



## РОСТ КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН В КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 10ГН2МФА

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Л. И. МАРКАШОВА**, **О. В. МАХНЕНКО**, доктора техн. наук,  
**Е. Н. БЕРДНИКОВА**, **В. М. ШЕКЕРА**, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**А. С. ЗУБЧЕНКО**, д-р техн. наук («Гидропресс», г. Подольск, РФ)

Описана взаимосвязь между скоростью роста коррозионных трещин и коэффициентом интенсивности напряжений на основе диаграммы статической коррозионной трещиностойкости. Подтверждена основная рабочая гипотеза о дискретности роста трещины конструкционной стали.

*Ключевые слова:* сварные конструкции, парогенератор АЭС, диаграмма статической коррозионной трещиностойкости, конструкционная сталь, коррозионные трещины, электронная микроскопия, коэффициент интенсивности напряжений, водородное охрупчивание

Коррозионные трещины являются одними из наиболее опасных дефектов, которые образуются в современных стальных конструкциях длительного срока эксплуатации. В целом ряде случаев процесс зарождения и формирования таких дефектов трудно поддается определению, поэтому в зависимости от достаточно малых изменений конкретных факторов длительность этого процесса формирования коррозионных трещин может существенно меняться во времени.

В этих условиях имеет большое значение своевременное обнаружение сформированной коррозионной трещины и кинетика ее роста во времени при эксплуатации соответствующей конструкции. Последнее очень часто является определяющим и требует соответствующего накопления и обобщения экспериментальных данных. Отмеченному и посвящена настоящая работа.

Рассматриваемое в данной работе сварное соединение № 111 (рис. 1) в парогенераторах ПГ-1000 современных атомных энергетических блоков ВВЭР-1000 является в этом отношении проблемным, поскольку каждый блок имеет в составе четыре парогенератора. В настоящее время в Украине эксплуатируется 13 таких блоков на четырех АЭС с длительностью эксплуатации в пределах от 8 до 28 лет.

Первые дефекты в сварных соединениях № 111 на украинских АЭС были обнаружены в 2003 г. на Южно-Украинской АЭС. До этого такие трещины в соединении № 111 были обнаружены на Нововоронежской и Калининской АЭС в России примерно после 20-летней эксплуатации. Первые обнаруженные трещины в основном были продольные, т. е. вдоль сварного шва и достаточно

больших размеров как по окружности, так и по глубине [1], что связано с трудностями их обнаружения методами неразрушающего контроля. Для этих целей была разработана специальная методика ультразвукового контроля [2], позволившая обнаруживать такие дефекты на ранних стадиях их формирования. Поскольку процедура ремонта обнаруженных на ранней стадии формирования рассматриваемых дефектов достаточно длительная и связана с остановкой всего блока, возникла необходимость в прогнозных оценках ресурса безопасной эксплуатации парогенератора с обнаруженными трещинообразными дефектами в сварном соединении № 111, как «горячего» коллектора (соединение № 111-1), так и «холодного»

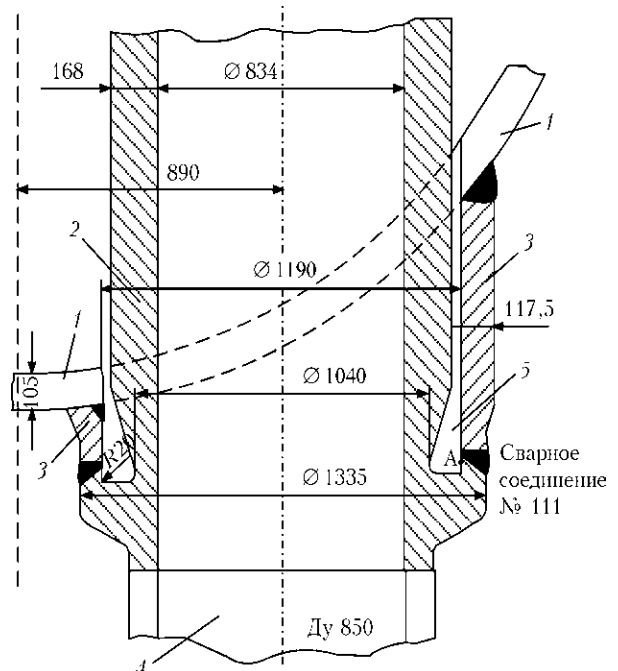


Рис. 1. Схема узла соединения коллектора с корпусом парогенератора с помощью патрубка: 1 — корпус парогенератора; 2 — коллектор; 3 — патрубок; 4 — главный циркуляционный трубопровод; 5 — карман

