

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА В ЗОНЕ СВАРНОГО ШВА №111 ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-1000М

**С.А. Харченко, Н.Б. Трунов, В.В. Денисов, Н.Ф. Коротаев,
ФГУП ОКБ «Гидропресс»**

Введение

В докладе представлены результаты исследования причин повреждения металла в зоне сварного соединения № 111 (рис.1) приварки горячего коллектора к патрубку Ду1200 корпуса.

Первый случай растрескивания металла в районе соединения коллектора с корпусом ПГ произошел в 1998 году на 5 блоке НВАЭС. В дальнейшем обнаружены однотипные повреждения еще на нескольких ПГ, что заставило рассматривать случаи повреждения как системную проблему, имеющую общие причины. Для выявления факторов, приводящих к растрескиванию, был проведен значительный объем НИОКР:

- анализ технологии изготовления и свойств металла;
- детальные расчетные исследования напряженного состояния от эксплуатационных факторов;
- оценки остаточных напряжений от технологии изготовления;
- экспериментальные исследования напряженного состояния узла на моделях и на АЭС;
- замеры и анализ перемещений оборудования РУ при тепловом расширении;
- определение критического размера трещин.

Ниже кратко представлены результаты проведенных работ.

1 Конструкция ПГ

Конструкция ПГ представлена на рисунке 1 (поперечный разрез), конструкция узла нижней части коллектора с зоной повреждения сварного соединения №111 приведена на рисунке 2. Из рисунка 1 понятны применяемые ниже термины: «карман» коллектора; «горбушка», «зона сварного соединения № 111» (СШ № 111).

