

Раздел второй

МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

УДК 620.19:620.194

МЕХАНИЗМ ПОВРЕЖДЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИВАРКИ КОЛЛЕКТОРОВ К КОРПУСАМ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ ВВЭР-1000

*И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, В.Н. Воеводин,
Г.Д. Толстолуцкая, В.В. Брык, В.В. Ружицкий
Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий
Национального научного центра
«Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина
E-mail: mitrofanov@kipt.kharkov.ua*

На основании результатов комплексных исследований поврежденного металла сварных соединений №111 в парогенераторах энергоблоков ВВЭР-1000 показано, что характер повреждений одинаков на «горячих» и «холодных» коллекторах Запорожской АЭС (ЗАЭС) и Южно-Украинской АЭС (ЮУ АЭС). Рассмотрен механизм нарушения герметичности сварных соединений коллекторов с корпусами парогенераторов в результате коррозионного растрескивания под напряжением.

ВВЕДЕНИЕ

Сварные соединения оборудования второго контура являются в настоящее время наиболее уязвимым звеном при эксплуатации энергоблоков ВВЭР-1000. В процессе их эксплуатации неоднократно наблюдались повреждения коллекторов в зоне трубного пучка, самих теплообменных труб, а также инциденты с повреждениями стыков коллекторов первого контура с корпусом парогенератора на сварном соединении №111. К настоящему времени 19 парогенераторов были подвергнуты ремонту по причине нарушений герметичности сварных соединений №111. Характерная особенность этого сварного соединения состоит в том, что после продолжительной эксплуатации в нем и зоне влияния образуются трещины, представляющие значительную угрозу для дальнейшей эксплуатации. Проблемы сварного соединения №111 уже рассматривались ранее [1-3], в частности, на совещании «Обеспечение надежности сварных соединений №111 ПГ ВВЭР-1000», проведенном на ЗАЭС 29-30.11.2011 г. Окончательно причины разрушений и методы их устранения не установлены. Эта задача остается актуальной до настоящего времени и еще более обостряется в связи с тем, что реактор ВВЭР-1000 является базовым проектом для создания серии реакторов нового поколения.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование материаловедческими методами причин нарушения герметичности сварного соединения коллекторов с корпусами парогенераторов после длительной эксплуатации на ЮУ АЭС и ЗАЭС.

МЕТОДИКИ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Конструктивное решение сварного соединения №111 и расположение его в парогенераторе показано на рис. 1. «Грибок» коллектора приваривается к патрубку Ду-1200 парогенератора сварным швом №111. Патрубок Ду-1200 парогенератора и коллектор изготовлены из стали перлитного класса 10ГН2МФА. Наружный диаметр сварного соединения составляет 1335 мм, длина сварного шва (наружная сторона) – 4185 мм, толщина свариваемого металла около 75 мм.

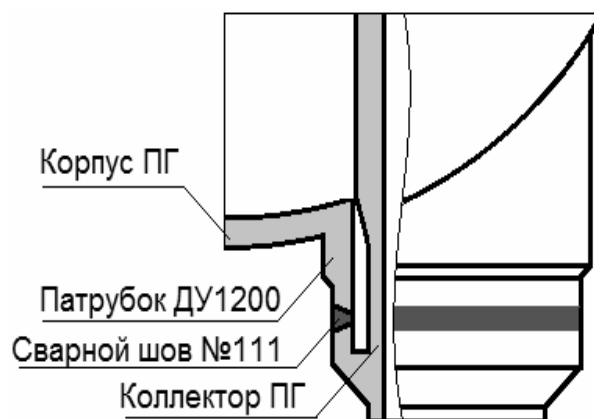


Рис. 1. Сварное соединение №111 и его расположение в парогенераторе

Был исследован металл темплетов, вырезанных в ходе ремонта разрушившихся сварных соединений на ЮУ АЭС и ЗАЭС. На рис. 2 показан темплет с трещиной, вырезанный из металла зоны термического влияния сварного шва №111.

