.

Остаточные напряжения. Высокие остаточные напряжения в сварном соединении 111 могут возникать при изготовлении парогенератора с использованием многопроходной сварки, разной технологии вальцовки трубчатки в коллекторах, при монтаже и замене парогенераторов вследствие натяга главного циркуляционного трубопровода, а также при ремонте дефектных зон, выявленных в ходе эксплуатации. Остаточные сварочные напряжения могут значительно интенсифицировать образование и рост трещин. Это подтверждается повторным образованием трещин в зоне ранее выполненных заварок на первом парогенераторе в 2013 г. при ремонте в 1998 г. и на втором парогенераторе в 2014 г. при ремонте в 2007 г. Влияние остаточных напряжений на кинетику роста повреждаемости может быть оценено по измерению остаточных напряжений с последующим расчетным обоснованием прочности. Остаточные напряжения целесообразно измерять при обнаружении недопустимых трещин до начала ремонта вдоль дефектной зоны, а также контролировать после ремонта поверхностные остаточные напряжения в зоне ремонтной заварки до и после отжига с помощью тензорезисторов или неразрушающих физических методов контроля. При тензометрическом контроле в зоне измерения сверлится отверстие диаметром 1 мм при ступенчатом увеличении глубины до 1 мм с записью показаний тензорезисторов. Обработка результатов выполняется с учетом предварительной лабораторной калибровки на образцах из стали 10ГН2МФА. После завершения измерений отверстие удаляется шлифовкой.

Ультразвуковой контроль. Ежегодный ультразвуковой контроль показывает, что в большинстве случаев интенсивный рост трещин сварного соединения 111 наблюдается в течение одной кампании. На начальных этапах развития трещины акустические характеристики коррозионных отложений внутри трещины и основного металла отличаются незначительно, вследствие чего отсутствует граница раздела сред и ультразвуковые колебания проходят сквозь трещину. Поверхность трещины имеет шероховатую структуру, вследствие чего сигналы не отражаются, а рассеиваются и их невозможно зафиксировать. Слабое раскрытие берегов трещины позволяет проходить ультразвуковым колебаниям без отражения от границы раздела

трещина—металл. Непрерывный ультразвуковой контроль сварного соединения 111 в процессе эксплуатации осуществляется при работе парогенератора под давлением, что обеспечивает раскрытие берегов трещины и увеличивает ее отражающую способность. При подрасте трещины вначале образуется свежий металл, на новых берегах трещины коррозионных отложений в начальный период времени нет. Это позволяет зафиксировать подраст трещины.

Таким образом, непрерывный мониторинг позволит идентифицировать трещину. Трещина существенного размера будет обнаружена до того, как образуется сквозной дефект, и ее рост также будет под контролем. Однако следует отметить, что непрерывный ультразвуковой мониторинг в настоящее время не позволяет проводить контроль всего периметра сварного соединения 111. Как правило, для непрерывного ультразвукового мониторинга выбираются только одна-две зоны с наиболее значимыми исходными несплошностями ниже браковочного уровня, выявленными по результатам эксплуатационного контроля и признанными опасными с точки зрения возможного ускоренного роста в течение предстоящей топливной кампании.

Заключение. Таким образом, трещины в зоне сварного соединения 111 образуются при совместном воздействии замедленного коррозионного растрескивания под напряжением и циклического повреждения металла вследствие эксплуатационного термомеханического нагружения. Система непрерывного расчетно-экспериментального мониторинга эксплуатационной повреждаемости сварного соединения позволяет осуществлять сбор и анализ данных о фактической термосиловой нагруженности в различных режимах эксплуатации реакторной установки. Термошоки, связанные с забросом холодной воды по линиям периодической продувки в кольцевой зазор, вносят существенный вклад в повреждаемость сварного соединения 111. Напряжения в галтели кольцевого зазора могут превышать предел текучести металла и приводить к накоплению пластических деформаций. Изменение порядка открытия и закрытия арматуры на трубопроводах периодической продувки позволяет значительно уменьшить эксплуатационную повреждаемость сварного соединения 111. Периодическая промывка карманов парогенераторов в целях удаления коррозионно-