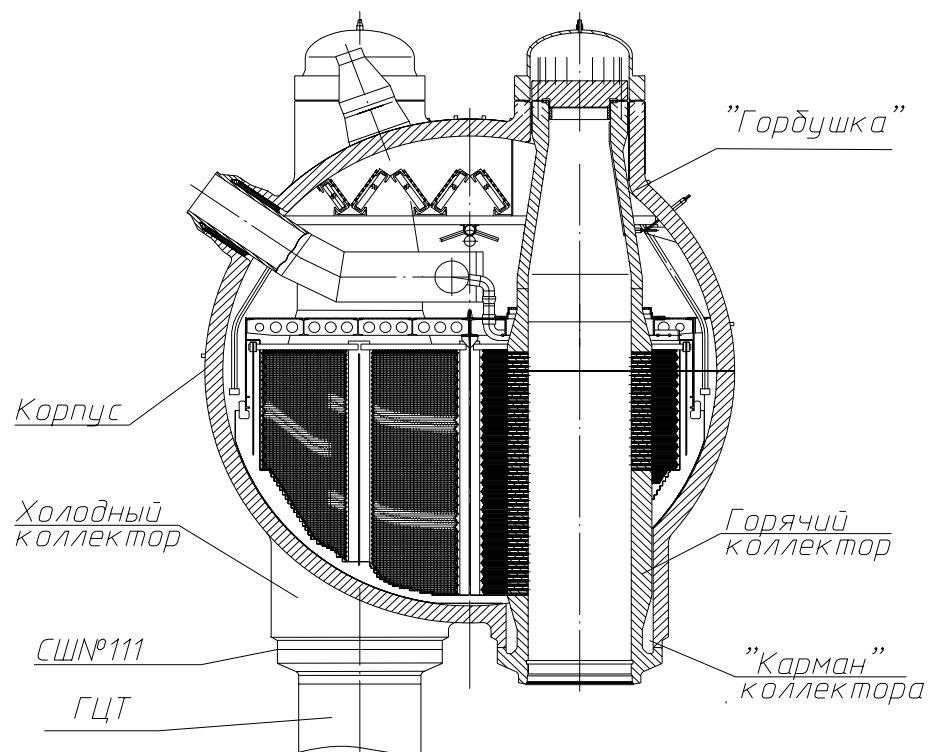


Рисунок 1. Парогенератор ПГВ-1000М

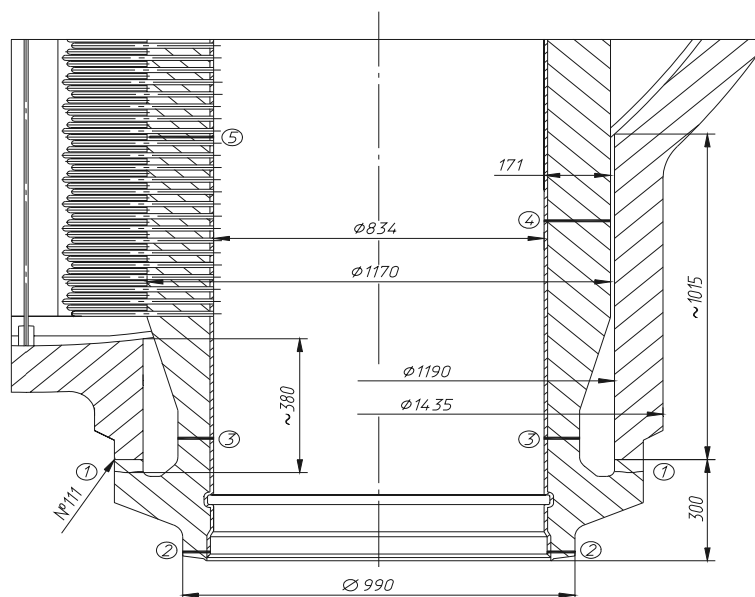


Рисунок 2

- 1-1—сечение, в котором зафиксированы повреждения;
- 2-2 сечение ГЦТ $\varnothing 990 \times 70$;
- 3-3 сечение коллектора $\varnothing 834 \times 90$ мм;
- 4 — коллектор $\varnothing 834 \times 171$, неперфорированная часть;
- 5 — коллектор $\varnothing 834 \times 171$, перфорированная часть.

2 Анализ технологии изготовления ПГ

1.1 Порядок сборки парогенератора

2.1.1 При изготовлении ПГ использовалось различное исполнение сварных соединений № 111. Сварное соединение № 111 с симметричной (использовалось ЗиО и ПО «Атоммаш») и косой разделкой (использовалось ПО «Атоммаш») кромок.

2.1.2 последовательность сборки ПГ:

- сборка коллекторов с корпусом, РАДС корневого участка сварных соединений №111;
 - визуальный и радиографический контроль корневых участков сварных соединений;
 - автоматическая или РАДС остальной части сварных соединений №111;
 - визуальный, капиллярный, радиографический и ультразвуковой контроль выполненных сварных соединений №111;
 - местная термическая обработка сварных соединений №111;
- визуальный, капиллярный и ультразвуковой контроль сварных соединений №111 после термической обработки.

На этом этапе возможно появление в зоне термического влияния или наплавленном металле сварного соединения №111 дефектов сварочного характера и остаточных напряжений после местной термообработки.

Визуальный контроль состояния поверхности «кармана» на заводе изготовителе ПГ и на АЭС показал наличие рисков, не предусмотренных требованиями чертежей. Все повреждения начинались в районе рисков и развившихся в процессе эксплуатации язв. Следует отметить, что на заводах проводились ремонты сварных соединений №111 /1/.

2.1.3 При изготовлении поврежденных ПГ использовалась технология запрессовки теплообменных труб с применением энергии ВВ, которая в разное время была различной и отличалась:

- типом устанавливаемых зарядов – «мокрый», «сухой»;
- количеством размещаемых зарядов 60 - 400;
- порядком размещения зарядов.

Всего применялось десять различных технологий с применением энергии ВВ. Проведенный анализ технологии изготовления ПГ не выявил технологических факторов которые непосредственно могли бы быть причиной повреждения зоны сварного соединения №111. Однако влияние неоднократных ремонтов в процессе выполнения сварного шва и

возможность возникновения остаточных напряжений при использовании ВВ как один из факторов способствующих повреждению узла полностью исключить нельзя.

3. Данные по механическим свойствам металла коллекторов

3.1 Паспортные данные по механическим свойствам металла коллекторов при нормальной и повышенной температурах приведены в отчете /1/. Анализ указанных данных показывает:

- механические свойства металла коллекторов вышедших из строя находятся примерно в середине поля значений для коллекторов различных ПГ;
- не выявлено отклонений механических свойств от значений гарантируемых техническими условиями на поставку, за исключением показателя σ_B при 20 °С «холодных» коллекторов 5ПГ-3 и 5ПГ-4 НВАЭС. Повреждений в коллекторах и 5ПГ-4 не обнаружено.

Следует отметить, что ПГ с минимальными показателями механических свойств металла коллекторов (σ_B и $\sigma_{0,2}$) отработали более 130000 ч без повреждений.

Результаты вырезки и исследования темплетов, вырезанных из дефектных сварных швов №111

4.1 При осмотре «карманов» поврежденных коллекторов после вырезки темплетов во всех случаях выявлено:

- наличие рисок, подрезов от грубой механической обработки, или язв и коррозионных каверн от которых брали свое начало зародышевые трещины;
 - наличие отложений в «карманах» коллекторов;
- наличие меди в отложениях в «кармане» и в трещинах.

Вид поверхности темплета с внутренней стороны «кармана» представлен на рис 4.1.

Выполнен химический анализ состава отложений. Приведем в качестве примера состав отложений:

- на 2ПГ-1 ЮУ АЭС - 78,75% - Fe_2O_3 , 13,42% - CuO , 0,21% - MgO , 2,15% - нерастворимый остаток;
- на 1ПГ-1 Балаковской АЭС - 70,1% - Fe_2O_3 , 25,6% - CuO , 1% - $CaO + MgO$, SiO_2 - 1%, 2% - нерастворимый остаток.

Аналогичный состав отложений имел место и на остальных парогенераторах.