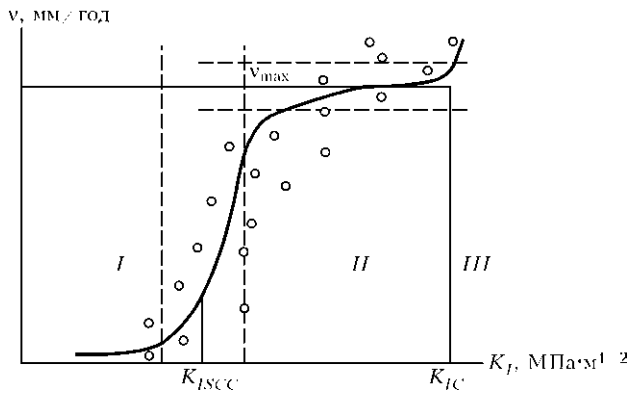


Рис. 2. Диаграмма статической коррозионной трещиностойкости (обозначения см. в тексте)

(соединение № 111-2) с патрубками корпуса парогенератора (рис. 1).

В основу таких прогнозов положено знание диаграммы статической коррозионной трещиностойкости (ДСКТ) (рис. 2). Такие диаграммы разрабатываются для конкретных материалов (сталей) и агрессивных сред в зависимости от силового фактора  $K_I$  — коэффициента интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва. ДСКТ (рис. 2) содержит три зоны [3]. В I зоне ( $0 < K_I < K_{ISCC}$ ), где механизм коррозионного роста является анодное растворение, роль силового фактора невелика. Во II зоне ( $K_{ISCC} < K_I < K_{IC}$ ) — зоне водородного охрупчивания — скорость роста коррозионной трещины значительно выше. Верхняя граница этой зоны  $K_I = K_{IC}$  соответствует III зоне, где трещина растет спонтанно.

Применительно к сварным соединениям № 111 из высокопрочной низколегированной стали 10ГН2МФА достаточно надежных ДСКТ, связывающих скорость роста  $v = f(K_I)$ , пока нет, поскольку состав агрессивной среды в кармане 5 на соединения № 111 зависит от многих обстоятельств и меняется в зависимости от длительности эксплуатации парогенератора. В начальной стадии эксплуатации это питательная вода второго контура при температуре около 300 °С и давлении 6,4 МПа. В такой среде сталь 10ГН2МФА, из которой изготовлен (см. рис. 1) корпус парогенератора I, «холодный» и «горячий» коллекторы



Рис. 3. Внешний вид установки для определения параметров ДСКТ

2, патрубок 3, практически не склонна к образованию коррозионных трещин. Однако при длительной эксплуатации, благодаря застойным явлениям в кармане 5, меняется состав среды, контактирующей с поверхностью односторонних сварных соединений. Создаются условия для язвенной многоочаговой поверхностной коррозии вдоль окружного сварного шва, которая затем переходит в I стадию коррозионной трещины (рис. 2). Очевидно, что неконтролируемое состояние поверхности в кармане в зоне одностороннего сварного шва оказывает немаловажное влияние на время перехода от язвенной коррозии к формированию коррозионной трещины. При этом вполне возможно, что промежуточным состоянием является образование канавочного коррозионного дефекта вдоль сварного шва, из которого затем образуется окружная трещина.