Трещина зародилась на стороне, граничащей с водой второго контура, вершина трещины находится в средней части темплета.

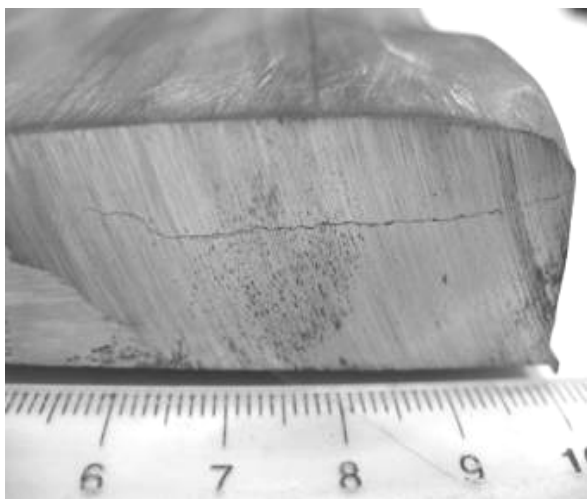


Рис. 2. Темплет металла с трещиной, вырезанный из соединения №111

Исследования темплета проводились с помощью металлографии, электронной микроскопии, фрактографии, микрорентгеноспектрального анализа и метода термодесорбционной масс-

спектрометрии. Были применены: микроскоп металлографический ММО-1600-АТ; сканирующий электронный микроскоп с катодом Шоттки JEOL JSM-7001F; термодесорбционный масс-спектрометр МХ-7304.

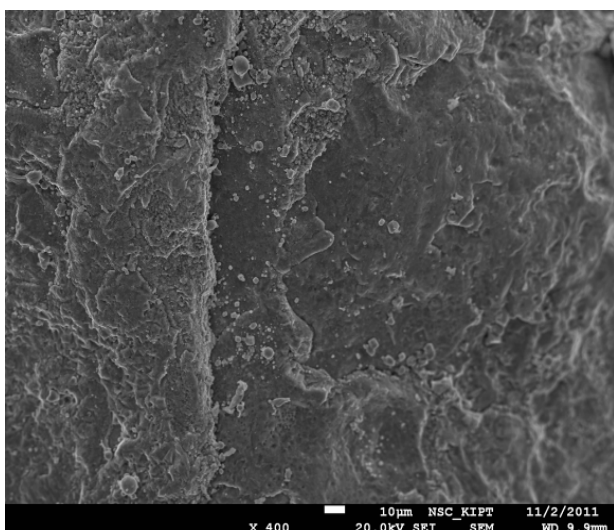
РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе ультразвукового контроля парогенератора на втором энергоблоке ЗАЭС в 2011 г. была выявлена трещина, которая шла по основному металлу параллельно сварному шву в зоне термического влияния. Фрагмент трещины в сварном соединении № 111 «холодного» коллектора с патрубком Ду-1200 показан на рис. 3.

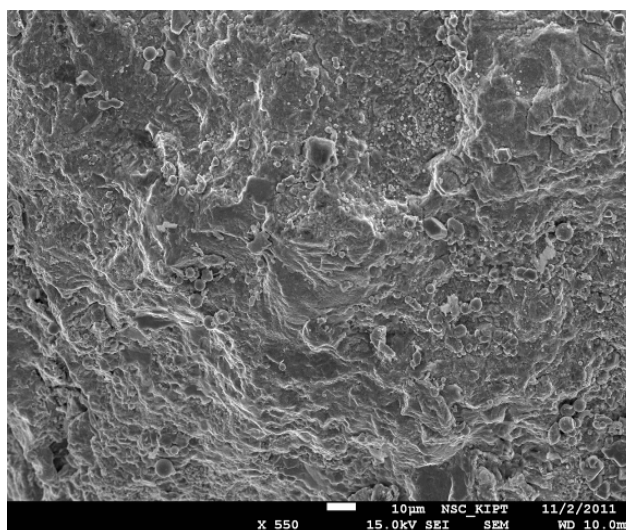
Трещину раскрывали и исследовали ее края вблизи вершины с помощью оптического и растрового микроскопов. Края раскрытой трещины покрыты налетом серого цвета, прочно сцепленным с основой. Характер трещины и микроструктура металла аналогичны тем, которые исследовались ранее на «горячем» коллекторе ЮУ АЭС [2]. На рис. 4 показаны участки поверхности раскрытой трещины, наблюдаемые в растровом микроскопе.