Рисунок 4.1 Вид поверхности темплета с внутренней стороны «кармана».

4.2 Ниже приведены результаты исследований темплетов парогенератора № 1 блока № 5 НВ АЭС. Результаты исследований темплетов других поврежденных сварных соединений №111 аналогичны ПГ №1 блока №5 НВАЭС и приведены в отчете /1/.

При осмотре поврежденного узла обнаружены два сквозных дефекта длиной около 12 и 3 мм, расположенных в металле шва. Для анализа причин разрушения были вырезаны темплеты, содержащие трещины, начинающиеся из сварочной ванны и зоны термического влияния в месте радиусного перехода.

В результате исследований показано:

- химический состав металла патрубка коллектора соответствует требованиям ТУ 108.766-86, а металл сварного шва в зоне вырезки темплета соответствует химическому составу применяемых сварочных материалов Св-10ГН1МА под флюсом ФЦ-16;
- загрязненность основного металла неметаллическими включениями не превышает допустимой величины;
- структура основного металла в зоне разрушения однородная, типичная для стали 10ГН2МФА после закалки и высокого отпуска.

При исследованиях НПО «ЦНИИТМАШ» темплетов из первоначально поврежденной зоны шва № 111/1 1ПГ-1 ЮУ АЭС методом кинетической твердости было установлено, что фактические показатели и сертификатные данные характеристик σ_b и $\sigma_{0,2}$ как основного, так и наплавленного металла близки между собой.

В результате металлографических исследований в сечениях перпендикулярных магистральным трещинам в зоне радиусного перехода и радиусной проточки, были выявлены дополнительные концентраторы напряжений в виде подреза, коррозионных

каверн, гребней от грубой механической обработки, от которых брали свое начало зародышевые трещины.

По виду и плотности коррозионных продуктов отложений на разных стадиях развития трещин можно заключить, что развитие дефекта до сквозного было стадийным и длительным (близким к общему времени эксплуатации парогенератора).

Фрактографическими исследованиями показано, что образование дефекта на внутренней поверхности сварного соединения в области радиусного перехода и его развитие на глубину от 2 до 3 мм, происходило, преимущественно, по механизму коррозионного растрескивания под напряжением, вместе с тем имели место и признаки коррозионной усталости. Между начальной стадией развития дефекта на глубину $\sim 2 - 3$ мм и стадией его последующего развития имеется ступенька, что свидетельствует о смене механизма разрушения. Последующее развитие дефекта происходило преимущественно по механизму коррозионной усталости с наличием участков коррозионного растрескивания. Между первой и второй стадиями развития дефекта имел место значительный инкубационный период.

Разворот трещины по мере ее продвижения свидетельствует о возможном изменении направления действия нагружения.

4.3 Основные результаты металлографических и фрактографических исследований сводятся к следующему:

- инициации трещин предшествовала питтинговая и язвенная коррозия (рисунок 4.2);
- зарождение трещин было многоочаговым, однако повреждение сварного соединения происходило благодаря распространению одной или нескольких магистральных трещин;
- характер распространения трещин - смешанный с преобладанием транскристаллитного;
- на начальной стадии рост трещины осуществлялся путем слияния многих более мелких транскристаллитных трещин, напоминающих по микростроению трещины скола и квазискола;
- по мере продвижения трещины вглубь металла рельеф поверхности разрушения становился более разнообразным: отмечались области межзеренного разрушения, большое количество уступов, представляющих собой множественный "лестничный" узор, похожий на усталостный.

Рост трещин сопровождался вторичным растрескиванием, интенсивность которого увеличивалась по мере продвижения трещины. Кроме того, магистральные трещины имели множественные трещины сателлиты, ориентированные в различных направлениях по отношению к внутренней стенке коллектора.

Траектория развития основной (магистральной) трещины при первичном разрушении свидетельствует о значительной роли растягивающих напряжений от механических нагрузок (давление рабочей среды, возможное защемление опор после замены ПГ и другие), остаточных напряжений (от сварки, ремонтной термообработки, монтажа) при наличии концентраторов в виде рисок и язв. Характер повторных повреждений свидетельствует о наличии больших остаточных технологических напряжений в первую очередь от термообработки при ремонте.

В результате можно сделать вывод, что разрушения происходили по механизму ЗДКР и имеют общий характер, в частности, стадийность и длительный характер развития - для протяженных дефектов сравнимый с временем эксплуатации ПГ. Процесс возникновения трещин мог инициироваться обнаруженными дополнительными концентраторами напряжений (подрез, коррозионные каверны, гребешки от грубой механической обработки).

