

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.7

Расчет долговечности сварного соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС с учетом реальных условий эксплуатации

Г. В. Степанов^а, В. В. Харченко^а, А. И. Бабуцкий^а, С. В. Романов^б,
Н. А. Феофентов^в, И. В. Кравченко^в

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Ассоциация “Надежность машин и сооружений”, Киев, Украина

^в ОП “Южно-Украинская АЭС”, Южно-Украинск, Украина

Приведена методика расчета долговечности сварного соединения коллектора с патрубком парогенератора, основанная на учете исчерпания ресурса пластичности материала в процессе повторно-статических циклов упругопластического нагружения, условий эксплуатации, локальной концентрации напряжений и остаточных напряжений после сварки.

Ключевые слова: долговечность, коллектор, парогенератор, сварное соединение, остаточные напряжения.

Введение. При длительности эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000 блоков АЭС с реактором ВВЭР-1000 значительно ниже расчетной обнаружены повреждения узлов приварки “горячего” коллектора к патрубку парогенератора (ПГ) [1, 2]. Установлено, что повреждения (трещины) локализованы практически в одних и тех же местах на выполненных по различным технологиям (симметричная и несимметричная разделка кромок соединения, использование автоматической и ручной сварки, предварительной наплавки кромок и без наплавки) узлах приварки, эксплуатирующихся на разных АЭС. Это свидетельствует об общих причинах возникновения данного явления. Кроме того, не все особенности нагружения и деформирования материала в области узла приварки учитывались при его прочностном расчете на стадии проектирования.

В данной работе на базе уточненной оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) узла приварки выполнен расчет ресурса его работы после ремонта с учетом реальных условий эксплуатации.

Особенности нагружения узла приварки и условий его эксплуатации. Подробный анализ НДС данного сварного соединения приведен ранее [3], ниже кратко изложены некоторые его результаты.

На рис. 1 показана конструкция узла приварки. Наиболее нагруженной является утоненная часть патрубка ПГ со сварным швом. Эта часть патрубка воспринимает нагрузки, действующие со стороны горячей ветви главного

циркуляционного трубопровода (ГЦТ), вес коллектора и теплоносителя, а также нагрузки, вызванные давлением в первом и втором контурах ПГ. Патрубок и коллектор изготовлены из стали 10ГН2МФА, физико-механические свойства которой представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Некоторые физико-механические свойства стали 10ГН2МФА [4]

| Характеристика | T, °C | | |
|-------------------------------------|-------|-----|-----|
| | 20 | 130 | 320 |
| Предел текучести $R_{p0,2}^T$, МПа | 343 | 318 | 300 |
| Относительное сужение Z^T , % | 55 | 54 | 51 |

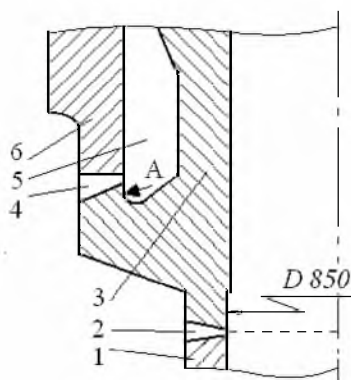


Рис. 1. Фрагмент узла приварки: 1 – часть ГЦТ; 2, 4 – сварные швы; 3 – коллектор; 5 – карман; 6 – патрубок ПГ; А – место иницирования разрушения.

Основные факторы нагружения узла в процессе эксплуатации: давление теплоносителя во втором контуре, т.е. в корпусе ПГ (давление в первом контуре и возникающий при эксплуатации градиент температур в узле приварки снижают уровень максимальных растягивающих напряжений вследствие давления во втором контуре), и изгибающий момент от некомпенсированного термического расширения элементов петли первого контура реакторной установки.

