

Фрактография эксплуатационного разрушения металла в зоне сварного соединения № 111 парогенератора энергоблока ВВЭР-1000

А. Я. Красовский, И. В. Орыняк, Е. Е. Гопкало, А. В. Богдан, И. А. Маковецкая

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

На основании комплексных исследований разрушения металла в зоне сварного соединения № 111 парогенератора энергоблока ВВЭР-1000 после эксплуатации установлены микро-механизмы распространения трещины (сочетание коррозионного растрескивания и коррозионной усталости). Проведены количественные измерения шага усталостных бороздок. Сделаны ориентировочные оценки реальных эксплуатационных условий нагружения зоны “кармана” коллектора, в которой происходит зарождение и распространение трещины коррозионной усталости.

Ключевые слова: коллектор парогенератора, трещина, фрактография, бороздки усталости, коррозионная усталость, разрушение.

Введение. Эксплуатационные повреждения в области узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку парогенератора ПГВ-1000 АЭС с ВВЭР-1000 (сварное соединение № 111) существенно уменьшают ресурс парогенераторов АЭС. Чаще всего такие повреждения связаны с возникновением трещин. Несмотря на многочисленные исследования [1–7], проблема появления и развития разрушений в сварном соединении № 111 (СС № 111) продолжает оставаться актуальной. Коллектор и патрубок Ду 1200 парогенератора (ПГ) – это крупногабаритные сварные конструкции, изготовленные из низколегированной стали 10ГН2МФА. Узел приварки “горячего” коллектора к корпусу парогенератора показан на рис. 1.

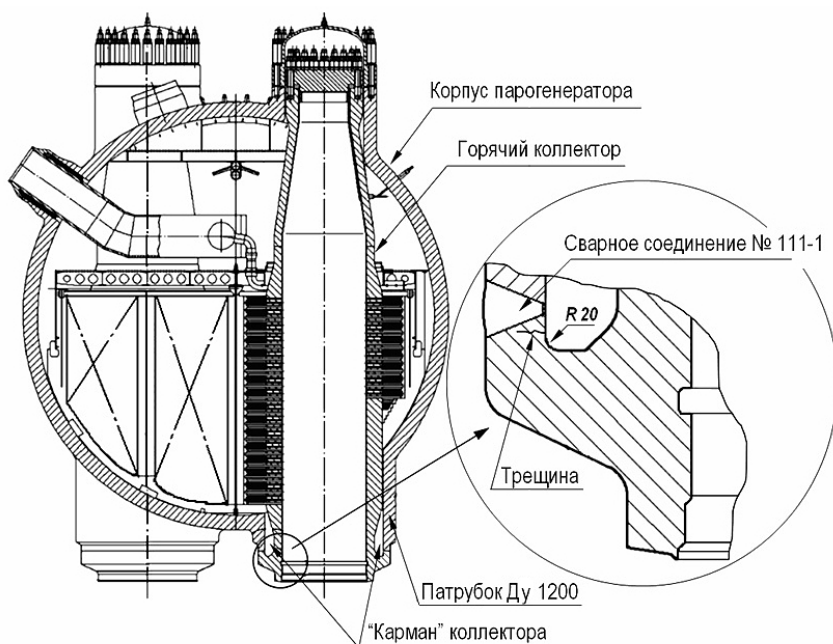


Рис. 1. Поперечный разрез парогенератора ПГВ-1000 по “горячему” коллектору.

Методы, материалы и результаты исследований. Объектом исследования служил фрагмент материала (темплет № 1) с повреждением (трещиной), которое было обнаружено методом ультразвукового контроля в узле приварки коллектора к патрубку парогенератора. Темплет № 1 размером 72×39×10 мм вырезан из тела горячего коллектора с зоной СС № 111-1 парогенератора № 3 энергоблока № 4 Запорожской АЭС после эксплуатации парогенератора в течение 158736 рабочих часов. Схема вырезки темплета представлена на рис. 2.