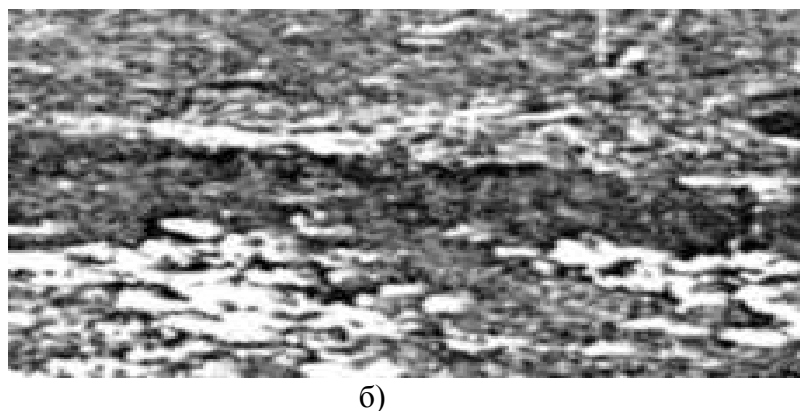
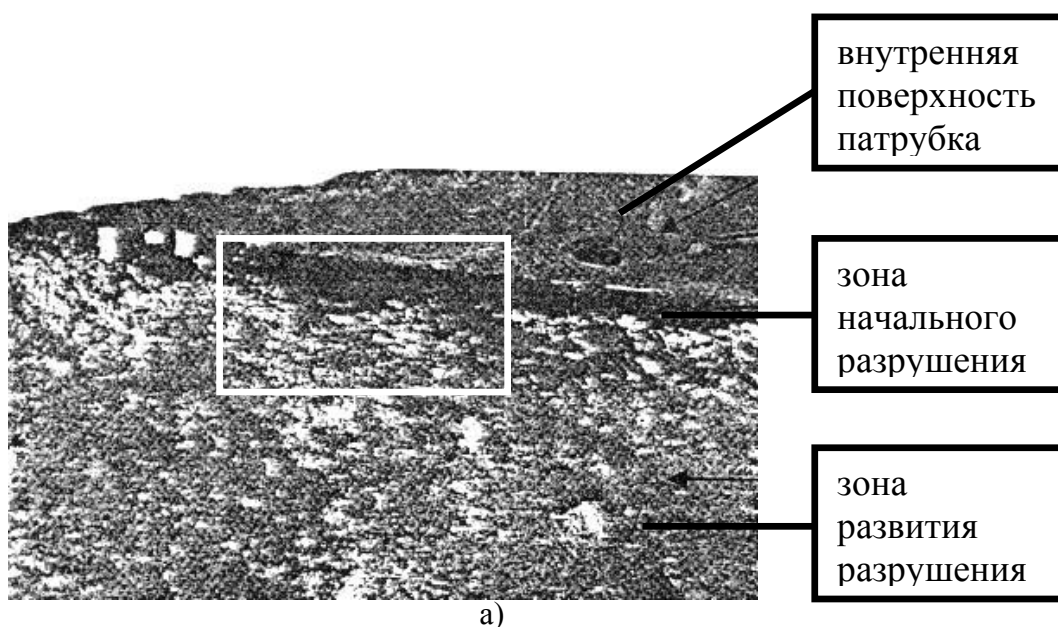


Рисунок 4.2 Морфология поверхности разрушения основного металла в сварном соединении №111/1 5ПГ-1 НВ АЭС (а); зарождение трещин от питтингов (б)

5 Результаты НИОКР, выполненных с целью выявления причин повреждения сварных соединений № 111

5.1 Для выяснения причин повреждений коллекторов в зоне шва № 111 различными предприятиями проведен комплекс исследований, в частности включавший:

- детальные расчетные исследования напряженного состояния от эксплуатационных факторов;
- расчетно-экспериментальное определение источников повышенной термомеханической нагруженности узла приварки «горячего» коллектора ПГВ;
- расчетный анализ нагрузок и перемещений патрубков парогенератора АЭС с ВВЭР 1000;
- анализ технологии изготовления, включая анализ механических свойств металла коллекторов и конструктивных особенностей сварных соединений № 111;
- оценка остаточных технологических напряжений при изготовлении;
- экспериментальные исследования напряженного состояния узла на моделях и на АЭС;
- замеры и анализ перемещений оборудования РУ при тепловом расширении;
- определение критического размера трещин.
- мониторинг тепломеханических состояний парогенераторов блока № 5 НВАЭС в ходе эксплуатационной кампании после ППР-2004/2005 и предварительный анализ циклической прочности узлов врезки коллекторов ПГВ-1000 по результатам контроля условий эксплуатационной нагруженности на блоке 5 Нововоронежской АЭС.