По результатам расчетов установлено, что максимальные растягивающие напряжения достигаются на внутренней поверхности “кармана” (кольцевого зазора между коллектором и патрубком ПГ) в локальной области ниже линии сопряжения галтели с внутренней цилиндрической поверхностью патрубка ПГ со стороны растянутой частигиба трубопровода, что соответствует месту фактического разрушения, наблюдавшегося на всех поврежденных ПГ (рис. 1). При гидроиспытаниях (ГИ) на прочность и плотность максимальные напряжения в данной области превышают предел текучести.

Нагружение узла имеет повторно-статический характер и включает циклы, связанные с ГИ (подъем давления в первом и втором контурах реакторной установки выше эксплуатационного уровня, его выдержка и снижение) и с нормальными условиями эксплуатации (выход на номиналь-

ный режим эксплуатации и ее завершение при плановой или внеплановой остановке). Характер нагружения узла изгибающим моментом вследствие термического удлинения ГЦТ также циклический: момент возрастает при разогреве, поддерживается на постоянном уровне при нормальных условиях эксплуатации и снижается при расхолаживании реакторной установки [3].

Еще одной особенностью условий эксплуатации данного узла является коррозионное воздействие на поверхность металла коррозионно-активных отложений в области “кармана”, а также среды теплоносителя, определяемое ее водно-химическим составом. В области “кармана” дополнительно возникает термоциклическое нагружение металла от периодических продувок, выполняемых с целью снижения концентрации коррозионно-активных отложений [5]. В сочетании с высокой напряженностью и температурой при эксплуатации эти факторы приводят к так называемому задержанному деформационно-коррозионному растрескиванию (ЗДКР) металла у поверхности раздела металл–среда [1, 6].

Ниже приведен расчет долговечности узла приварки после ремонта с учетом влияния вышеуказанных особенностей его нагружения при эксплуатации, основанный на предположении отсутствия трещиноподобных дефектов в зоне сварного шва. Полагаем, что в зоне ремонта механические свойства металла соответствуют исходным, т.е. наработка от предыдущей эксплуатации не учитывается. Это обусловлено, во-первых, тем, что конфигурация расчетной зоны рассматриваемого узла полностью соответствует исходной, во-вторых, для проведения ремонта применялись материалы, физико-механические свойства которых близки к свойствам материалов, используемых при изготовлении ПГ, и, в-третьих, технологии ремонта и изготовления, включая термообработки, также близки. В расчете принимаются во внимание наличие остаточных технологических напряжений (в данном случае сварочных), локальных дефектов типа пор, раковин, коррозионных язв или следов грубой механической обработки (подрезов), которые могут повысить уровень максимальных напряжений, а также снижение пластичности металла в результате воздействия рабочей среды и температуры.

Долговечность узла приварки в условиях повторно-статического нагружения можно рассчитать исходя из принципа суммирования повреждений в металле узла, полученных на каждом цикле нагружения за счет локального снижения (выработки) ресурса его пластичности. При этом следует учитывать только те циклы нагружения, которые вызывают упругопластическое деформирование металла.

Рассмотрим подробнее процессы упругопластической деформации в локальной области у дефекта (концентратора напряжений) и накопления вследствие этого поврежденности.

Анализ упругопластического деформирования материала в области дефекта. Выше указывалось, что при ГИ на прочность и плотность уровень максимальных напряжений в локальной приповерхностной области материала в “кармане” у галтельного перехода превышает предел текучести. Вне этой области в процессе нагрузки–разгрузки происходит упругое деформирование материала. Следовательно, при высоких уровнях нагрузки цикли-

ческое неупругое деформирование в указанной области включает повышение деформации и ее пластической составляющей при увеличении нагрузки на узел приварки и ее снижении, сопровождающемся пластической деформацией в обратном направлении, при полной разгрузке. При этом максимальный уровень неупругих деформаций в цикле имеет место вблизи концентраторов (дефектов).