Рис. 3. Фрагмент трещины в сварном соединении №111, 2ПГ-1, ЗАЭС



а



б

Рис. 4. Участки поверхности раскрытой трещины с элементами хрупкого (а) и вязкого (б) разрушений

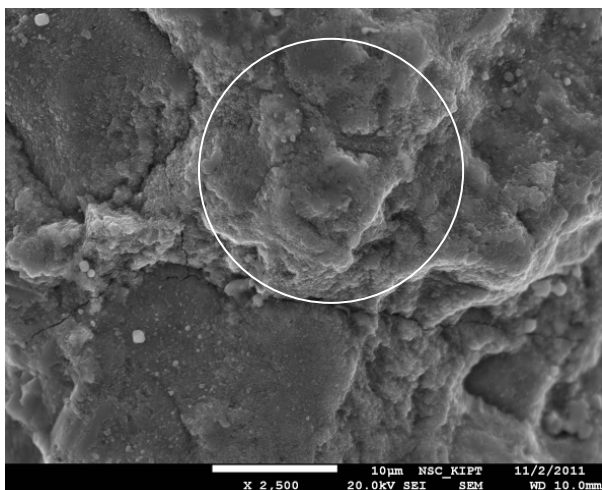


Рис. 5. Участок поверхности с сеткой микротрещин и место спектрального анализа

Фрактографические исследования поверхности разрыва показали, что на фоне разрушений вязкого ручьиного и волокнистого строения, при которых зерна сильно искажены, наблюдаются элементы хрупкого разрушения по кристаллографическим

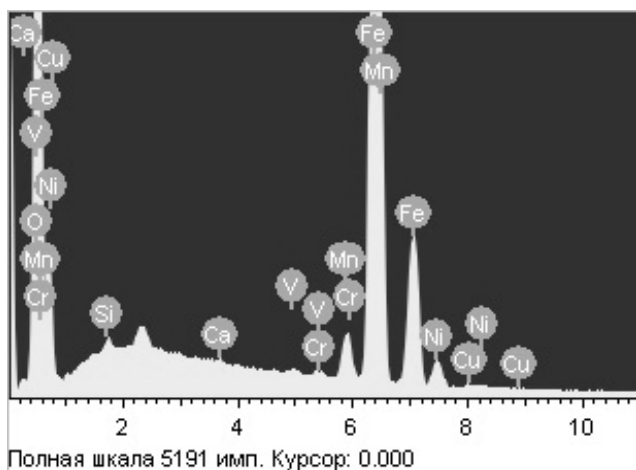


Рис. 6. Спектрограмма участка трещины, показанного на рис. 5

Остальные элементы, представленные в спектре (см. рис. 6 и таблицу), входят в состав стали 10ГН2МФА и жидкой среды второго контура. Поверхность металла, не занятая оксидами, соответствует нормативному составу стали 10ГН2МФА.

С помощью метода термодесорбционной масс-спектрометрии был проанализирован металл различных зон темплета: а) внутренней зоны, находящейся внутри парогенератора; б) внешней зоны, находящейся снаружи парогенератора; в) зоны внутри темплета вблизи устья трещины.