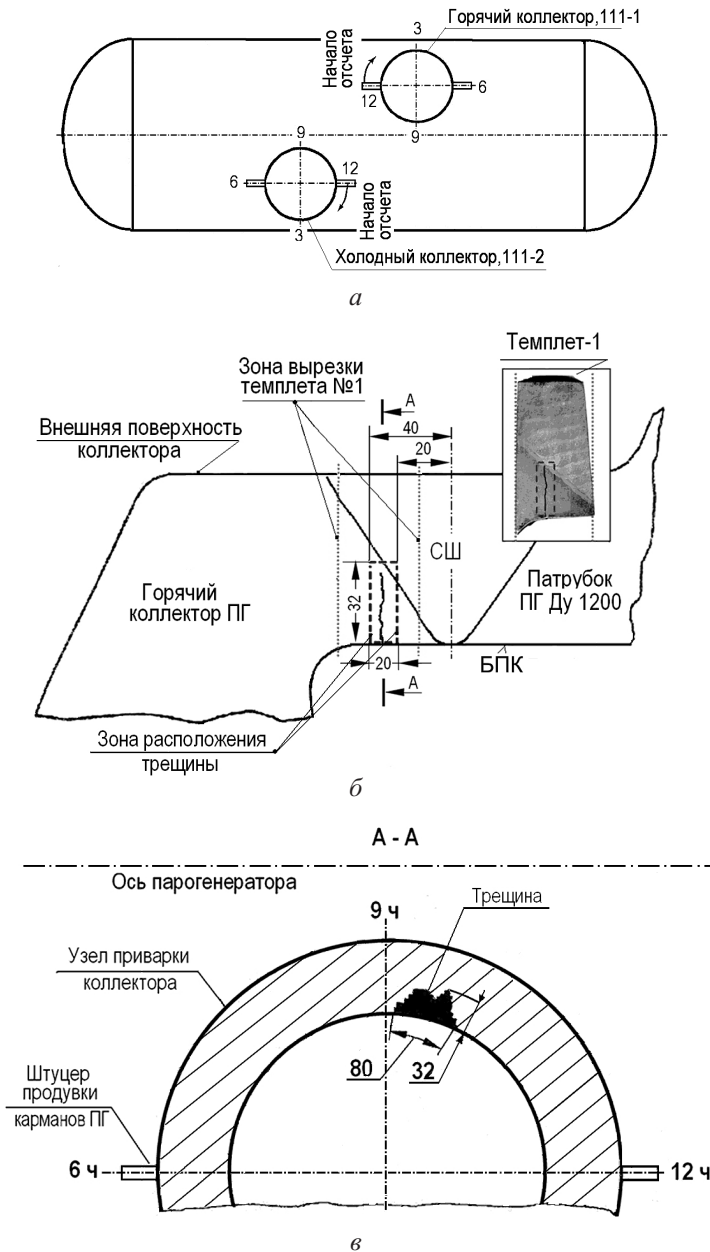


Рис. 2. Схема вырезки темплета № 1 с трещиной: а – схема парогенератора в плане; б – фрагмент сварного соединения № 111-1 с трещиной; в – форма и размеры трещины (сечение А–А) по результатам ультразвукового контроля (СШ – сварной шов, БПК – боковая поверхность “кармана”).

Проведены комплексные исследования металла темплета № 1, включающие фрактографический и металлографический анализы, соответственно на модернизированном растровом электронном микроскопе РЭМ-100У и световом микроскопе АХИОVERT 40-МАТ. Микрошлифы готовили в плоскости поперечного сечения сварного соединения. Микротвердость фазовых составляющих измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,49 Н согласно ГОСТ 9450–76.

Панорамное изображение профиля исследуемой трещины (далее – МТ – магистральная трещина) представлено на рис. 3. В исследуемом сечении МТ наблюдаются элементы ее ветвления (рис. 3,б–д).

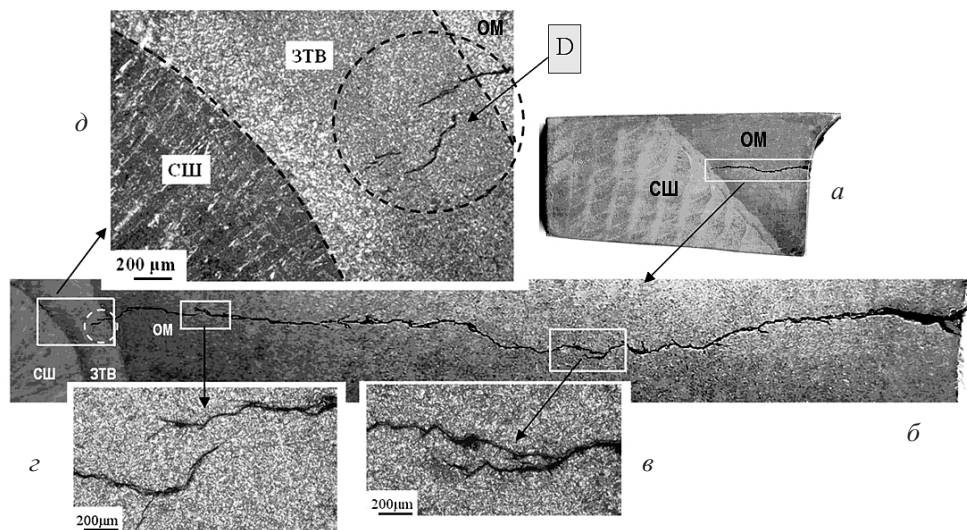


Рис. 3. Темплет № 1 с трещиной в плоскости поперечного сечения сварного соединения после выявления микроструктуры: а – общий вид темплета; б – профиль трещины; в–д – отдельные фрагменты трещины (D – зона вершины трещины, ЗТВ – зона термического влияния, OM – основной металл).