5.2 Расчетное обоснование прочности коллектора и зоны его соединения с корпусом при помощи уточненных трехмерных моделей, с учетом следующих силовых факторов: давление сред первого и второго контуров; воздействие температурного поля, возникающего при работе установки на номинальных параметрах; воздействие со стороны ГЦТ показывает:

- условия для кипения воды на поверхности металла зоны шва № 111 отсутствуют;
- напряжения в зоне сварных соединений № 111, как входного, так и выходного коллекторов имеют симметричный характер, в результате чего максимальные напряжения возникают в двух зонах, и их уровень хотя и близок по величине к значению минимального предела текучести стали 10ГН2МФА, однако не превышает его, что не должно приводить к ЗДКР при проектных условиях эксплуатации;

- усталостное повреждение металла в зоне шва № 111 без учета коррозии значительно меньше единицы;

- заземление опор ГЦН может приводить к возникновению высоких растягивающих напряжений (более 500 МПа) в сварном соединении выходного коллектора, при работе установки на номинальных параметрах;

- в нормальных условиях эксплуатации вклад усилий от ГЦТ в напряженное состояние зоны сварного соединения № 111 не велик, однако заземление или непроектная работа опор парогенератора ведет к росту усилий со стороны ГЦТ и увеличению растягивающих напряжений в одной из зон с максимальными напряжениями (зона повреждений) в то время как в другой зоне с максимальными напряжениями их уровень уменьшается;

- условия (в части механических напряжений) для разрушения по механизму ЗДКР могут иметь место при непроектной работе опор ГЦН в холодном коллекторе и опор ПГ в горячем коллекторе.

- в режиме гидроиспытания по второму контуру в этой же зоне уровень напряжений находится на уровне предела текучести материалов сварного соединения № 111.

Следует отметить, что согласно уточненным расчетам уровень механических напряжений в зоне сварного соединения № 111 и при проектных условиях эксплуатации достаточно высок и в этой связи устранению дополнительно нагружающих узлов факторов, таких как заземление опор ПГ или накопление отложений в «карманах» коллекторов следует уделять особое внимание.

Сказанное выше поясняется рисунками 5.1-5.3.

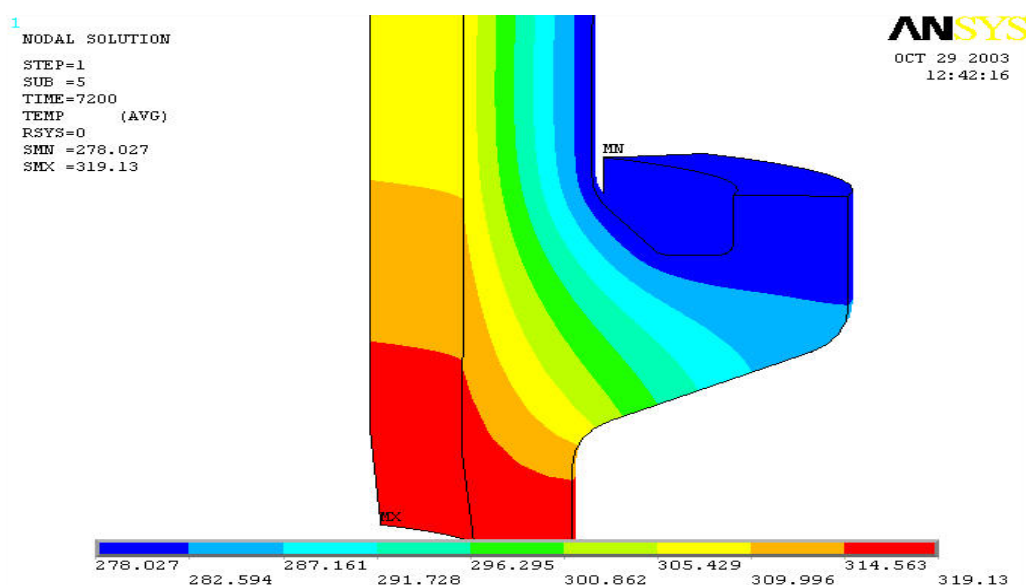


Рисунок 5.1 Распределение температуры в ЗСШ № 111 при работе ПГ на номинальных параметрах

