

## КОМПЛЕКСНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ УЗЛА ПРИВАРКИ КОЛЛЕКТОРА К КОРПУСУ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА ВВЭР-1000

**Л. С. ОЖИГОВ, А. С. МИТРОФАНОВ, Г. Д. ТОЛСТОЛУЦКАЯ, Е. А. КРАЙНЮК, С. В. ШРАМЧЕНКО**

Нац. научный центр «Харьковский физико-технический ин-т». 61108, Харьков-61, ул. Академическая, 1.

E-mail:ozhigov@kipt.kharkov.ua

Методами коэрцитиметрии и магнитной памяти выполнен диагностический контроль напряженно-деформированного состояния металла узлов приварки коллекторов к корпусу парогенератора ПГВ-1000М после длительной эксплуатации на энергоблоке № 3 Южно-Украинской АЭС. Проанализированы результаты комплексных исследований состояния металла. Обнаружены и идентифицированы микротрещины, поры и неметаллические включения, определен их состав. Исследовано изменение микротвердости металла по высоте сварного шва. Показано, что в зоне корня шва содержание водорода в три раза выше, чем на других участках металла сварного соединения. Библиогр. 21, табл. 1, рис. 13.

*Ключевые слова:* парогенератор, сварное соединение, эксплуатационные дефекты, микроструктура металла, термодесорбция, водород, напряженно-деформированное состояние, магнитные методы диагностики

За время эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 имели место повреждения в узлах приварки коллекторов к патрубки Ду1200 корпусов парогенераторов – сварные соединения №111. Повреждения проявляются в виде различных несплошностей, чаще микро- или сквозных макротрещин. На протяжении последних 17 лет (с 1998 по 2015 гг.) было проведено свыше 30 ремонтов сварного соединения (СС) № 111. По результатам исследований было предложено несколько гипотез о вероятных причинах возникновения дефектов: недостатки конструкции, нарушение технологии при изготовлении, вероятные перегрузки при останове и пуске реактора, взаимное влияние коррозионно-активной среды второго контура и циклических нагрузок. Окончательно причины

повреждений СС № 111 на энергоблоках АЭС до последнего времени так и не определены.

**Выявление несплошностей в металле сварного соединения № 111 и оценка существующих методов контроля.** Во время планово-предупредительных ремонтов (ППР) энергоблоков дефекты с определенной точностью фиксируются с помощью применяемых методов НК: ультразвукового (УЗК) и капиллярного. В отдельных случаях трещины могут распространяться через всю толщину стенки патрубка и выходить на поверхность (рис. 1, толщина стенки около 70 мм) [1].

Но чаще дефекты обнаруживаются в глубине металла и на внутренней стороне конструкции, граничащей с теплоносителем. Исследования показали, что дефекты, расположенные в

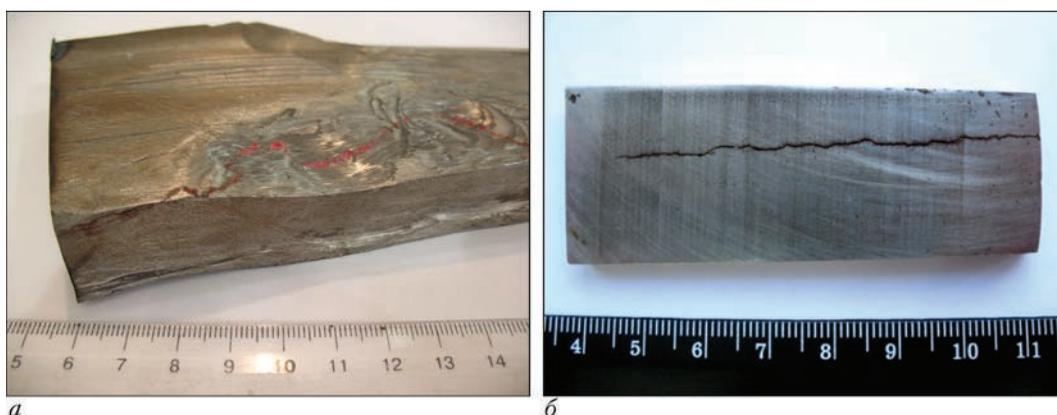


Рис. 1. Трещины в сварном соединении (капиллярный контроль): а – с внутренней стороны сварного шва; б – на поверхности темплета