Металлографические исследования в рассматриваемом сечении микрошлифа не выявили дефектов сварки ни в металле шва, ни в его окрестности (рис. 3). Сварной шов представляет собой многопроходный многослойный стыковой шов с V-образной разделкой кромок (рис. 3,а). Металл шва отличается типичной для многопроходной сварки структурой. Металлографический анализ показал, что он имеет гетерогенное строение и состоит из преобладающих участков с литой столбчатой структурой (рис. 3,д, 4,а), чередующихся с мелкозернистыми участками, где не выявляется направленность структуры. Микротвердость металла сварного шва HV0.5 на участках столбчатых кристаллов изменяется в пределах 1834...2050 МПа, а на участках с мелкозернистой структурой – 1687...1942 МПа.

Зона термического влияния состоит из участков перегрева (участок “крупного” зерна с видманштеттовой структурой), нормализации (рис. 4,б,в) и неполной рекристаллизации. Ширина ЗТВ изменяется вдоль границы сварного шва и колеблется в диапазоне ~1200...1600 мкм. Ширина участка перегрева составляет ~200...300 мкм при среднем размере крупного зерна ~50...60 мкм (рис. 3,б) с микротвердостью HV0.5 ~1805...2246 МПа. Участок нормализации при ширине ~1000...1300 мкм характеризуется мелкозернистой структурой со средним размером зерен ~5...8 мкм (рис. 4,в) и микротвердостью HV0.5 ~1687...2050 МПа.

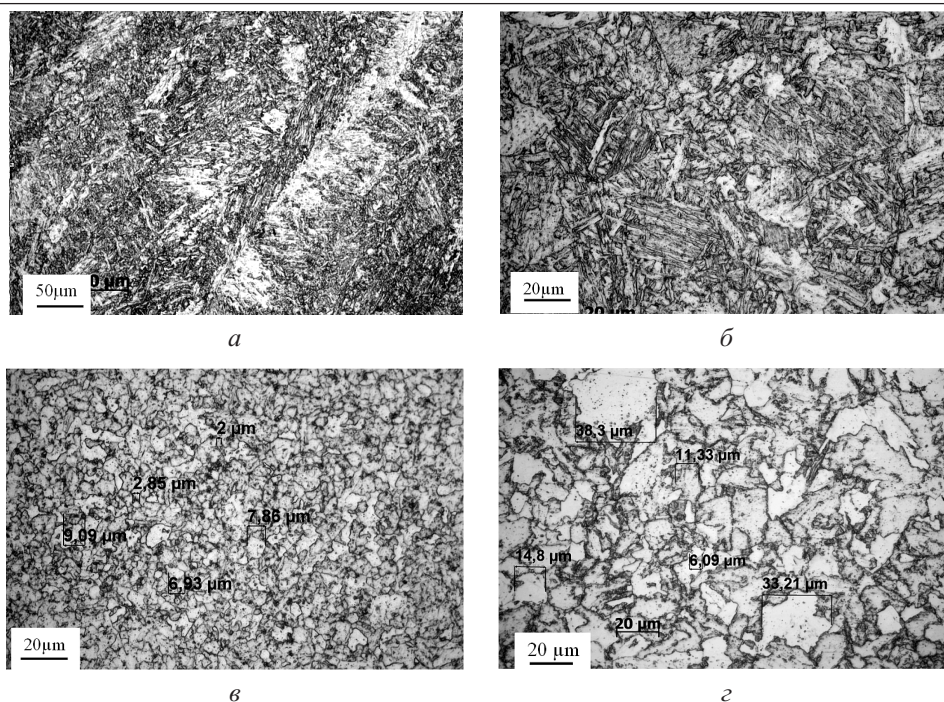


Рис. 4. Фрагменты микроструктуры СС № 111-1: *а* – зона СШ; *б* – ЗТВ (участок перегрева); *в* – ЗТВ (участок нормализации); *з* – зона ОМ.

Микроструктура основного металла СС № 111-1 со стороны коллектора вблизи трещины представляет собой в основном феррит с незначительной долей сферического перлита и бейнита отпуска. Зерна феррита характеризуются (в разной степени) наличием мелкодисперсной карбидной фазы (рис. 4,з). При общей разнотерности 5...35 мкм средний размер ферритных зерен составляет 15 мкм. Микротвердость HV0.5 изменяется в пределах ~1716...1883 МПа.