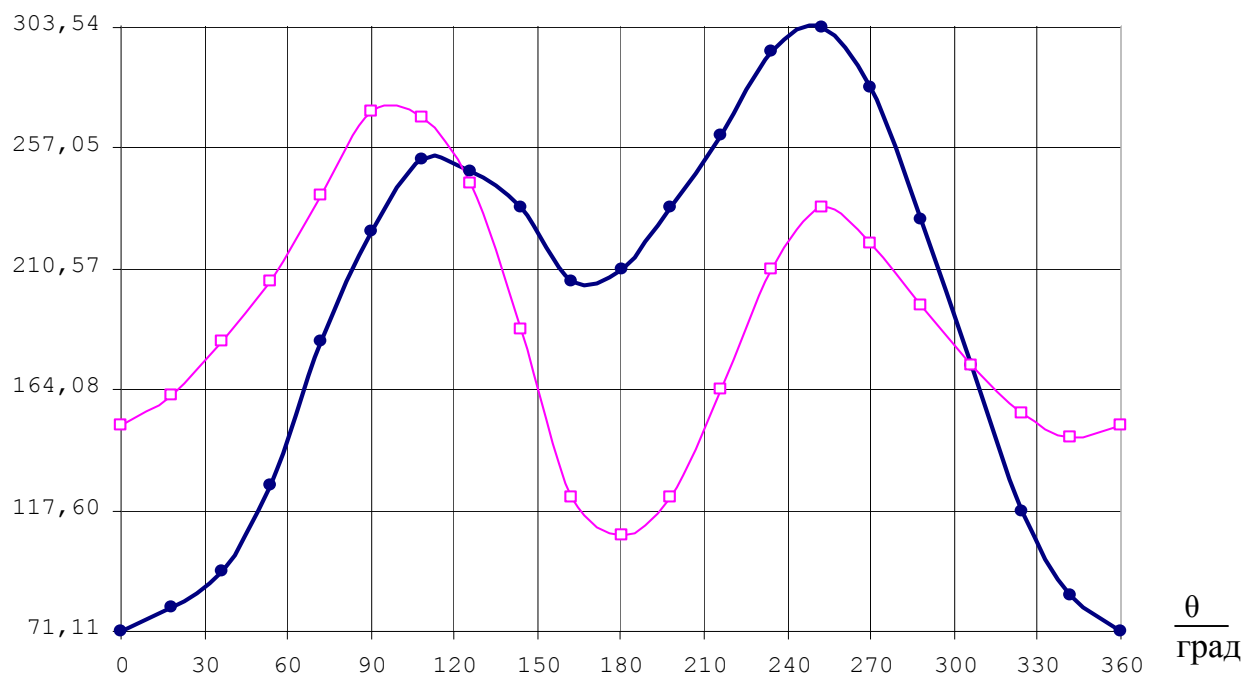


Рисунок 5.2 Распределение продольных напряжений на высоте 20 мм от дна “кармана” для ПГ “малой” серии и серии 320. Номинальный режим

- реакторный блок серии 320 ($P_1=18\text{МПа}$, $P_2=8\text{МПа}$, $M=0,977\text{ МН*м}$)
- реакторный блок “малой” серии ($P_1=18\text{МПа}$, $P_2=8\text{МПа}$, $M=0,845\text{ МН*м}$)

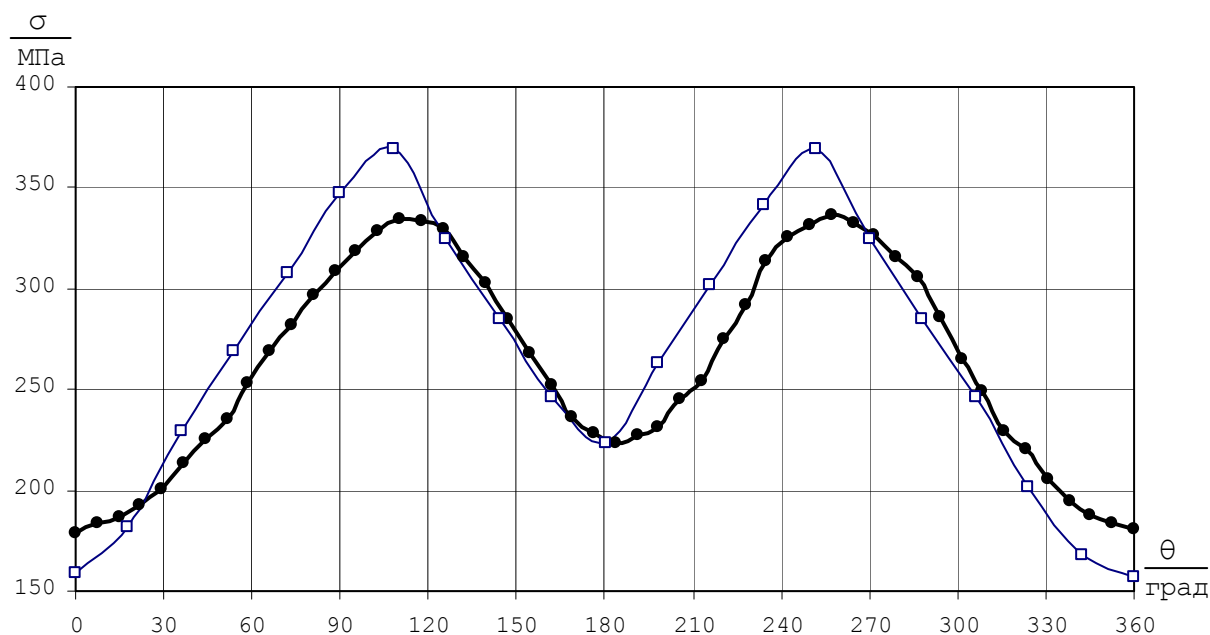


Рисунок 5.3 Распределение продольных напряжений на высоте 20 мм от дна “кармана” в режиме гидроиспытания по второму контуру.

- - по расчету ФГУП ОКБ “ГИДРОПРЕСС”
- - по расчету ИПП НАНУ

5.3 В проектных режимах повреждаемость узла значительно меньше допускаемой величины, равной 1. В непроектных режимах величина повреждаемости узла превышает допускаемую. Это накладывает требования по исключению заземления опор ПГ, заброса холодной воды в «карманы» коллекторов и других нарушений проектных режимов эксплуатации.

6. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по напряженному состоянию узла

6.1 При отработке трехмерных расчетных моделей проводился сравнительный анализ величин напряжений в зоне сварного соединения № 111 полученных расчетным путем, полученных на объемных моделях из оптически чувствительного материала (смоляные модели) и по результатам натурного тензометрирования. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, т.е. на сегодня имеется достаточно хорошее понимание напряженного состояния зоны сварного соединения №111.

В расчетах показано, что условия нагружения узлов врезки коллекторов первого контура в ПГ на блоках «малой» серии и серии «320» практически одинаковы при проектных условиях эксплуатации.

Можно отметить хорошее совпадение результатов расчетов и экспериментов как по перемещениям, так и по напряжениям в различных точках коллектора и зоны сварного соединения № 111.

6.2 Следует также отметить, что результаты сравнительных оценок напряженного состояния зоны сварного соединения № 111 ПГ «малой» «большой» серий, выполненных специалистами Киевского ИПП, показали, что уровень максимальных напряжений в этой зоне, в силу отличия компоновочных решений, в ПГ «большой» серии примерно на 10% меньше, чем в ПГ «малой».

7. Определение критических размеров трещин

7.1 ОКБ «ГИДРОРЕСС» проведена предварительная, оценка критических и допустимых размеров трещин в зоне шва № 111 /2/. Оценка проводилась на основе детерминистического и вероятностного подходов, с учетом опыта эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М, предопределившего консервативных подход к проблеме.

Согласно проведенной оценке допустимые размеры дефектов равны:

- по глубине 2,5мм;
- по длине 12,5мм.

Критические размеры дефектов равны:

- по глубине 14мм;
- по длине 70мм.

8. Анализ ВХР и системы продувки

8.1 В настоящее время для АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами применен водно-химический режим второго контура с коррекционной обработкой питательной воды и конденсата гидразин-гидратом и аммиаком.

Нормы качества рабочей среды второго контура устанавливают требования к качеству воды второго контура, ограничения по эксплуатации энергоблока при отклонении показателей качества питательной и продувочной воды ПГ от нормируемых значений и эксплуатационный предел, требования к объему и периодичности контроля, средствам и методам поддержания водно-химического режима второго контура. Для поддержания водно-химического режима второго контура в ПГ организован «солевой» отсек, из которого осуществляется продувка с расходом от 10 до 15 т/ч для вывода растворимых солей. Для вывода шлама с нижней образующей корпуса ПГ организована периодическая продувка расходом от 15 до 20 т/ч, в том числе и из «карманов» ПГ.

Известно, что оборудование конденратно-питательного тракта содержит медьсодержащие сплавы, в связи с чем в парогенератор вместе с питательной водой поступает медь и ее окислы, отложения которых обнаружены в «карманах» коллекторов. Известно также, что качество питательной воды, достигнутое на зарубежных АЭС, где конденратно-питательный тракт выполнен из коррозионно-стойких сплавов, на порядок выше достигнутого на наших блоках.

Анализ водно-химического режима показал, что даже выявленные ранее отклонения по качеству питательной и продувочной воды не могли сами по себе вызвать процесс ЗДКР. Тем не менее, судя по наличию отложений и коррозионному состоянию внутренней поверхности «карманов» коллекторов, становится очевидным, что чистоте «карманов» уделялось недостаточное внимание.

Сегодня имеется опыт эксплуатации Волгодонской АЭС, где схема позволяет осуществлять полным расходом продувку отдельно из «карманов» ПГ, который показал реальную возможность полного удаления отложений из «карманов» с продувочной водой. Такое решение целесообразно использовать при оптимизации схем продувки ПГ всех блоков с ВВЭР-1000.

8.2 Учитывая необходимость удаления загрязнений из «карманов» коллекторов в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» разработано и испытано устройство смывное парогенератора.

Эффективность работы устройства подтверждена натурными испытаниями на 5ПГ-1 НВАЭС /3/. На рисунке 8.1 показано состояние «карманов» «холодного» и «горячего» (на котором были смонтированы промывочные устройства) коллекторов после окончания химпромывки. Как видим применение специальных смывных устройств, позволило полностью удалить «следы» отложений из объема «кармана» «горячего» коллектора после химической промывки.



«карман» «холодного» коллектора



«карман» «горячего» коллектора

Рис. 8.1. Чешуйчатые и мелкодисперсные отложения после химической промывки 5ПГ-1.