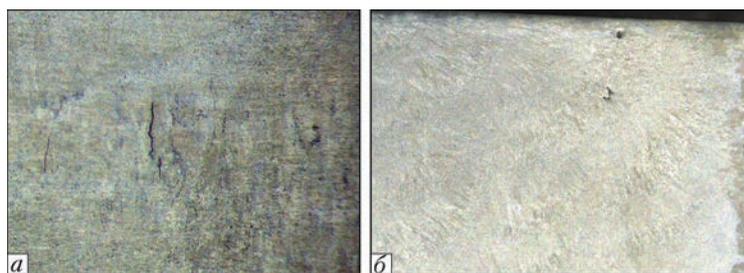


Рис. 2. Дефекты в сварном шве: а – микротрещины; б – поры толще металла и не имеющие выхода на поверхность, в большинстве случаев представляют собой поры диаметром около 1 мм и трещины длиной 1...5 мм (рис. 2) [2].

Как показывает практика, не всегда методом УЗК удается обнаружить несплошности, так как чувствительность УЗК во многом зависит от контролирующего оборудования, состояния поверхности, структуры металла и расположения несплошностей в металле относительно акустической волны.

Метод капиллярной дефектоскопии является наиболее простым в применении, но недостаток этого метода заключается в том, что он позволяет выявить уже существующие дефекты и только на поверхности конструкции. Кроме того, проведение контроля требует предварительной тщательной подготовки поверхности металла.

Методы УЗК и капиллярной дефектоскопии направлены на поиск и обнаружение уже возникшего дефекта и не позволяют определить зоны концентрации напряжений (ЗКН), обусловленных действием рабочих эксплуатационных нагрузок, и отследить динамику развития ЗКН, предшествующую зарождению дефекта.

В настоящее время в мире намечается новая стратегия НК, где центр усилий в оценке деградации материала переносится от метода реагирования на событие, которое состоялось, на прогностические действия. Одними из таких прогностических методов контроля являются магнитные методы: метод коэрцитиметрии и метод магнитной памяти металла [3]. Эти методы позволяют выявить потенциально опасные зоны – ЗКН – еще до образования и развития дефектов. Существующая методика диагностического контроля напряженного состояния металла корпуса реактора, оборудования и трубопроводов АЭС методом магнитной памяти металла является сравнительно новой, но она нашла свое применение в процессе НК оборудования и трубопроводов [4].

Анализ литературных источников [5–14] относительно причин повреждения СС №111 показывает, что за время существования этой проблемы накоплен достаточно большой опыт по разным методикам исследований: определения прочностных характеристик и пластичности металла,

установления причин появления очагов разрушения металла, определения механизмов зарождения и распространения трещин, влияния рабочих факторов на возникновение, накопление и развитие дефектообразований.

По результатам анализа можно отметить, что для более детального изучения и установления причин развития дефектообразований в металле сварного соединения приварки патрубка Ду1200 к коллектору парогенератора ПГВ-1000М целесообразны комплексные исследования с привлечением к общепринятым методикам неразрушающих магнитных методов контроля металла, а также исследований содержания водорода.

**Магнитные методы контроля металла сварного соединения № 111.** Контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) металла СС № 111 методом измерения коэрцитивной силы и методом магнитной памяти металла осуществлялся во время ППР на Южно-Украинской АЭС. Ниже представлены результаты контроля НДС металла «горячего» коллектора парогенератора ЗПГ-1 на энергоблоке № 3, который проводился в 2010–2012 гг. [4].

Измерения коэрцитивной силы проводились в области 100 мм выше и ниже середины сварного шва. Результаты измерений представлены на рис. 3 в виде развертки сварного шва, где середина шва расположена на отметке 100 мм. О НДС металла можно судить по изменению цветовой гаммы развертки шва от исходного темного до «предельного» светлого цвета. Значение коэрцитивной силы изменяется от минимального для исходного отожженного металла (темные участки), до максимального, когда металл находится в состоянии предразрушения, на границе предела текучести (светлые).

Результаты показывают, что в 2010 г. в сварном шве значительные напряжения отсутствуют (рис. 3, а). В 2011 г. (рис. 3, б), наблюдается локализация напряжений в металле ниже середины сварного шва (от 0 до 130°). В 2012 г. (рис. 3, в) можно видеть значительное увеличение напряжений ниже середины шва между отметками 0 и 130°.