На рис. 2 приведена схема нагружения материала в окрестности дефекта. Как видно, упругое деформирование материала с локальным концентратором (дефект схематизирован круговой выборкой малого радиуса) приводит к изменению расстояния между точками материала A и B в соответствии с действующим уровнем нагрузки. В окрестности дефекта возникает концентрация напряжений с максимальным уровнем по линии $C-C$. Локальное упругопластическое деформирование материала (при его малом размере по сравнению с упругодеформируемым объемом) несущественно влияет на среднюю деформацию вдоль линии $A-B$, поскольку разгрузка способствует тому, что расстояние между фиксированными точками A и B становится исходным. Следовательно, величина общей деформации при росте нагрузки равна деформации обратного знака при разгрузке.

Если локальное напряжение при первом нагружении (растяжении) превышает предел текучести, т.е. там возникает пластическая деформация, то при последующей разгрузке в этой области появляются остаточные напряжения противоположного знака (сжатия), которые влияют на уровень напряжений при последующих циклах нагружения. Максимальная величина таких напряжений может быть принята равной пределу текучести материала, если пренебречь деформационным упрочнением. Остаточные напряжения, возникшие в результате нагрузки–разгрузки, снижают величину растягивающих напряжений при последующем растяжении и повышают уровень сжимающих напряжений при последующем сжатии. Таким образом, уровень локальной упругопластической деформации зависит от величины и знака остаточных напряжений, вызванных предшествующими циклами нагружения.

На рис. 3 приведена диаграмма деформирования материала в локальной области в координатах напряжение – деформация для циклов нагрузки, приводящей к напряжениям выше предела текучести, и последующей разгрузки.

Первый и последующие циклы нагрузки, соответствующие ГИ на прочность (давление в первом контуре $p_1 = 25$ МПа, во втором $p_2 = 11$ МПа) и на плотность ($p_1 = 18$ МПа, $p_2 = 8$ МПа), согласно расчетам с учетом концентрации напряжений в окрестности дефектов приводят к пластическим деформациям растяжения в локальной области материала шва на поверхности “кармана” в области сопряжения галтели с цилиндрической внутренней поверхностью патрубка. При разгрузке (деформация в данной области возвращается до нулевого уровня) возникают остаточные напряжения сжатия, равные пределу текучести материала (рис. 3). Последующие циклы нагружения с уровнем растягивающих напряжений менее удвоенного предела текучести не вызывают пластической деформации и не изменяют уровень остаточных напряжений, сохраняя его на уровне предела текучести (при этом общий уровень напряжений изменяется в пределах линии BE).

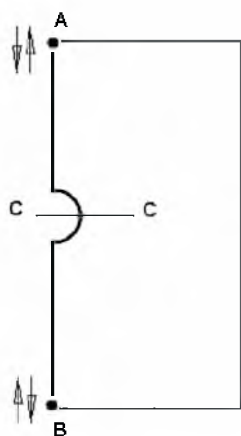


Рис. 2

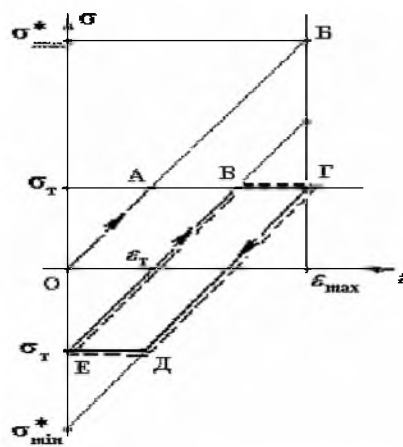


Рис. 3

Рис. 2. Схема жесткого нагружения материала в области концентратора (упругое перемещение точек A и B определяется внешней нагрузкой).

Рис. 3. Схема процесса деформирования металла в локальной области при напряжениях, превышающих предел текучести.