активных отложений из зоны сварного соединения 111 является эффективным профилактическим мероприятием, направленным на снижение эксплуатационной повреждаемости критической зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукасевич Б.И., Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г., Давиденко С.Е. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИКЦ «Академ-книга», 2004. 391 с.
2. Бакиров М.Б., Поваров В.П. Система многопараметрического мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования атомной станции. Патент RU 2014104752/07 (007605) от 12.02.2014. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2015, № 23.
3. Бакиров М.Б., Поваров В.П., Громов А.Ф., Левчук В.И. Разработка технологии непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла ответственного оборудования атомных станций. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2014, № 3, с. 15—22.
4. Бакиров М.Б., Еремин А.А., Левчук В.И. и др. Разработка технологии непрерывного контроля целостности металла в критических зонах оборудования АЭС ультразвуковым методом. — Изв. вузов. Северокавказский регион. Технические науки, 2014, № 6, с. 60—67.
5. Киселев А.С., Даничев В.В. Аннотация программы UZOR_1. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 1, с. 109—113.
6. Бакиров М.Б., Левчук В.И., Поваров В.П., Громов А.Ф. Анализ причин появления непроектных термосиловых воздействий в зоне СС № 111-1 ПГВ-1000М и рекомендации по их исключению. — Теплоэнергетика, 2014, № 8, с. 3—13.
7. Бакиров М.Б., Киселев А.С., Левчук В.И. и др. Анализ эксплуатационной нагруженности узла приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000М при нестационарных термосиловых воздействиях. — Вестник Воронежского гос. технич. ун-та, 2014, т. 10, № 6, с. 111—117.
8. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплехимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2001. 316 с.
9. Казанцев А.Г., Зубченко А.С., Григорьев В.А. и др. Методы прогнозирования влияния состава высокотемпературной воды на склонность к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию стали 10ГН2МФА. — Вопросы атомной науки и техники, Сер. Физика ядерных реакторов, 2008, вып. 33, с. 53—61.
10. Ажажа В.М., Толстолуцкая Г.Д., Ружицкий В.В. и др. Определение объемной концентрации водорода в материале сварного соединения № 111 парогенератора АЭС. — Тяж. машиностроение, 2008, № 6, с. 32—34.
11. Неклюдов И.М., Ожигов Л.С., Митрофанов А.С. и др. Механизм повреждений сварных соединений приварки коллекторов к корпусам парогенераторов энергоблоков ВВЭР-1000. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2012, № 2(78), с. 40—45.

Поступила в Редакцию 26.05.15

УДК 621.039.564.3

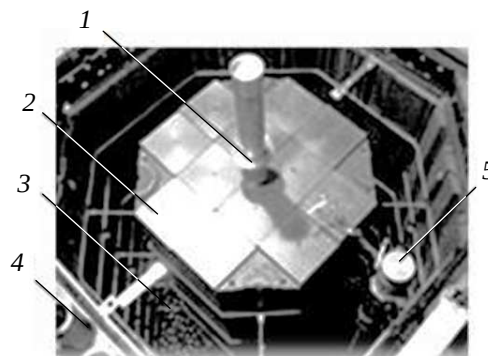
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ ПРИ НАГРЕВЕ КРИТИЧЕСКОГО СТЕНДА АСТРА

Осипов А.М., Гольцев А.О., Невиница В.А., Фомиченко П.А. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Критический стенд АСТРА предназначен для экспериментального изучения нейтронно-физических параметров высокотемпературных реакторов с графитовым замедлителем и гелиевым теплоносителем.

В критических экспериментах на стенде используется диоксидурановое топливо промежуточным обогащением ~21%. Оно представляют собой топливные частицы с покрытиями (микротрещины), распределенные в графитовой матрице шаровых элементов. Активная зона в сечении представляет собой кольцевой восьмигранник с графитовым наружным, боковым и внутренним отражателем, между которыми находится засыпка шаровых твэлов. Спектр нейтронов тепловой (рис. 1).

На стенде проводили эксперименты по определению пространственного распределения реакции деления ^{235}U при комнатной температу-



Р и с. 1. Критический стенд АСТРА: 1, 5 — компенсирующие органы; 2 — внутренний отражатель; 3 — активная зона; 4 — боковой отражатель