Результаты контроля СС № 111 горячего коллектора ЗПГ-1 методом магнитной памяти металла показаны на рис. 4 в виде магнитограммы, построенной по данным контроля в 2012 г. На магнитограмме наблюдается зона значительной концентрации напряжений металла на интервале от 240 до 1100 мм.

Кроме контроля напряженного состояния магнитными методами был выполнен контроль несплошностей в СС № 111 методом УЗК. Контроль показал наличие дефектов в металле сварного шва и околошовной зоны.

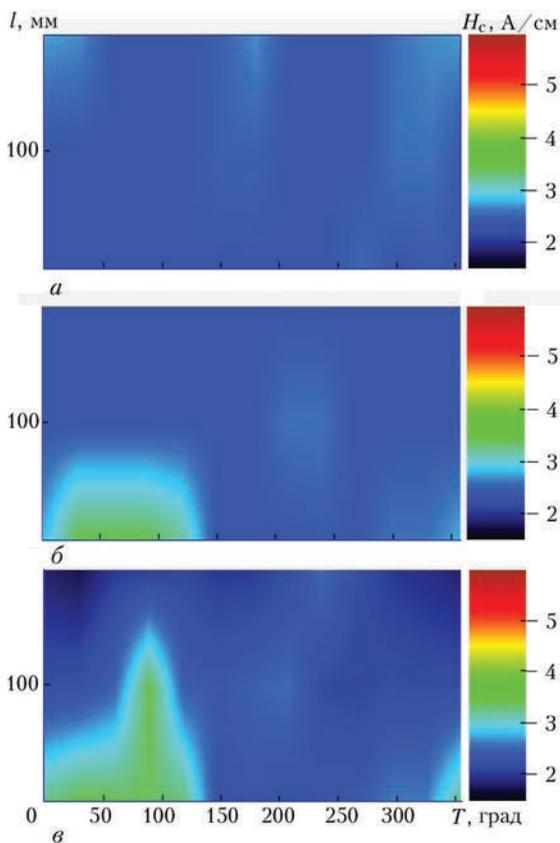


Рис. 3. Результаты контроля СС №111 коллектора парогенератора ЗПГ-1 «ГК» ППР методом коэрцитиметрии по годам: а – 2010; б – 2011; в – 2012 г.

Сравнительный анализ показывает, что результаты контроля магнитными методами коррелируют с результатами, полученными методом УЗК [15].

После определения мест локализации несплошностей магнитными методами и методом УЗК из сварного шва при ремонте в 2012 г. был вырезан темплет, который был передан для исследований в ННЦ ХФТИ.

На рис. 5 приведены результаты контроля СС №111 тремя методами: коэрцитиметрическим, магнитной памяти металла и УЗК, а также схема вырезки темплета.

Отдельно темплет также был исследован методом магнитной памяти металла.

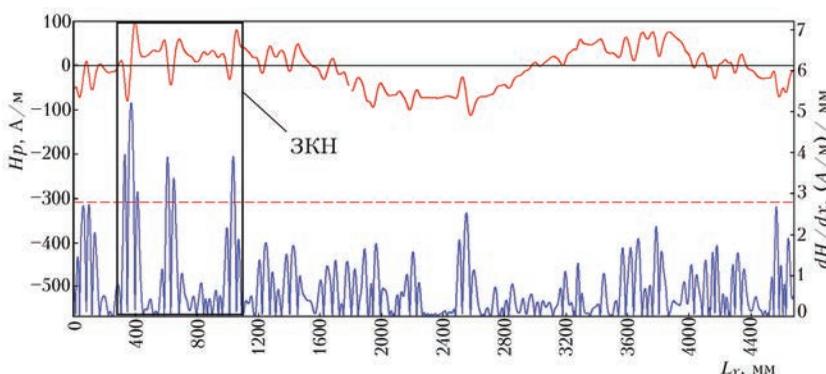


Рис. 4. Результаты контроля сварного шва № 111 методом магнитной памяти металла в 2012 г.