Повышение тщательности контроля зоны сварных соединений № 111 на АЭС в период ежегодных планово-предупредительных работ (ППР) способствует раннему обнаружению рассматриваемых дефектов. Однако прогнозные оценки их поведения оказываются слишком консервативными, что связано с консерватизмом используемых

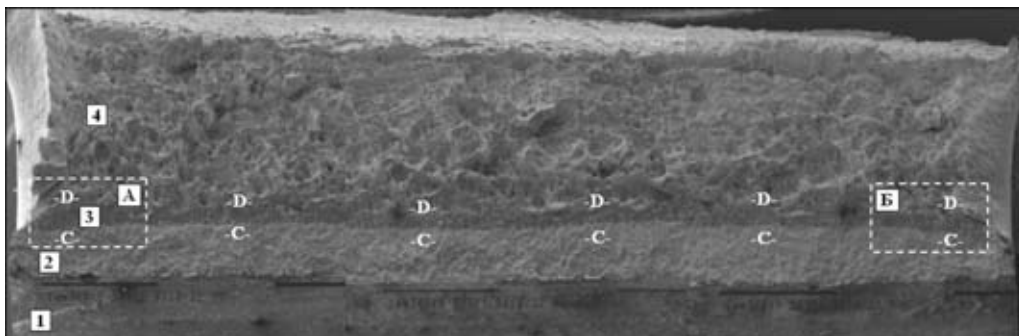


Рис. 4. Панорама излома образца № 1 (обозначения см. в тексте)

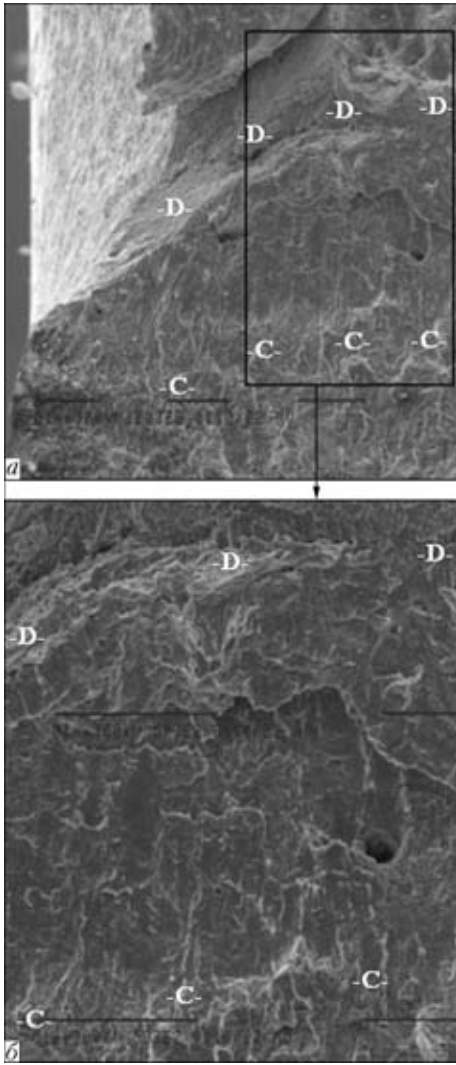


Рис. 5. Фрагменты фрактографии и зона А (см. рис. 4): а —  $\times 203$ ; б —  $\times 503$

приближенных данных относительно скорости роста размеров трещины  $v = f(K_I)$ .

В отсутствие соответствующих ДСКТ в прогнозах использовали литературные данные для близких корпусных сталей и аналогичных эксплуатационных условий [4], хорошо согласующихся с расчетными скоростями  $v = f(K_I)$ , полученными при решении обратной задачи по результатам измерений на Южно-Украинской АЭС в 2003 г., согласно которым [1]

$$v = 0 \text{ при } K_I < K_{I,SCC}$$

$$v \cong 44 \text{ мм/год при } K_I > K_{I,SCC}$$

$$K_{I,SCC} \approx 10 \dots 20 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$$

Такое приближение для ДСКТ достаточно хорошо описывает II стадию (см. рис. 2) при глубинах дефекта более 30...40 мм и весьма консервативно при глубине менее 25 мм.

