Для определения координаты точки касания ϕ1 оптической оси оптико-электронного измерительного преобразователя к контуру детали составим равенство из правых частей уравнений:

$$e^{(j\phi)} \cdot r(\phi) + L \cdot e^{(j\beta)} + H \cdot e^{j\left(\beta+\frac{\pi}{2}\right)} = r(\phi_1)e^{(j\varphi_1)} + K \cdot e^{j\beta_1}, \quad (2)$$

где β - угол наклона касательной в точке А, β1 - наклон касательной в точке F через производную к контуру с неизвестной координатой φ1, Н - высота установки измерительного преобразователя; L – расстояние от центрального валка до места установки измерительного преобразователя; где К - расстояние от измерительного преобразователя до точки касания оптического луча с поверхностью контролируемой детали.

Затем вычисляются значения угла $\psi = \beta + \pi - \beta_1$, далее определяется приведенный радиус детали $R_{пр}$ с помощью следующей формулы:

$$R_{\text{пр}} = \frac{Lsin\psi + Hcos\psi}{1+cos\psi}. \quad (3)$$

Поскольку с помощью этой схемы измерения невозможно измерить текущий радиус профиллограммы, то для контроля величины овальности - $2r_m$ используется приведенный радиус детали, т.е. радиус цилиндрической детали, который соответствует координате точки касания оптической оси преобразователя.

Ошибку измерения эллиптичности определяется следующим образом:

$$\varepsilon = (R|\text{прив} - r_0)_{max} - (R|\text{прив} - r_0)_{min}$$

Было определено, что эта ошибка достигает минимального значения при установке измерительного преобразователя *H* на высоту среднего диаметра профиля детали $2r_0$

Таким образом, в ходе работы была создана математическая модель процесса измерения, а также разработан бесцентровая оптико-электронная система контроля обечаек. Полученные результаты контроля могут быть использованы для управления технологическим процессом формирования, а именно заданием радиуса гибки по контуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2181190, МПК G01B 21/10, 10.04.2002.
2. Шилин А.Н. Исследование методических погрешностей оптико-электронных информационно-измерительных систем управления производством обечаек // Измерительная техника. - 1989. - № 10. - С. 8-10.
3. Гебель И.Д. Инвариантные свойства отклонения профиля от круглой формы // Измерительная техника. - 1978. №11. -С.16-19.
4. Соломенцев Е.Д. Функции комплексного переменного и их применения. - Москва.: Высшая школа, 1988. - 167 с.

УДК 621.18:621.311.25

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АЭС

Бакуменко З.С. [1]., Клейменов Ю.А.

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Россия

[1]zahar.bakumenko@yandex.ru; [2] yurykleymenov2018@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается проблема повреждения металла коллектора в зоне сварного шва № 111 парогенераторов атомных электрических станций. Представлены результаты исследования причин возникновения дефектов.

Ключевые слова: парогенератор, атомная электростанция, сварное соединение № 111, статистика, повреждение.

IMPROVING THE RELIABILITY OF STEAM GENERATORS OF DOMESTIC NUCLEAR POWER PLANTS

Bakumenko Z.S. [1], Kleymenov Y.A. [2]
Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Volgodonsk, Russia
[1]zahar.bakumenko@yandex.ru, yurykleymenov2018@mail.ru

Abstract. The paper considers the problem of metal damage to welded joints № 111 of steam generators of nuclear power plants. Special attention is paid to the distribution of metal's temperature in the area of weld № 111 when the PG is operating at nominal parameters.
Keywords: steam generator, nuclear power plant, welded joint № 111, statistics, damage.

В отечественной атомной энергетике существует проблема повреждения металла сварных соединений № 111 приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенераторов АЭС. В зоне термического влияния и на самом шве образовывались трещины, представляющие значительную угрозу для безопасности.

В исследовании были проведены научно-технические работы для выявления факторов, приводящих к появлению дефектов в деталях ПГ. Количество поврежденных ПГ в зависимости от года обнаружения показано на рисунке 1.