На рис. 6, а показан темплет и места локализации внутренних дефектов в металле, выявленные методами УЗК и радиографического контроля (РГК) – белые и черные метки соответственно. На рис. 6, б показана магнитограмма поверхности темплета, полученная методом магнитной памяти металла. Места аномалий распределения собственных магнитных полей рассеяния показаны темными участками.

Видно, что зоны концентрации напряжений (темные участки) соответствуют местам расположения дефектов.

**Металлография и электронная микроскопия.**

Исследования с помощью металлографических методик показали, что металл сварного соединения имеет слоистую структуру (рис. 7), присущую многопроходной электросварке металла. На поверхности образца сварные валики расположены параллельными рядами, образуя полосчатую структуру с мелкокристаллическими и столбчатыми слоями, достигающими ширины приблизительно 4 мм. В слоях с мелкокристаллической составляющей наблюдается ферритно-перлитная структура с содержанием перлита около 65 %, в столбчатой структуре – 72 % (ГОСТ 8233–82, шкала эталона № 7). Было обнаружено также, что в металле сварного шва присутствуют разного рода дефекты, такие как поры, микротрещины и неметаллические включения (рис. 7, б–д).

Проведенные измерения микротвердости по высоте сварного шва (от корня шва к внешней поверхности микротвердость измеряли в соответствии с ГОСТ 9450–76 при нагрузке индентора 20 г) показали, что значения (рис. 8) меняются периодически в соответствии с чередованием мелкозернистой и столбчатой структур, содержанием в них ферритной и перлитной составляющих.

Микротвердость металла сварного соединения изменяется от 1300 до 2000 МПа, что характерно для ферритно-перлитной стали при различном содержании в ней углерода.

Кроме выявленных трещин и пор [16] при послойной шлифовке металла темплетов были обнаружены участки со скоплением включений, которые были идентифицированы как карбид кремния SiC. Размер включений колеблется от 10 до 80 мкм. На рис. 9 можно видеть пример таких неметаллических включений.

Включения, обнаруженные вблизи корня сварного шва, располагаются вокруг трещин или в их русле. В целом, в металле шва количество и размер неметаллических включений не превышает допустимые нормы [15]. Следует от-

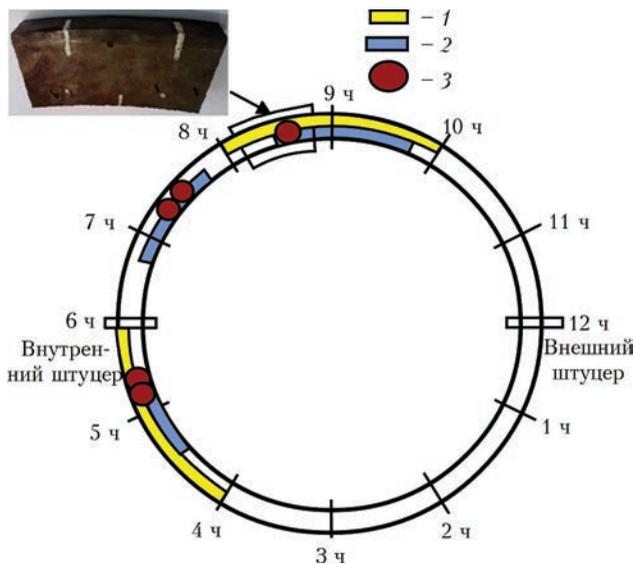


Рис. 5. Результаты контроля сварного шва № 111 методами коэрцитиметрии (1), магнитной памяти металла (2), УЗК (3) и схема вырезки темплетов

метить, что включения SiC располагаются вблизи корня шва. Были выявлены также одиночные трещины длиной до 3 мм (рис. 7, б) и зоны с наличием пор (рис. 10), диаметр которых не превышает 0,6 мм.

Поры, также как неметаллические включения и трещины, расположены вблизи корня сварного шва. Происхождение этих дефектов может быть связано с условиями сварки, в частности, с присутствием водорода и других газов, которые, выделяясь при охлаждении сварочной ванны, локально накапливаются, образуя поры и макроскопические полости. Наличие и величина подобных дефектов в металле регламентируется нормами [15].