На рис. 5 показана схема вырезки образца из темплета № 1, позволившая раскрыть исследуемую трещину для фрактографического анализа. Перед фрактографическими исследованиями поверхность излома подвергали специальной обработке в ультразвуковом диспергаторе УЗДН, чтобы очистить последнюю от слоя продуктов коррозии и других отложений (рис. 5,в).

Зарождение трещины в узле приварки горячего коллектора к патрубку Ду1200 ПГ происходило в зоне основного металла коллектора на боковой поверхности его “кармана”, непосредственно контактировавшей с водой второго контура, на участке между галтельным переходом кармана коллектора и корнем сварного шва № 111-1 (у начала галтельного перехода). Магистральная трещина распространялась практически по нормали к внешней поверхности коллектора до зоны термического влияния (на участке нормализации) на расстоянии ~400...600 мкм от линии сплавления (рис. 2, рис. 3). Измеренная глубина трещины в исследуемом сечении микрошлифа составила ~21,2 мм.

На боковой поверхности кармана вблизи основания МТ обнаружены следы механической обработки поверхности и коррозионных повреждений (общая коррозия, питтинги, язвы), как это видно из рис. 6,в-д (например, некоторые коррозионные язвы достигали глубины ~0,8 мм – рис. 6,д). Множественные коррозионные дефекты, являясь концентраторами напряжений, видимо, послужили очагами зарождения исследуемой МТ (рис. 6,б,в).

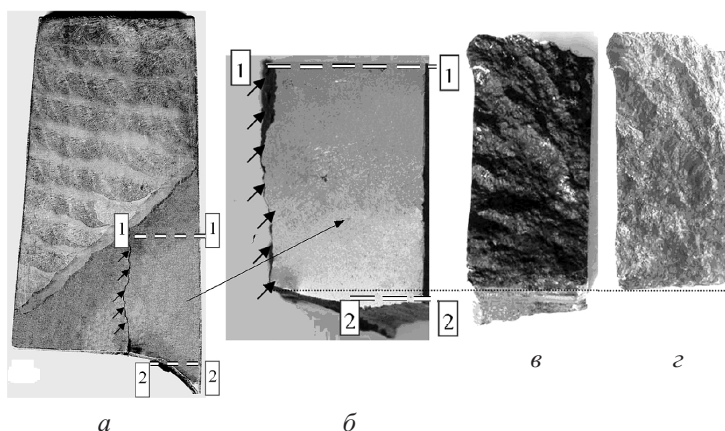


Рис. 5. Схема вырезки образца из темплета № 1 для фрактографического анализа: *а* – вид темплета в плоскости микрошлифа; *б* – вид фрагмента темплета в плоскости микрошлифа после раскрытия трещины; *в, з* – поверхность раскрытой трещины перед снятием продуктов коррозии и после очистки соответственно (линии 1-1 и 2-2 – следы реза; стрелками отмечен профиль трещины).