Метод термодесорбционной спектрометрии основан на том, что при постоянной скорости откачки давление газа в откачиваемом объеме пропорционально скорости десорбции газа из исследуемого материала. Образцы подвергаются отжигу при одновременной регистрации спектров десорбирующихся газов, что позволяет определить

плоскостям. Это дает основание утверждать, что имеется квазихрупкое разрушение, которое сочетает в себе элементы хрупкого и вязкого изломов и встречается в высокопрочных металлах.

На рис. 5 при большем увеличении показан характерный участок поверхности с сеткой микротрещин. Трещины распространяются как по границам, так и по телу зерен.

Результаты спектрального анализа элементного состава участка, выделенного кругом, представлены на рентгеновском спектре (рис. 6) и в таблице. Количественный расчет состава проводили по К-линиям характеристического рентгеновского излучения. В исследованной области содержится около 35 ат.% железа и свыше 62 ат.% кислорода. Кислород, в силу своих физико-химических свойств, может находиться только в связанном состоянии. Из всех возможных химических соединений железа с кислородом составу – 34 ат.% железа и 62 ат.% кислорода ближе всего соответствует формула гидроксида $Fe(OH)_2$. Таким образом, участок трещины (см. рис. 5) состоит из гидроксидов с небольшой добавкой оксидов.

Элементный состав участка поверхности

Элемент	Содержание, ат.%
Кислород	62.52
Кремний	0.22
Кальций	0.07
Ванадий	0.08
Хром	0.09
Марганец	1.09
Железо	34.64
Никель	1.17
Медь	0.12
<i>Итого</i>	100

температурные интервалы выхода молекул и термодинамические параметры процесса десорбции.

Образцы различных зон темплета стали 10ГН2МФА, вырезанного из сварного соединения №111, подвергались отжигу в интервале температур 20...1200 °С с одновременной регистрацией спектра десорбирующегося водорода с помощью монополюсного масс-спектрометра МХ-7304.

Спектры термодесорбции водорода для различных зон темплета показаны на рис. 7. Спектр 1 характерен для внутренней и внешней зон темплета, спектры термодесорбции водорода для которых имеют незначительные отличия по температурам максимумов и интенсивности газовыделения в них. Заметное выделение водорода начинается при температуре ~ 300 °С, а максимальное – происходит при температуре 600 °С. Пик газовыделения не имеет явно выраженных стадий, достаточно широкий, так что даже при 900 °С наблюдается заметный выход водорода.

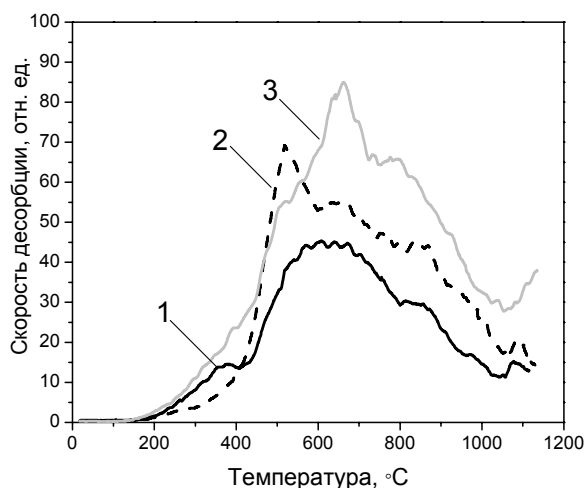


Рис. 7. Спектры термодесорбции водорода из стали 10ГН2МФА от внутренней и внешней зон темплета (1) и зоны устья трещины (2, 3)

В спектрах, снятых вблизи устья трещины, интенсивность выделения водорода значительно больше (спектры 2 и 3), чем в других зонах темплета. Качественно эти спектры различаются: в спектре 2 температура максимума сдвинута примерно на 100 °С в сторону меньших температур, а в спектре 3, полученном для зоны темплета, которая расположена примерно на 1,5 мм дальше от устья трещины, в интервале температур 700...900 °С наблюдается заметно большее выделение, даже по сравнению со спектром 2.