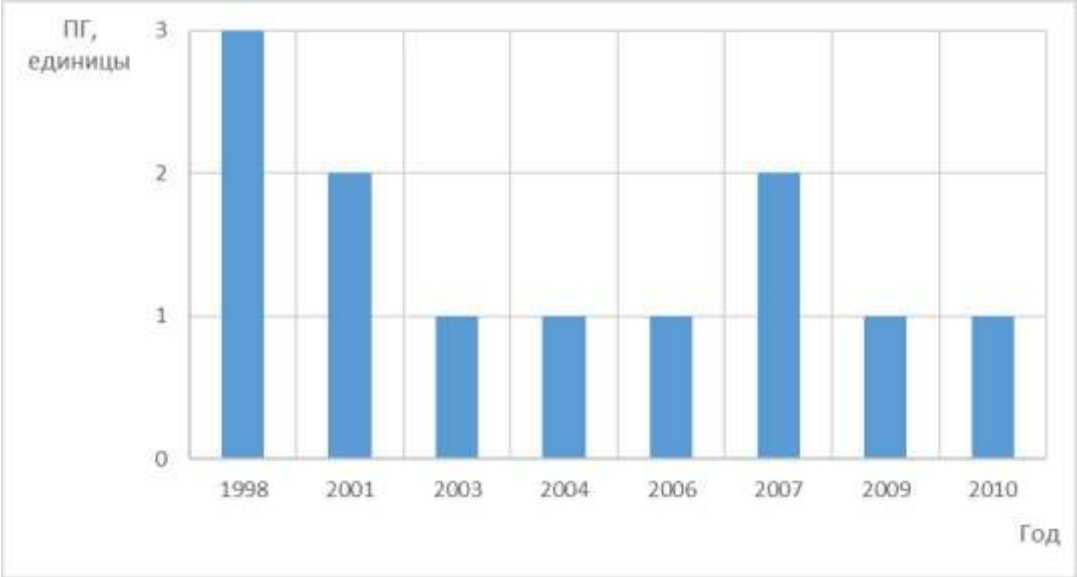


Рисунок 1 – Количесвто поврежденных парогенераторов в период с 1998-2012гг

Парогенераторы ПГВ-1000М за весь период эксплуатации обеспечивают параметры и характеристики, предусмотренные проектом [1].

В 1997 году наблюдались повреждения ТОТ [2], а затем октябре 1998 года на 5 блоке Нововоронежской АЭС впервые произошло растрескивание металла в районе соединения коллектора с корпусом ПГ, следующим был 1 блок Южно-Украинской АЭС и в дальнейшем обнаружены однотипные повреждения ещё на нескольких ПГ [3]. Это означает, что проблема системна и имеет общие причины.

Повреждения были зафиксированы на узле приварки коллектора к патрубку ДУ1200 парогенераторов ПГ-1 блока № 5 НВ АЭС, ПГ-1 и ПГ-2 блока № 1 ЮУ АЭС, а именно:

– на РУ серии В-302 (оснащённых ГЗЗ);
– на «горячих» коллекторах ПГ;
– на разневоленных коллекторах ПГ;
– на ПГ, заменяющих дефектные;
– на ПГ, изготовленных на заводах Атоммаш;
– на ПГ с несимметричной разделкой кромок сварного шва номер 111;

– на ПГ со сварным швом, выполненным автоматической сваркой;

– на пересечении оси сварного шва и центральной линии растянутой части трубопровода ГЦК Ду-850.

Разрушение началось в зоне перехода от галтели (R20 мм) к цилиндрической поверхности кармана. Здесь обычно находится технологическая риска, образованная при механической обработке заготовки коллектора, в основном металле с переходом в металл шва;

Дефекты на коллекторах парогенераторов ЮУ АЭС и НВ АЭС возникли в одних и тех же местах. Это значит, что причины, вызвавшие это повреждение, общие для обеих станций.

Использовав методы фрактографического, металлографического, химического, рентгеноструктурного анализов, констатировали факты:

1. Основной металл коллекторов вместе с металлом сварных швов, а также структура основного металла соответствуют по химическому составу требованиям НТД на сталь и сварочные материалы; микротвердость металла в зоне термического влияния сварки не повысилась;

2. Магистральная раскрытая трещина обнаружена в темплете основного металла коллектора 1ПГ-2, коллектора 1ПГ-1 - множественные трещины, ориентированные в кольцевом направлении вглубь темплета;

3. Трещины имеют множество очагов зарождения. Этот вывод сделан с помощью анализа состояния раскрытой трещины и трещин в темплете из коллектора 1ПГ-1; трещины во времени развиваются стадийно и они окислены;

4. Коррозионные язвы (каверны), сопровождаемые отходящими трещинами, обнаружены на кромке перехода от стенки коллектора к раскрытой трещине;

5. Магистральная кольцевая трещина и раскрытые трещины в коллекторах 1ПГ-2 и 1ПГ-1 соответственно имеют множественные трещины-сателлиты, которые идут в различных направлениях относительно к внутренней стенке коллектора; некоторые трещины зародились на внутренней поверхности коллектора 1ПГ-2 вблизи раскрытой трещины;

6. Трещины развиваются ветвисто, охватывая значительные объемы металла, распространяясь по телу зерна и по его границам; окончания трещин-волосовидные; более широкие трещины, как правило, окислены;

7. Неравномерная толщина оксидного слоя на поверхности кармана темплетов из коллекторов 1ПГ-1 и 1 ПГ-2 лежит в диапазоне от 0,5 до 0,8 мм; толщина окисных отложений на поверхности раскрытой трещины в основном металле коллектора 1 ПГ-2 вблизи кармана равна 0,2-0,5 мм, а вплоть до 1 мм вглубь трещины - 0,08-0,1 мм;

8. Найдены более тонкие, тоже ветвистые трещины в сварных соединениях. Они ориентированны как в кольцевом направлении, так и вдоль образующей поверхности цилиндра кармана стенки коллектора;

9. В изломе обнаружены участки хрупкого разрушения, характерные для процесса коррозийного растрескивания под напряжением и бороздки, подобные бороздкам усталости.