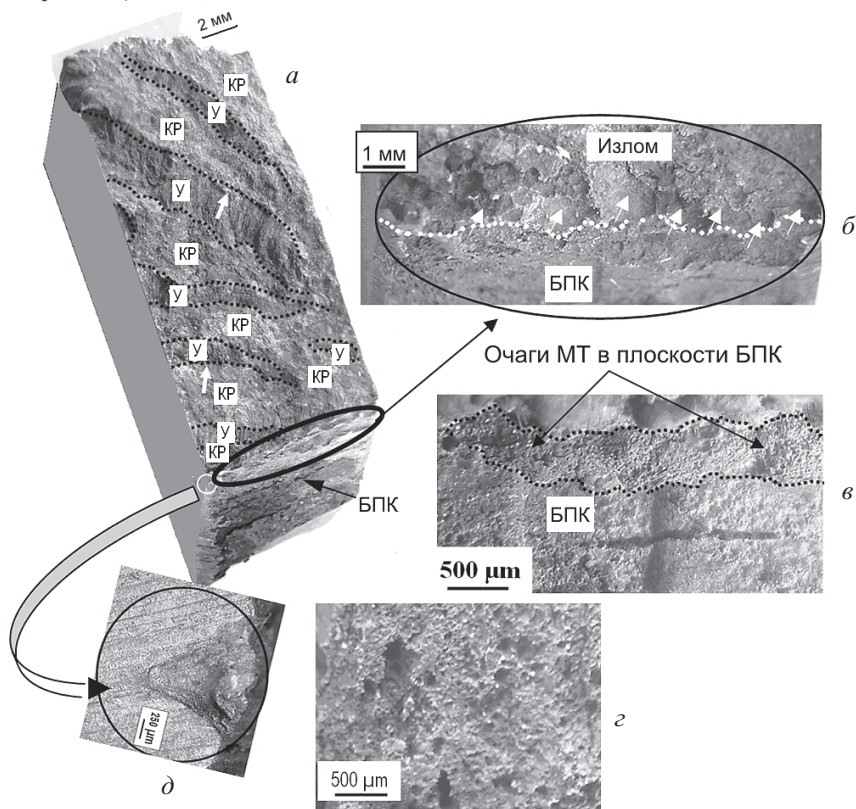
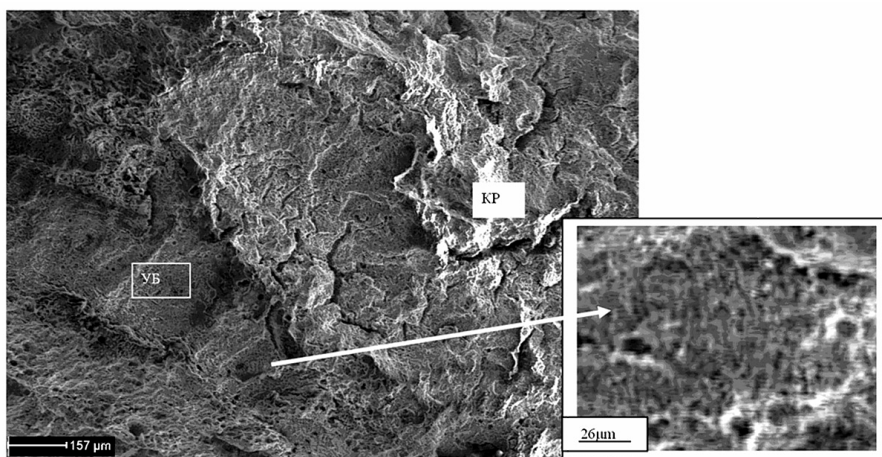


Рис. 6. Особенности зарождения и распространения МТ: *а* – фрагмент темплета с раскрытой трещиной (пунктирными линиями обозначены следы остановок фронта МТ, светлыми стрелками указаны направления МТ, *У* – зона усталости, *КР* – зона коррозионного растрескивания); *б* – очаги МТ в плоскостях разрушения и *БПК* (пунктирной линией обозначена граница между основанием МТ и *БПК*, светлыми стрелками показаны очаги МТ в плоскости разрушения); *в, з* – коррозионные дефекты в плоскости *БПК*; *д* – профиль коррозионной язвы в сечении, перпендикулярном *БПК*.

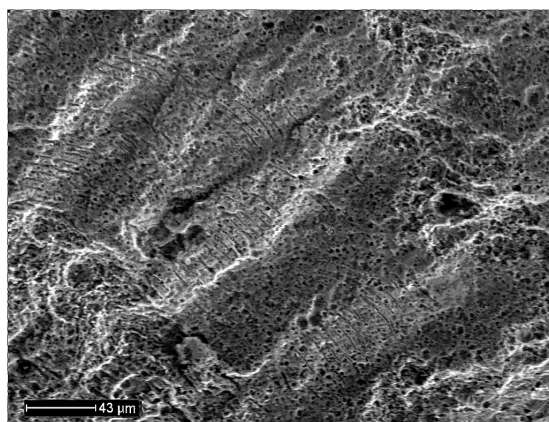
Как видно из рис. 6,а, макроизлом неоднородный. Макрорельеф характеризуется наличием зон с различным уровнем шероховатости. На поверхности излома наблюдаются следы остановок и промежуточных переориентаций движения фронта МТ, разграничивающие участки разрушения с разной морфологией.

Электронно-микроскопические исследования морфологии поверхности трещины в пределах вырезанного фрагмента темплетта позволили установить микромеханизмы распространения трещины, несмотря на то что микрорельеф излома был в разной степени поврежден точечной коррозией под воздействием водной среды в процессе распространения трещины.