Наблюдаемые особенности отражают различия в термодинамических параметрах связи водорода в разных зонах темплета и свидетельствуют о накоплении водорода в металле вблизи устья трещины.

Ранее [3] была определена объемная концентрация водорода, накопившегося в материале сварного шва №111 после 70000 ч эксплуатации парогенератора ЮУ АЭС. Было показано, что в области трещины, образовавшейся в материале шва №111 парогенератора ЮУ АЭС, аккумулировалось примерно в три раза большее количество водорода, чем в других участках этого шва. Выделение водорода из перлитной стали 10ГН2МФА, проработавшей более 70000 ч в реальных условиях атомной станции, было зарегистрировано в двух областях температур: 300...700 и 800...1000 °С. На основании экспериментов, моделирующих захват и удержание дейтерия в стали 10ГН2МФА [3], был сделан вывод, что развитая система границ в перлитной стали способствует выходу водорода уже при комнатной температуре. В то же время межфазные границы между ферритом и цементитом могут являться ловушками водорода и удерживать его в перлитной стали до температур ~ 600 °С [2].

Результаты, полученные в настоящей работе для сварного соединения №111 парогенератора второго энергоблока ЗАЭС, свидетельствуют, что выделение водорода наблюдается практически в том же интервале температур – 300...1100 °С. Наличие в обоих случаях только высокотемпературной компоненты десорбции связано, по-видимому, с

тем, что температура, при которой эксплуатировались сварные швы, составляла 290...300 °С.

Таким образом, экспериментально показано, что в стали 10ГН2МФА как на поверхности эксплуатационной трещины [3], так и вблизи устья трещины (см. рис. 7), содержится примерно в полтора–три раза большее количество водорода, чем в других участках. Увеличенное содержание водорода на участках сварного соединения с образовавшимися трещинами указывает на связь процессов накопления водорода и растрескивания металла.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные металлографические исследования и ранее полученные результаты показывают, что характер разрушения сварных соединений №111 в парогенераторах ЮУ АЭС и ЗАЭС одинаков, несмотря на то, что трещины образовались на «горячем» коллекторе в первом случае и на «холодном» – во втором. Распространение трещин сопровождается окислением стенок их устьев. Гидроксиды железа в устьях трещин, обнаруженные рентгеноспектральным анализом, в совокупности с данными металлографических исследований подтверждают их коррозионное происхождение.

Расклинивающее действие твердых продуктов коррозии типа окислов (Cr, Fe)₃O₄, (Cr, Fe)₂O₃, NiCr₂O₄ и соответствующих гидроокислов, образующихся в трещине и превосходящих по объему исходный металл, хорошо известно [4]. Сварные соединения, имеющие высокие собственные напряжения, больше подвержены коррозии на участках концентрации напряжений [5]. Обнаруженные в нашем случае гидроксиды могут существенно влиять на процесс растрескивания стали 10ГН2МФА. Удельный объем стали ≈ 0,13 см³/г, тогда как удельный объем Fe(OH)₂ больше, чем в два раза – 0,29 см³/г. Подобно окислам гидроксиды должны оказывать расклинивающее действие и влиять на напряженно-деформированное состояние металла вокруг трещины. Образование гидроксидов вследствие объемных изменений вызывает локальные напряжения в структуре, способные вызвать локальные разрушения и дальнейший рост трещины. Растрескивание, показанное на рис. 5, отвечает таким представлениям.

Обнаруженное повышенное содержание водорода вблизи устья трещины может быть обусловлено тем, что именно в этой области интенсивное окисление ювенальных раскрытых поверхностей сопровождается выделением водорода. В свою очередь, выделяющийся водород способствует локальному охрупчиванию металла, что, по-видимому, также способствует растрескиванию.