По характеру и расположению обнаруженные в процессе исследований трещины можно отнести к дефектам, которые появились в результате длительной эксплуатации. Важным моментом в уста-

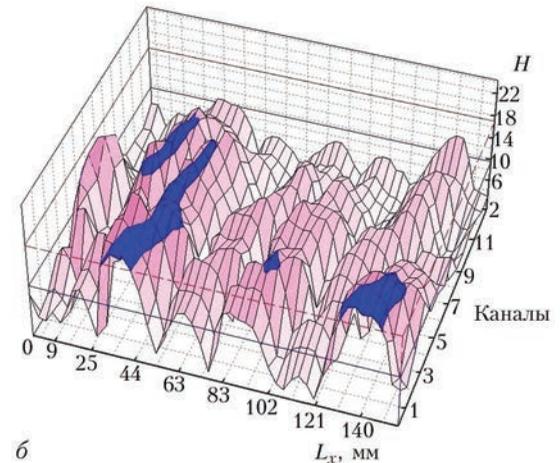


Рис. 6. Места локализации внутренних дефектов в металле темплетов, выявленные методами УЗК и РГК (белые и черные метки соответственно) (а) и аномалии распределения собственных магнитных полей рассеяния (б)

новлении причин их образования являются выявленные вблизи вершин трещин частицы карбида кремния (рис. 9). В отличие от неметаллических включений (оксиды, силикаты и др.), которые выделяются при металлургических процессах сварки, форма, размеры и расположение частиц карбида кремния свидетельствуют о том, что они были занесены в расплав сварного шва. Присутствие частиц карбида кремния в металле можно объяснить особенностями многопроходной сварки, при которой требуется зачищать валики от флю-

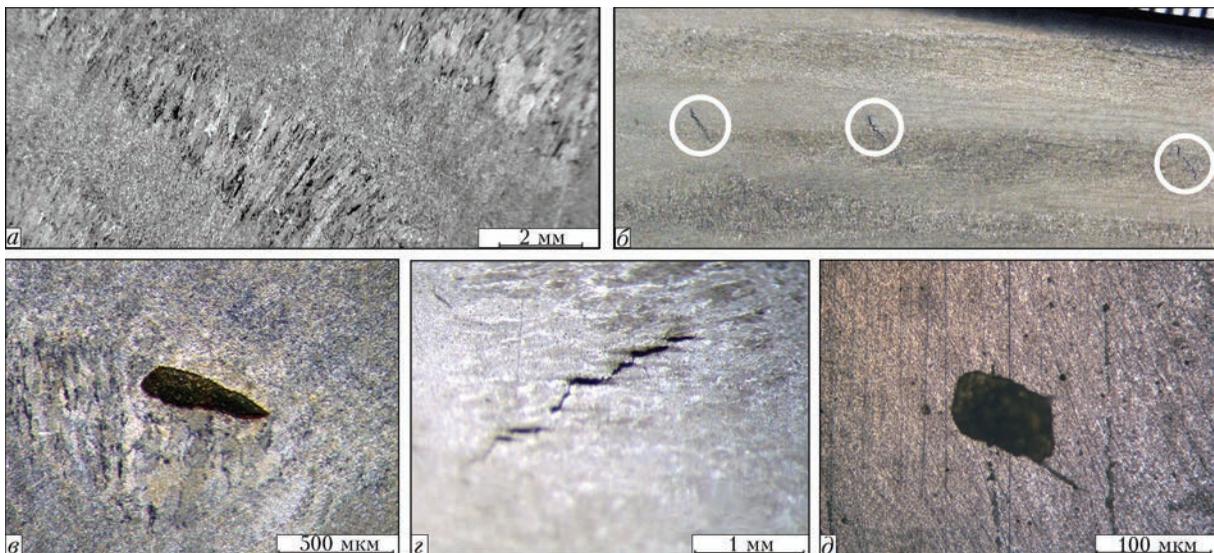


Рис. 7. Структура металла сварного шва и выявленные дефекты: а – слоистая структура металла шва; б – макроструктура с трещинами (выделены кругами); в – пора; г – трещина; д – неметаллическое включение