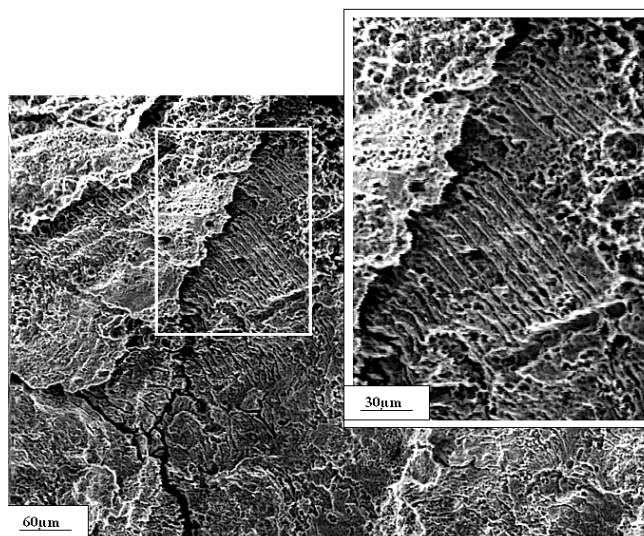
При этом на микроуровне также наблюдается чередование элементов рельефа с различной морфологией: чередование участков коррозионного растрескивания (КР) с преобладающим грубым микрорельефом и участков с усталостными бороздками (УБ) со сглаженным микрорельефом в виде террас, соединенных малорельефными ступеньками сдвига (например, рис. 7,а,б). Усталостные бороздки носят хрупкий характер, что свойственно бороздкам, сформированным в коррозионной среде (рис. 7). Следует отметить, что следы переориентировки направления роста макротрещины совпадают с границами перехода от сглаженных микроучастков с УБ к участкам с КР (рис. 6,а и 7,а), хотя и в зонах усталостного разрушения наблюдаются, в разной степени, признаки коррозионных повреждений (общая коррозия, микропиттинг и КР). В целом трещина развивалась без явно выраженных пластических деформаций.



а



б



6

Рис. 7. Характерные микрофрактограммы поверхности разрушения в пределах вырезанного фрагмента темплета.

Таким образом, характер рельефа поверхности исследуемой трещины сложный, что обусловлено взаимодействием механизмов коррозионного растрескивания и коррозионной усталости под влиянием переменных нагрузок и агрессивной среды в условиях эксплуатации.

Обсуждение результатов. Поскольку усталостные бороздки на поверхности разрушения представляют собой следы последовательного, цикл за циклом, положения фронта трещины, особый интерес вызывает связь ширины усталостных бороздок δ (шаг бороздки) с макроскопической скоростью роста усталостной трещины da/dN . Совпадение указанных величин обычно наблюдается [8, 9] на среднем участке кинетической диаграммы роста усталостной трещины, о чем свидетельствует и их хорошее соответствие для исследованной стали (рис. 8). Обе микрофрактограммы на рис. 8 соответствуют экспериментальной точке *A* на графике, а именно: $da/dN = \delta \cong \cong 1$ мкм на среднем участке кинетической диаграммы при $\Delta K \cong 46$ МПа \cdot м^{1/2}. Это позволяет более обоснованно анализировать долговечность конструкции на стадии распространения усталостной трещины. Приведенные на рис. 8 данные представляют собой базовые диаграммы роста трещин усталости, и на них, ввиду высокой частоты нагружения, влияние коррозионной среды практически не проявляется (различие между аппроксимирующими линиями 1 и 2 незначительно). Поэтому сопоставление этих графиков с аналогичными по характеру кривыми, полученными для стали 10ГН2МФА при более низких частотах нагружения (рис. 9), позволяет обособить влияние среды.

Измерения шага бороздок δ проведены на разных участках эксплуатационного излома (рис. 7). Установлено, что в пределах изученной глубины трещины 21,2 мм фактические значения шага бороздок с увеличением глубины практически мало отличались и составляли 3...5 мкм. Если для исследуемого фрагмента излома на основании вышеизложенного считать, что шаг усталостных бороздок соответствует фактическому приросту трещины в глубь материала за цикл нагружения da/dN , то измеренные значения δ можно сопоставить с величиной da/dN , соответствующей условиям эксплуатации.