Температура вязкохрупкого перехода для стали 10ГН2МФА равна 15 °С [6]. Квазихрупкий характер разрушения, выявленный при исследовании раскрытой эксплуатационной трещины, указывает

на то, что ее образование произошло при температурах, близких к комнатной.

На основании полученных данных можно предположить, что развитие трещин в сварном соединении №111 идет с чередованием стадий окисления внутри трещины, скачкообразного распространения трещины под действием напряжений со стороны образовавшихся гидроксидов, затем последующей коррозии в раскрывшейся трещине с ослаблением фрагментарных связей и т.д. При этом логично считать, что акты растрескивания проходят при охлаждении оборудования, а окисление и заполнение образовавшихся трещин гидроксидами идет при рабочих температурах.

Можно предположить, что развитие трещин осуществляется по следующему стадийному механизму.

1. Заполнение свежееобразованной трещины рабочей жидкостью второго контура.

2. Окисление металла, в результате чего в устье трещины откладываются твердые гидроксиды, одновременно в этой же зоне металла растворяется выделяющийся водород.

Эти стадии осуществляются при рабочей температуре (около 300 °С).

3. При охлаждении парогенератора, под действием локальных напряжений, вызванных расклинивающим действием гидроксидов, происходит скачкообразный рост трещины, чему способствует растворенный в вершинах трещины водород. В дальнейшем стадии циклически повторяются.

По-видимому, немаловажное значение в развитии трещин имеет напряженное состояние, которое свойственно для металлов в зонах влияния сварных швов [4]. Таким образом, образование трещин в соединениях №111 можно отнести к процессам коррозионного растрескивания под напряжением.

Как отмечалось [7], растрескивание сварного соединения №111 относится к медленным процессам. С этим можно согласиться, если привязывать растрескивание к циклам расхолаживания и разогрева реакторной установки. Однако надо заметить, что растрескивание идет с нарастающими темпами по мере того, как с каждым циклом в нем участвуют все большие объемы металла.

Полученные экспериментальные данные по развитию трещин в стали 10ГН2МФА дают возможность по-новому оценить влияние технологических факторов на эксплуатационную стойкость сварных соединений. Технологический цикл парогенераторов включает в себя помимо рабочего режима, выхода на него, расхолаживания, также еще предписанные техническими условиями химические отмытки и гидроиспытания. Назначение двух последних операций направлено на удаление из парогенератора шламовых отложений и выявление эксплуатационных (коррозионных) дефектов.

Как отмечалось в ряде случаев, появление дефектов в теплообменных трубах и сварных швах происходит именно после проведения химических отмыток и гидроиспытаний. Химические отмытки проводят при температурах, близких к комнатным. При этом в металле априори уже имеются коррозионные язвы и зародыши трещин. (Вопросы зародышеобразования коррозионных дефектов рассматривались ранее [9]). Для химических отмыток используют кислотные или щелочные растворы. Попадание их в образовавшуюся трещину способствует быстрому окислению незащищенного металла с интенсивным выделением оксидов и водорода, что вызывает ускоренное развитие трещины. Гидроиспытания проводят при давлениях, в 1,5 раза превышающих рабочие, при относительно невысоких температурах (85°С). При всей необходимости в обеспечении безопасной эксплуатации гидроиспытания в условиях высокой напряженности узла сварного соединения могут также вызвать ускоренное растрескивание.

ВЫВОДЫ

1. Проведены комплексные исследования причин повреждений сварных соединений коллекторов с патрубками Ду-1200 в парогенераторах энергоблоков ВВЭР-1000 (сварное соединение №111). Установлено, что характер повреждений одинаков для сварных соединений №111 на ЗАЭС и ЮУ АЭС. На «горячих» и «холодных» коллекторах наблюдаются аналогичные повреждения.

2. В областях устьев раскрытых эксплуатационных трещин выявлены образования гидроксидов железа. Методом термодесорбции показано, что в этих же зонах металл имеет повышенное содержание водорода.