9 Обоснование работоспособности и безопасной эксплуатации узла врезки коллектора и корректирующие мероприятия по нейтрализации повреждающих факторов

9.1 В расчете ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС» /2/, показано, «что циклическая прочность узла врезки коллекторов первого контура отвечает требованиям нормативной документации на проектный ресурс реакторной установки с учетом остаточных напряжений, принятых равными пределу текучести материала, и при минимальном значении коэффициента снижения циклической прочности обоснована». В расчете /4/ при определении повреждаемости узла врезки коллектора после ремонта рассмотрен весь перечень проектных режимов, включая нормальные условия эксплуатации, нарушение

нормальных условий эксплуатации и аварийные режимы. Расчет также показал, что прочность зоны ремонта на оставшийся ресурс работы установки обеспечена. Накопленная расчетная повреждаемость $a=0,41$, что ниже допускаемой $[a]=1$, но все же является значимой величиной.

После проведения мероприятий по установке необходимых зазоров в элементах противоаварийных тяг и проверки состояния роликовых опор по перемещениям ПГ на НВАЭС и Калининской АЭС замечаний не имеется, следовательно, дополнительных напряжений в узле из-за заземления опор не ожидается.

Безопасность эксплуатации ПГ обеспечивается, прежде всего, повышением качества УЗК металла зоны шва 111. Согласно техническим требованиям на совершенствование методики УЗ контроля ЦНИИТМАШ № МЦУ-11-98п и на разработку методики автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений №111 (76) ПГВ-1000 фирмы «ЭХО+» (ТТ.МА.ВВЭР-111.А5.2-05) чувствительность методов должна обеспечивать выявление дефектов с размерами по глубине – 2, по длине –10 мм. Учитывая консервативность подхода к определению допустимых размеров дефектов и фактическую длительность процесса образования сквозной трещины - несколько лет – проведение ежегодного УЗК обеспечит своевременное обнаружение трещины до ее подрастания до критического размера. Повышение качества контроля не исключает необходимости проведения компенсирующих мероприятий по предотвращению процесса ЗДКР в металле зоны сварного соединения № 111.

10 Заключение

10.1 Несмотря на то, что напряжения в данном узле находятся в пределах установленных норм, в сочетании напряжениями от непроектных нагрузок и остаточными напряжениями они вносят значительный вклад в повреждаемость данного узла. Исследованиями показано, что повреждения возникают при сочетании комплекса повреждающих факторов, включающих высокий уровень напряжений, температуру и агрессивный состав окружающей среды.

Результаты исследований позволяют выделить основные факторы, определяющие процесс повреждений:

- непроектное напряженное состояние в случае препятствий свободному перемещению ПГ;
- забивание линий продувки из коллекторов ПГ и накопление в «карманах» коллекторов коррозионно-активных отложений, в том числе соединений меди, вызвавших появление в зоне повреждения крупных язв и каверн с зародышами трещин;

- технологическая наследственность вследствие операций механической обработки, запрессовки труб взрывом, термообработки.

10.2 Основные направления работ по нейтрализации повреждающих факторов:

- контроль и обеспечение чистоты «карманов» коллекторов за счет эффективной продувки и промывки при необходимости;
- контроль величины и характера перемещений оборудования, сравнение с проектными значениями;
- постоянный контроль термомеханической нагруженности узла при эксплуатации и анализ фактического состояния;
- предотвращение отклонений от предписанного водно-химического режима ПГ и совершенствование системы продувки ПГ.

Кардинальным решением в отношении последнего фактора является исключение из состава 2 контура АЭС с ВВЭР оборудования из некоррозионно-стойких материалов и медьсодержащих сплавов.

10.3 Безопасная работа ПГ обеспечивается регулярным проведением ультразвукового контроля, позволяющего выявлять дефекты на ранних стадиях развития.

10.4 Для новых проектов ПГ разработаны решения по снижению уровня напряжений в данной зоне и обеспечению чистоты "карманов" коллекторов, направленные на исключения подобных явлений.

Список литературы

1. ПАРОГЕНЕРАТОР ПГВ-1000М С ОПОРАМИ Определение с учетом фактических условий нагружения причин повреждения сварного соединения №111, 320-Пр-647, ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2006
2. Предварительная оценка критических и допустимых размеров трещин в зоне шва №111. 320-Пр-494, ОКБ «Гидропресс», 2003
3. ОТЧЕТ об испытании смывного устройства «карманов» коллекторов парогенераторов при проведении химической промывки ПГ-1 блока 5 Нововоронежской АЭС Калининский филиал (КАТЭ), 2006
- 4 ПАРОГЕНЕРАТОР ПГВ-1000М Обоснование прочности зоны ремонта сварного соединения №111. 320-Пр-691, ЗАО «НПО Гидропресс», 2006

Перечень принятых сокращений

АЭС – атомная электрическая станция

АЭП - Атомэнергопроект

БЩУ – блочный щит управления

ВВЭР - водо-водяной энергетический реактор

ГЦК – главный циркуляционный контур

ГЦТ - главный циркуляционный трубопровод

НВАЭС – Ново-Воронежская АЭС

НДС - напряженно-деформированное состояние

ПГ – парогенератор

УЗК – ультразвуковой (УЗ) контроль

ЮУАЭС – Южно-Украинская АЭС