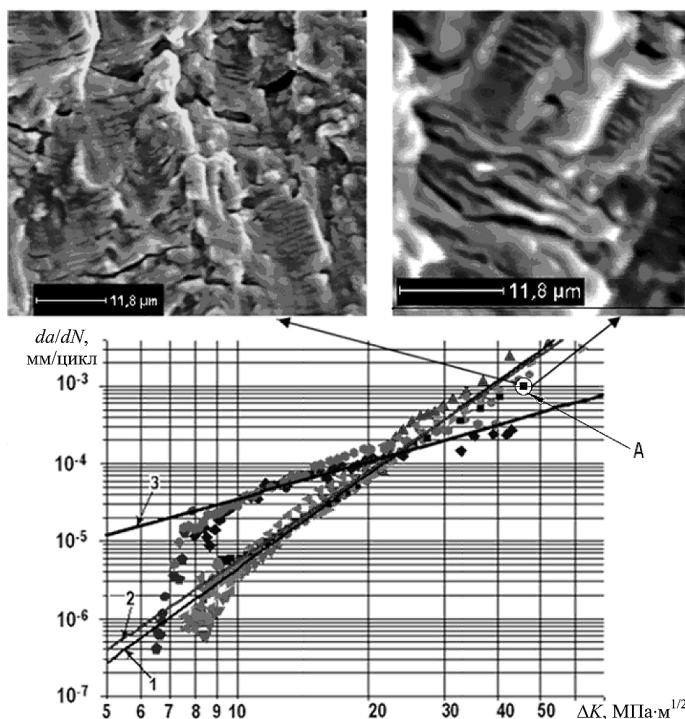


Рис. 8. Кинетические диаграммы усталостного разрушения стали 10ГН2МФА после эксплуатации в течение 28820 рабочих часов: 1 – на воздухе при $T = 20^\circ\text{C}$; 2 – в водной среде второго контура при $T = 20^\circ\text{C}$; 3 – на воздухе при $T = 270^\circ\text{C}$. (Стандартные компактные образцы СТ-0,5 толщиной 12,7 мм для внецентренного растяжения, асимметрия цикла $R = 0,1$, частота нагружения $f = 60$ Гц.)

На рис. 9 заштрихованная авторами настоящей работы горизонтальная полоса соответствует измеренному шагу бороздок 3...5 мкм, а соответствующая ей вертикальная полоса – средней эксплуатационной нагрузке $\Delta K = 23...28 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Полученные результаты позволяют сделать некоторые ориентировочные оценки реальных эксплуатационных условий нагружения зоны кармана, в которой происходят зарождение и рост трещин коррозионной усталости. Как известно, стадия зарождения трещины усталости может составлять от 95 (гладкие образцы) до 5% и меньше (при наличии острого концентратора) общей долговечности. В зоне сварного соединения № 111-1 кроме галтели эффективными концентраторами напряжений являются механические повреждения от режущего инструмента и коррозионные язвы (рис. 6). Поэтому в первом приближении можно пренебречь временем зарождения трещины, а также временем ее развития на участках коррозионного растрескивания (рис. 6,а), что ведет к предположению о стадии роста усталостной трещины как основном факторе, контролирующем долговечность рассматриваемого узла конструкции. На обследованной глубине трещины 21,2 мм при шаге бороздок от 3 до 5 мкм “укладывается” от 7067 до 4240 циклов нагружения. Отмеченное выше общее время эксплуатации парогенератора 158736 рабочих часов соответствует длительности цикла нагружения от 22,46 до 37,44 ч/цикл при среднем размахе нагрузки ΔK_1 от 23 до 28 МПа·м^{1/2}.

В другом, крайнем варианте приближения, можно предположить, что стадия зарождения трещины вместе со стадией ее роста по механизму коррозионного растрескивания занимает половину долговечности. Тогда оценка длительности цикла

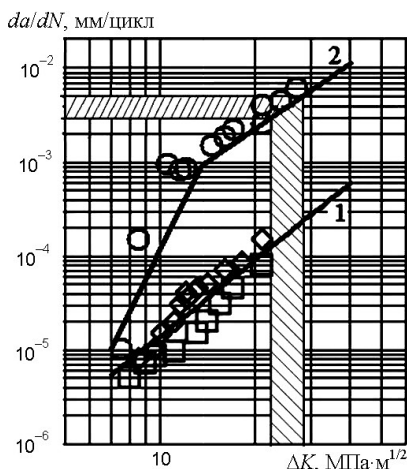


Рис. 9. Кинетические диаграммы коррозионно-усталостного разрушения стали 10ГН2МФА [10]: кривая 1 – испытания на воздухе, $R = 0$; \square – $T = 20^\circ\text{C}$, $f = 1$ Гц, $R = 0,5$; \diamond – $T = 290^\circ\text{C}$, $f = 0,1$ Гц, $R = 0,7$; кривая 2 – ASME CODE; \circ – вода, $T = 290^\circ\text{C}$, $f = 0,017$ Гц, $R = 0,7$.

нагрузки уменьшается вдвое и составляет от 11,23 до 18,72 ч/цикл. Обе оценки дают основания полагать, что частота нагружения в процессе описываемого коррозионно-усталостного разрушения составляет 1...2 цикла в сутки.

Анализируя эти данные, необходимо учитывать, что рельеф изученной поверхности излома образован в результате эксплуатационного режима нагружения, вызывавшего разные уровни напряжений в металле. Причем те зоны на поверхности трещины, которые покрыты регулярными бороздками усталости, однозначно свидетельствуют о том, что циклические напряжения играют важную роль в процессе распространения трещины. Однако не следует исключать и взаимовлияние разных механизмов разрушения. Это означает, например, что при коррозионной усталости коррозия ускоряет процесс усталости, а действие циклических нагрузок, в свою очередь, ускоряет процесс коррозии.