В процессе первого нагружения до максимального условного упругого напряжения σ_{\max}^* (на рис. 3 линия OAB), определенного с учетом локальной концентрации напряжений у дефектов, при напряжении, равном пределу текучести, начинается развитие пластического течения (линия $AB\Gamma$). При последующей разгрузке до минимального условного упругого напряжения σ_{\min}^* (линия $\Gamma Д$) при напряжении сжатия, равном пределу текучести, начинается развитие пластического течения, снижающего общую деформацию до нуля (линия $ДЕ$). Величина пластической деформации на участках AG и $ДЕ$ определяется уровнем максимальной условной упругой деформации ε_{\max} , соответствующей максимальному условному упругому напряжению σ_{\max}^* , рассчитываемому с учетом коэффициента концентрации K_α в окрестности дефектов: $\sigma_{\max}^* = K_\alpha \sigma_{\max}$, и деформации ε_T , которая соответствует пределу текучести материала σ_T при расчетной температуре:

$$\varepsilon_{AG}^p = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_T; \quad \varepsilon_{B\Gamma}^p = \varepsilon_{ДЕ}^p = \varepsilon_{\max} - 2\varepsilon_T.$$

Полная накопленная пластическая деформация за первый и последующие циклы нагрузка–разгрузка постоянной интенсивности соответственно равна:

$$\varepsilon_{i1}^p = 2\varepsilon_{\max} - 3\varepsilon_T; \quad \varepsilon_i^p = 2\varepsilon_{\max} - 4\varepsilon_T. \quad (1)$$

Если в предшествующем цикле нагружения $\varepsilon_i^p \geq 2\varepsilon_T$, а в последующих $\varepsilon_i^p < 2\varepsilon_T$, то пластическая деформация в последних не накапливается.

Методика расчета повреждения материала узла приварки по исчерпанию ресурса предельной пластичности. Величину повреждения материала узла приварки по исчерпанию ресурса предельной пластичности в условиях повторно-статического нагружения консервативно можно определить на основании анализа данных работ [7–9].

Если принять, что Z^T – предельная, или располагаемая пластичность материала, соответствующая заданным условиям эксплуатации (температура, среда), ε_i^P – полная пластическая деформация за цикл повторно-статического нагружения, определяемая из зависимостей (1), то число таких же циклов до разрушения $[N_{pi}]$ в результате исчерпания ресурса предельной пластичности можно определить следующим образом:

$$[N_{pi}] = Z^T / \varepsilon_i^P.$$

Исходя из этого накопленное повреждение за один цикл повторно-статического нагружения, при котором полная пластическая деформация достигала значения ε_i^P , составит

$$A_i = 1/N_{pi}.$$

Проведенный выше анализ показал, что с учетом влияния концентрации напряжений в окрестности дефектов суммарная пластическая деформация (накопленное повреждение) возрастает при ГИ на прочность и плотность, а также при выходе на режим нормальных условий эксплуатации и последующей разгрузке. При амплитуде напряжений в циклах нагружения ниже предела текучести накопленное повреждение материала также возрастает и может быть рассчитано по методике, рекомендуемой в [4].

Для расчета долговечности узла приварки наряду с определением максимальных напряжений при различных испытаниях и режимах эксплуатации необходимо оценить предельную пластичность материала с учетом реальных условий эксплуатации, в частности рабочей среды и температуры.

Согласно анализу приведенных в литературных источниках [1, 6] экспериментальных данных, в качестве предельной пластичности с учетом влияния ЗДКР для стали 10ГН2МФА может быть принята минимальная величина относительного сужения поперечного сечения образца при статическом растяжении $Z^T = 10\%$.

В табл. 2 представлены результаты расчета пластической деформации и соответствующего повреждения за один цикл нагружения, используемые при оценке долговечности узла приварки. Величину условных упругих напряжений σ_{\max}^* находим исходя из максимальных расчетных напряжений σ_{\max} в области галтельного перехода на поверхности “кармана” [3] с учетом концентрации в окрестности дефектов ($K_\sigma = 2,23$ [4]). Напряжения σ_{\max} определялись как разность первого и третьего главных напряжений, что соответствует теории максимальных касательных напряжений.