Существенные расхождения прогнозных данных с результатами контрольных измерений при последующих ППР, как, например, для результатов роста, обнаруженных в 2009 г. на парогенераторах третьего блока Ривненской АЭС в сварных швах соединений № 111-2 трещинообразных дефектах, габаритные размеры которых  $a$  и  $2c$  практически не менялись при контроле во время последующих ППР в 2010 и 2011 гг., поставили под сомнение применимость механизма роста таких дефектов (см. рис. 2, II стадия) для стали 10ГН2МФА.

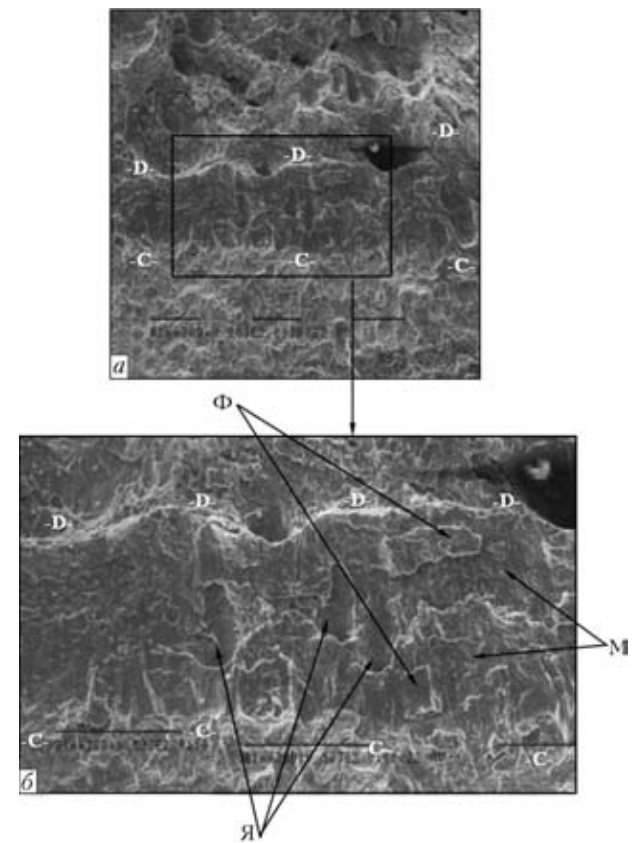


Рис. 6. Фрагменты фрактографии и зона Б (см. рис. 4): а-б — то же, что и на рис. 5

В этой связи было проведено экспериментальное исследование на образцах из стали 10ГН2МФА следующего химического состава, мас. %: 0,11С; 0,28 Si; 0,89 Mn; 0,19 Cr; 2,1 Ni; 0,44 Mo; 0,04 V; 0,11 Cu.

Образцы типа Шарпи сечением 10×10 мм с острым надрезом и предварительно выращенной усталостной трещиной нагружали трехточечным изгибом на установке (см. рис. 3), описанной в работах [5–7]. Испытание проводили в 3%-м растворе NaCl при температуре 35 °С и нагрузке, соответствующей  $K_I = 25 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ . Нагрузка фиксировалась динамометром ДОСМЗ-3. Установка снабжена датчиком акустической эмиссии для фиксирования скачков роста трещины с помощью прибора АЕС-USB-1.

Испытывали два образца в течение 778 ч (№ 1) и 601 ч (№ 2). После окончания испытания образцы доламывали, поверхность очищали от коррозионного налета, после чего с помощью сканирующего электронного микроскопа марки СЭМ-515 фирмы



«Philips», оснащенного энергодисперсионными спектрометрами системы «Link», получали панорамное изображение поверхности излома (см. рис. 4).

На рис. 4 четко различают четыре зоны. Зона 1 соответствует надрезу образца Шарпи глубиной 2 мм, зона 2 — предварительно вырошенная усталостная трещина, зона 3 — коррозионная трещина между линиями С–С–С и D–D–D, зона 4 — зона долома.