3. Обнаружено квазихрупкое разрушение стали 10ГН2МФА в области влияния сварного шва при распространении трещин, указывающее на их образование при температурах, близких к комнатной.

4. На основании результатов проведенных исследований рассмотрен механизм коррозионного растрескивания под напряжением в сварных соединениях коллекторов с корпусами парогенераторов в реакторных установках ВВЭР-1000.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С.А. Харченко, Н.Б. Трунов, Н.Ф. Кортаев, С.Л. Лякишев. Меры по обеспечению надежности сварного соединения коллектора 1 контура с корпусом парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 // *Теплоэнергетика*. 2011, №3, с. 27-32.

2. А.С. Митрофанов, Л.С. Ожигов, Є.О. Крайнюк, В.И. Савченко. Про причини ушкодження зварних з'єднань №111 парогенераторів ПГВ-1000 // *Вісник ТДТУ*. Тернопіль, 2009, т. 14, №4.

3. В.М. Ажажа, Г.Д. Толстолуцкая, В.В. Ружицкий, И.Е. Копанец, С.Д. Лавриненко, Н.Н. Пилипенко, Л.С. Ожигов, Ю.П. Бобров. Определение объемной концентрации водорода в материале

сварного соединения №111 парогенератора АЭС // *Тяжелое машиностроение*. 2008, №6, с. 32-34.

4. С.Л. Лякишев, Н.Б. Трунов, С.А. Харченко, Н.Ф. Коротаяе. 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».

5. В.Л. Богоявленский. *Коррозия сталей на АЭС с водным теплоносителем*. М.: «Энергоатомиздат», 1984, 168 с.

6. К.В. Багрянский, З.А. Добротина, К.К. Хренов. *Теория сварочных процессов*. Харьков: Изд-во ХГУ, 1968, 504 с.

7. Заготовки из стали марки 10ГН2МФА для оборудования АЭС // *Технические условия ТУ 108.766-86*.

8. Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, О.Ю. Петрова, И.Л. Харина. Влияние воды высоких параметров на склонность стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию // *Машиностроение и инженерное образование*. 2007, №4, с. 35-41.

9. И.М. Неклюдов, В.М. Ажажа, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов. Эксплуатационные повреждения теплообменных трубок и сварных соединений в парогенераторах энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 // *Проблемы прочности*. 2008, №2, с. 105-111.

Статья поступила в редакцию 01.03.2012 г.

МЕХАНІЗМ ПОШКОДЖЕНЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРИВАРКИ КОЛЕКТОРІВ ДО КОРПУСІВ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ ЕНЕРГОБЛОКІВ ВВЕР-1000

*І.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, В.М. Воєводін,
Г.Д. Толстолуцька, В.В. Брик, В.В. Ружицький*

На підставі результатів комплексних досліджень пошкодженого металу зварних з'єднань №111 у парогенераторах энергоблоків ВВЕР-1000 показано, що характер пошкоджень однаковий на «гарячих» та «холодних» колекторах ЗАЕС та ПУ АЕС. Розглянуто механізм порушень герметичності зварних з'єднань колекторів з корпусами парогенераторів внаслідок корозійного розтріскування під напруженням.

MECHANISM OF DAMAGE OF WELDED JOINTS OF COLLECTOR WELDING TO STEAM GENERATOR BODIES OF POWER UNITS OF WWER-1000

*I.M. Neklyudov, L.S. Ozhigov, A.S. Mitrophanov, V.N. Voyevodin
G.D. Tolstolutska, V.V. Bryk, V.V. Ruzhitskiy*

On the base of results of performed complex investigation of damaged metal of welded joints # 111 in steam generators of power units of WWER-1000 was revealed that the nature of damage is similar in "hot" and "cold" collectors of ZNPS and SU NPS. Mechanism of corrosion cracking under stresses in welded joints of collectors with steam generator body is examined.