Выводы

1. Металлографические исследования сварного соединения № 111-1 не выявили дефектов сварки ни в металле шва, ни в его окрестности.
2. Зарождение эксплуатационной трещины в узле приварки горячего коллектора к патрубку Ду1200 парогенератора № 3 энергоблока № 4 Запорожской АЭС происходило на боковой поверхности его кармана на участке основного металла между галтельным переходом кармана и корнем сварного шва № 111-1 (у начала галтельного перехода). Трещина распространялась практически по нормали к внешней поверхности коллектора.
3. С помощью фрактографических исследований изучена на микроуровне морфология поверхности трещины в пределах вырезанного фрагмента темплета, что позволило установить микромеханизмы распространения трещины и провести количественные измерения шага усталостных бороздок (δ).
4. Наличие бороздок усталости на поверхности разрушения является доказательством того, что циклическая составляющая нагружений играет важную роль в процессе роста трещины.
5. Ориентировочные оценки циклической составляющей нагружений зоны разрушения кармана коллектора показали, что ее изменения происходят с частотой приблизительно 1...2 цикла в сутки при среднем размахе нагрузки ΔK_1 от 23 до 28 МПа · м^{1/2}.

Резюме

На основі комплексних досліджень руйнування металу в зоні зварного з'єднання № 111 парогенератора енергоблоку ВВЕР-1000 після експлуатації встановлено мікро-механізми поширення тріщини (поєднання корозійного розтріскування і корозійної втоми). Проведено кількісні вимірювання кроку втомних борозенок. Зроблено орієнтовні оцінки реальних експлуатаційних умов навантаження зони “кишені” колектора, в якій відбувається зародження і поширення тріщини корозійної втоми.

1. Харченко С. А., Трунов Н. Б., Денисов В. В., Коротаев Н. Ф. Анализ причин повреждения металла в зоне сварного шва № 111 парогенераторов ПГВ-1000М // Сб. тр. VII Междунар. сем. по горизонтальным парогенераторам. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2006. – Т. 1. – С. 171–180.
2. Харченко С. А., Лякишев С. Л., Денисов В. В., Петрова О. Ю. Анализ факторов, приводящих к повреждению коллекторов парогенератора ПГВ-1000М // Сб. ВАНТ. Сер. “Обеспечение безопасности АЭС”. – 2007. – Вып. 19. – С. 55–68.
3. Неклюдов И. М., Ажажа В. М., Ожигов Л. С., Митрофанов А. С. Эксплуатационные повреждения теплообменных трубок и сварных соединений в парогенераторах энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 // Пробл. прочности. – 2008. – № 2. – С. 105–111.
4. Ожигов Л. С., Митрофанов А. С., Крайнюк Є. О. та ін. Про причини uszkodження зварних з'єднань № 111 парогенераторів ПГВ-1000 // Вісн. ТДТУ. – 2009. – 14, № 4. – С. 78–83.
5. Харченко С. А., Трунов Н. Б., Коротаев Н. Ф., Лякишев С. Л. Результаты работ по исследованию причин повреждения металла в районе сварного шва приварки коллектора первого контура к корпусу парогенератора и разработка компенсирующих мероприятий // Сб. тр. VIII Междунар. сем. по горизонтальным парогенераторам. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2010. – SGPG2010-021. – 16 с.
6. Гетман А. Ф., Усанов А. И., Лукаевич Б. И. и др. Причины повреждений сварных швов № 111 ПГВ-1000 // Сб. тр. VIII Междунар. сем. по горизонтальным парогенераторам. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2010. – SGPG2010-017. – 18 с.
7. Неклюдов И. М., Ожигов Л. С., Митрофанов А. С. и др. Особенности повреждаемости сварных соединений № 111 в парогенераторах энергоблоков ВВЭР-1000 // Сб. тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2013. – MNTK2013-037. – 7 с.
8. Красовский А. Я., Остаи О. П., Степаненко В. А., Ярема С. Я. Влияние низких температур на скорость и микрофрактографические особенности развития усталостной трещины в малоуглеродистой стали // Пробл. прочности. – 1977. – № 4. – С. 74–78.
9. МР 189-86. Расчеты и испытания на прочность. Метод оценки сопротивления металлических материалов усталостному разрушению по шагу усталостных бороздок. – М.: ВНИИНМАШ, 1986. – 36 с.
10. Казанцев А. Г., Ловчев В. Н., Гуцав Д. Ф. и др. Критерии инициации и развития коррозионных повреждений в узле приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000 ВВЭР // Сб. тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2013. – MNTK2013-187. – 13 с.

Поступила 22. 04. 2015