Ширина зоны коррозионного роста трещины, величина  $\Delta l$  между линиями С–С–С и D–D–D, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа в 16-ти участках с шагом 500...600 мкм, составила 200...350 мкм. Для образца № 1 в участках 1  $\Delta l = 229$  мкм; 2 — 260; 3 — 250; 4 — 240; 5, 6 — 250; 7 — 280; 8 — 300; 9 — 270; 10 — 230; 11 — 240; 12 — 260; 13 — 300; 14 — 350; 15, 16 — 200.

Кроме того, измерения проводили на боковых поверхностях образца с помощью измерительного микроскопа УИМ-21 с точностью не ниже  $\pm 2$  мкм и ширина роста трещины составили 284 и 207 мкм, что соответствует скорости роста 3,2 и 3,01 мм/год.

Дальнейшие детальные исследования фрактографии разрушения проводили на участках А и Б (см. рис. 4) вблизи боковых поверхностей образца. Соответствующие данные при различном увеличении для участка А приведены на рис. 5, а для участка Б — на рис. 6.

Фрактографическое исследование показывает, что коррозионная трещина во II зоне ДСКТ водородного охрупчивания растет скачками, частота которых соответствует фиксируемым сигналам акустической эмиссии, но не одновременно по всему фронту трещины, а отдельными пятнами, перемещающимися вдоль фронта достаточно хаотично, но все же образуя слои роста толщиной около 30...40 мкм. Сигнал акустической эмиссии сопровождает скачок образования указанного пятна трещины, что можно рассматривать как признак II стадии водородного охрупчивания на рис. 2.

## Выводы

1. Сталь 10ГН2МФА, из которой изготавливают парогенератор, коллектор и трубопровод, имеет достаточно высокую коррозионную стойкость в

контакте со средой второго контура, о чем свидетельствует незащищенная поверхность корпуса парогенератора. Однако в условиях высокой температуры и давления, которые имеют место внутри коллектора и трубопровода, стенки последних защищают коррозионностойкой наплавкой из аустенитной стали.

2. В карманах, где находится соединение коллектора с патрубком Ду1200, в связи с застойными явлениями образуется достаточно агрессивная среда (по крайней мере, по сравнению с питательной водой внутри парогенератора), что обуславливает проявление коррозионного процесса в области сварного шва № 111.

3. В зависимости от агрессивности среды в карманах и состояния поверхности контакта образованию коррозионной трещины предшествует процесс язвенной коррозии различной длительности и возможность образования коррозионного канавочного дефекта.

4. Консервативность прогнозных оценок роста обнаруженного трещинообразного дефекта на ранней стадии связана с многоочаговостью процесса, когда по длине дефекта формирование трещины происходит неодновременно.

1. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
2. *МЦУ-11-98п.* Методика ультразвукового контроля узла приварки коллектора к парогенератору ВВЭР-1000. — М.: ЦНИИТМАШ, 2000.
3. *Механіка руйнування та міцності матеріалів: Довід. посібник / Під заг. ред. акад. НАН України В. В. Панасюка.* В 7 т. — Т. 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / За ред. І. М. Дмитраха. — К.: Академперіодика, 2005. — 376 с.
4. *Magdovski R., Kraus A., Speidel O.* Environmental degradation assessment and life prediction of nuclear pressure vessels and piping steels // Proc. of Intern. Symp. on plant aging and life prediction of corrodable structures, 1995. — P. 895–902.
5. *Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довід. посібник / За ред. проф. З. Т. Назарчука.* В 6 т. — Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика. — Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. — 1132 с.
6. *Махненко В. И., Шекера В. М., Оноприенко Е. М.* Определение параметров упрощенной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости трубных сталей при почвенной коррозии // Автомат. сварка. — 2008. — № 10. — С. 31–35.
7. *Кинетика роста коррозионных трещин в трубной стали 17Г1С / В. И. Махненко, Л. И. Маркашова, Е. Н. Бердникова и др.* // Там же. — 2010. — № 6. — С. 11–15.

The paper describes the interrelation between corrosion crack growth rate and stress intensity factor based on the diagram of static corrosion crack resistance. The main working hypothesis on the discrete nature of crack growth in structural steel is confirmed.

Поступила в редакцию 18.04.2012