Т а б л и ц а 2

Результаты расчета пластической деформации и соответствующего повреждения за один цикл нагружения

| Режим | p , МПа | σ_{\max}^* , МПа | ϵ_i^p | $[N_{pi}]$ | A_i |
|---|----------------------|-------------------------|----------------|------------|--------|
| Гидроиспытания на прочность (первый цикл после ремонта) | $p_1 = 25, p_2 = 11$ | 1860 | 0,01383 | 7 | 0,1383 |
| на плотность (первый цикл после ремонта) | $p_1 = 18, p_2 = 8$ | 1581 | 0,01104 | 9 | 0,1104 |
| на прочность | $p_1 = 25, p_2 = 11$ | 1095 | 0,00459 | 22 | 0,0459 |
| на плотность | $p_1 = 18, p_2 = 8$ | 816 | 0,00180 | 56 | 0,0180 |
| Выход на режим эксплуатации | $p_1 = 16, p_2 = 6$ | 794 | 0,00194 | 52 | 0,0194 |
| Испытания ГЦН | $p_1 = 16, p_2 = 6$ | 618 | 0 | – | 0 |

При расчете максимальных напряжений в первом цикле нагружения после ремонта узла учитывались остаточные сварочные напряжения путем увеличения расчетных напряжений на величину, равную пределу текучести материала при температуре 20°C [4].

Из табл. 2 следует, что накопление повреждений в материале узла приварки за счет исчерпания ресурса пластичности происходит при циклах ГИ и выхода на режим нормальных условий эксплуатации. При испытании ГЦН уровень поврежденности согласно данному критерию не увеличивается, так как отсутствует локальная пластическая деформация (максимальное напряжение с учетом концентрации напряжений не превышает удвоенный предел текучести).

Консервативная оценка долговечности узла приварки. При консервативной оценке долговечности материала в рассматриваемой области сопряжения галтели с внутренней цилиндрической поверхностью патрубка ПП по предельной пластичности необходимо по данным табл. 2 определить суммарную накопленную пластическую деформацию (повреждение) в результате упругопластических циклов реального нагружения с учетом ЗДКР, концентрации напряжений в окрестности дефектов и остаточных напряжений после ремонта. Однако расчет будет излишне консервативен, поскольку предполагается, что снижение пластических свойств металла вследствие ЗДКР до уровня $Z^T = 10\%$ происходит сразу после окончания ремонтно-восстановительных работ (в действительности это происходит со временем, по мере установления соответствующих коррозионных условий в области “кармана”).

Поэтому при расчете повреждения материала во время циклов нагружения, следующих непосредственно после ремонта узла приварки (ГИ, выход на режим эксплуатации после ремонта), необходимо учитывать, что снижения пластичности материала от исходного уровня $Z_{исх}^T = 55\%$ (по данным [4]) до $Z^T = 10\%$ вследствие влияния ЗДКР еще не произошло. Таким образом, для расчета накопленного повреждения за время первого цикла нагружения (ГИ на прочность после ремонта) следует использовать

результаты табл. 2, уменьшенные на величину $Z_{исх}^T / Z^T = 5,5$. Для всех последующих циклов нагружения данные не корректируются.

Как видно, расчетная долговечность узла приварки определяется количеством циклов ГИ и выходов на режим эксплуатации (табл. 2). Например, за четыре года предстоящей эксплуатации после ремонта с ориентировочным числом нагружений N_i , определенным по данным предыдущей эксплуатации, значение накопленного повреждения A в зоне ремонта по критерию предельной пластичности может составить 0,3805 (табл. 3). Из расчетов следует, что третья часть всего накопленного повреждения за рассматриваемый период достигается во время первого цикла нагружения – ГИ после ремонта.