Для выявления факторов, приводящие к растрескиванию, были проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы:

– детальные расчетные исследования напряжённого состояния от эксплуатационных факторов;

– анализ технологии изготовления и свойств металла;

– оценки остаточных напряжений от технологии изготовления;

– экспериментальные исследования напряжённого состояния узла на моделях и на АЭС;

– замеры и анализ перемещений оборудования РУ при тепловом расширении;

– определение критического размера трещин.

Коллекторы были повреждены по причине образования трещин разных размеров и глубины. При воздействии напряжений на уровне предела текучести и коррозионно-активной среды сталь 10ГН2МФА проявляет склонность к замедленному деформационному

коррозионному растрескиванию (ЗДРК) [4]. Этот процесс происходит при выполнении следующих условий:

1) Наличия коррозионных отложений (особенно с содержанием меди);
2) Температура металла находится в пределах 260-290˚С;
3) Наличия высоких растягивающих напряжений (выше предела текучести металла);
4) Замедленного деформирования металла по времени.

При отсутствии даже одного из факторов механизм разрушения развиваться не будет.

Проведенный анализ [5] позволил исключить влияния технологии изготовления и остаточных напряжений от нее, свойств металла и способа выплавки материалов коллектора, а также количество и тип применяемых зарядов.

Изменения напряженно-дефгрмированного состояния, в том числе нерасчетные, в области разрушения при работе ПГ способствуют появлению, росту трещин и изменению их направлений. Определенную роль в этом играет наличие остаточных сварочных напряжений, не полностью снимаемых термообработкой.

Процесс коррозионного растрескивания металла коллектора в значительной степени зависит от состояния ВХР и режимов продувки. Так на ЮУ АЭС был нарушен регламент ВХР, что привело к изменению состава теплоносителя в кармане коллектора и способствовало протеканию процесса коррозионного растрескивания.

Кроме напряжённого состояния узла на появление дефектов влияют условия эксплуатации каждого конкретного коллектора [6].

Локализацию напряжений и деформаций (как эксплуатационных, так и технологических) могут вызвать отсутствие осевой симметрии, различие жёсткости по периметру изделия тем более, что места возникновения трещин находились около гальтельного перехода кармана коллектора.

Для предотвращения трещин галтели конструкционно выполнили радиусной формы (была квадратной) и ввели штуцера продувки карманов Ду25. Выполнили разневоливание коллектора 1 контура и вместо развальцовки трубок взрывным методом стали применять гидрораздачу.

Таким образом, развитие коррозиционных повреждений ПГ большинства энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 в основном происходит из-за деформационно-коррозийного растрескивания, возникающего при эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трунов, Н.Б. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР / Н.Б. Трунов, С.А. Логвинов, Ю.Г. Драгунов. – М: Энергоатомиздат, 2001.-351 с
2. Неклюдив И.М. Исследование причин образования коррозионных деффектов в теплообменных трубах парогенераторов ПГВ-1000. Коррозионные повреждения теплообменных труб парогенераторов Южно-Украинской АЭС / И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, С.В Гоженко // СБ.науч. тр. СНИЯЭиП.- Вып. 8. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2003.- С.50-63.
3. Muscapa J. Pepopt of NPC Steam Genepatop Wopkshop / J. Muscapa // APGonne SG Mock-up NDE Pound, Bethesda, Mapyland, 27-28 Febpuapy, 2001.- P.85-91.
4. Митрофанов А.С. Про причини ушкодженея зварних з’еднань №111 парогенераторів ПГВ-1000 / А.С. Митрофанов, Л.С. Ожигов, Е.О. Крайнюк, В.И. Савченко. // Вісник ТДТУ. – Вып. №4. – Тернопіль, 2009.- С.32 5.
5. Ф. Коротае. Снижение напряжений в области сварного соединения № 111 парогенератора ПГВ-1000М механическим способом // Труды 5-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 29 мая -1 июня 2007 г. Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс».
6. Бакиров М.Б. Разработка атласа дефектов теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР/ М.Б. Бакиров, СМ. Клещук, С.В. Чубаров // Материалы 7-го Междунар. Семинара по горизонтальным парогенераторам, ФГУП ОКБ «Гидропресс», 3-5 октября 2006 г. – С.54-5.