Т а б л и ц а 3

Расчет накопленного повреждения в области узла приварки в течение четырех лет эксплуатации после ремонта

| Режим | p , МПа | A_i | N_i | $A_i N_i$ |
|--|----------------------|--------|-------|--------------|
| Гидроиспытания | | | | |
| на прочность (первый цикл, после ремонта) | $p_1 = 25, p_2 = 11$ | 0,0251 | 1 | 0,0251 |
| на прочность | $p_1 = 25, p_2 = 11$ | 0,0459 | 2 | 0,0918 |
| на плотность | $p_1 = 18, p_2 = 8$ | 0,0180 | 5 | 0,0901 |
| Выход на режим эксплуатации | $p_1 = 16, p_2 = 6$ | 0,0194 | 9 | 0,1745 |
| | | | | $A = 0,3805$ |

Приведенная в табл. 3 оценка накопленного повреждения является неполной, поскольку не учитывались циклы нагружения, включая вибрационные нагрузки, которые не приводят к локальной пластической деформации материала узла приварки и в соответствии с предложенной методикой расчета долговечности по ресурсу пластичности не влияют на нее. Вклад этих циклов нагружения в итоговое накопленное повреждение материала узла приварки может быть рассчитан согласно [4].

Оценка повреждения материала узла приварки за четыре года эксплуатации показала, что полное исчерпание ресурса пластичности материала, т.е. полное повреждение узла, может произойти при длительности эксплуатации ПГ, составляющей примерно десять лет, что фактически наблюдалось на практике.

Заключение. Предложенный подход к расчету накопленного повреждения материала в процессе повторно-статических циклов упругопластического нагружения элементов конструкции, основанный на учете реального НДС, исчерпания ресурса пластичности материала, условий эксплуатации (коррозионное воздействие среды и высокой температуры), локальной концентрации напряжений и влияния остаточных напряжений после сварки, позволяет выполнить обоснованную консервативную оценку долговечности элементов конструкций. Анализ результатов расчетов долговечности узла приварки “горячего” коллектора к патрубку ПГ свидетельствует о возможности продления срока его эксплуатации путем оптимизации рабочих режимов.

Резюме

Наведено методику розрахунку довговічності зварного з'єднання колектора з патрубком парогенератора, що базується на урахуванні витрати ресурсу пластичності матеріалу в процесі повторно-статичних циклів пружно-пластичного навантаження, умов експлуатації, локальної концентрації напружень та залишкових напружень після зварювання.

1. *Зубченко А. С., Разыграев Н. П., Харина И. Л. и др.* Результаты исследований характера эксплуатационных повреждений металла в зонах сварных узлов коллекторов с патрубками Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000: Тр. VII Междунар. конф. "Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС". – С.-Петербург, 2002. – С. 193 – 198.
2. *Лукаевич Б. И., Денисов В. В., Качалин Н. А. и др.* Исследование причин повреждения сварного шва № 111 ПГВ-1000 (оценка влияния технологии): Тр. III Междунар. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". – Подольск, 2003. – Т. 3. – С. 52 – 77.
3. *Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др.* Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения "горячего" коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС // Пробл. прочности. – 2003. – № 5. – С. 142 – 153.
4. *ПНАЭ Г-7-002-86.* Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
5. *Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др.* Оценка термоциклического нагружения в узле приварки "горячего" коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 // Пробл. прочности. – 2002. – № 1. – С. 146 – 148.
6. *Харина И. Л.* Результаты исследования влияния внешних факторов среды на стойкость против замедленного деформационного коррозионного растрескивания низколегированных сталей в воде высоких параметров: Тр. V Междунар. конф. "Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС". – С.-Петербург, 2000. – Т. 2. – С. 243 – 257.
7. *Серенсен С. В., Шнейдерович Р. М., Гусенков А. П. и др.* Прочность при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1975. – 288 с.
8. *Стрижало В. А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – Киев: Наук. думка, 1978. – 238 с.
9. *Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др.* Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.

Поступила 15. 07. 2003