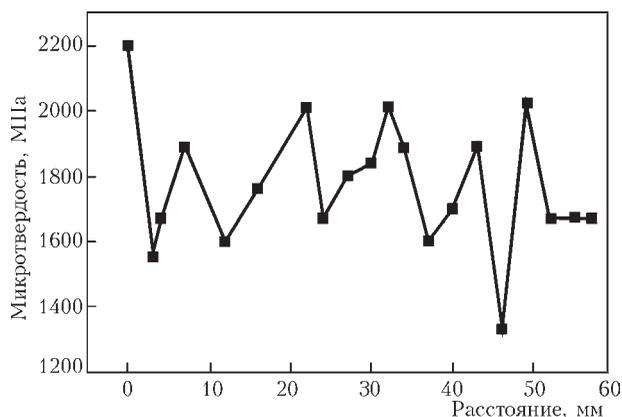
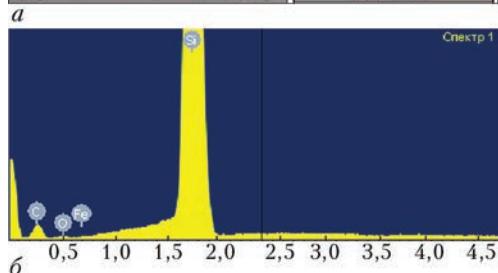
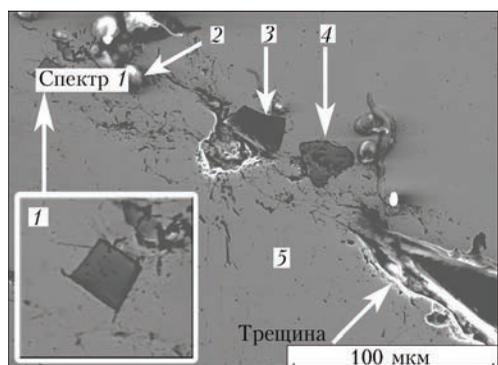


Рис. 8. Периодическое изменение микротвердости по высоте сварного соединения

са перед наложением очередных слоев. Зачистка осуществляется с помощью абразивных кругов, в состав которых входит карбид кремния. Частицы карбида кремния при износе круга попадают в изготавливаемый шов.

На начальной стадии изготовления клиновидного СС №111, когда формируется корень шва и первые валики, зачистка металла и удаление абразива из области сварки затруднены. Можно предположить, что именно поэтому в этой области наиболее часто встречаются включения частиц карбида кремния. Карбид кремния не растворяет-



Элемент	Массовый процент	Атомный процент
<b>C</b>	22,85	40,87
<b>O</b>	1,17	1,57
<b>Si</b>	74,54	57,01
<b>Fe</b>	1,44	0,55
<b>Итого</b>	100,00	100,00

Рис. 9. Включения и несплошности в сварном шве (а): 1 – включение карбида кремния; 2 – пора; 3 – включение карбида кремния; 4 – включение оксида железа; 5 – основной металл; спектр и химический состав включения 1 (б)

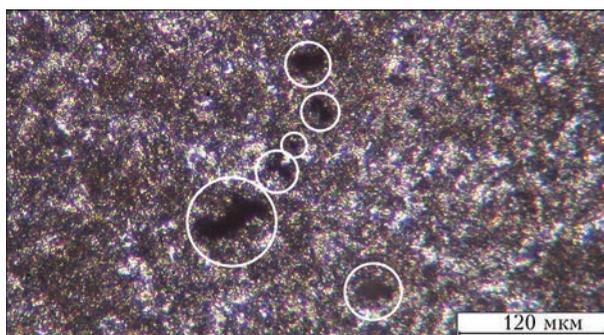
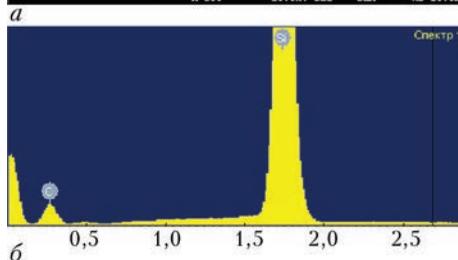
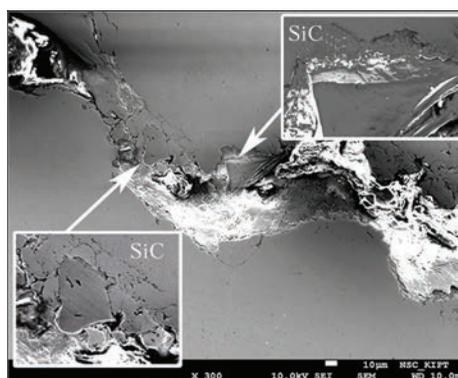


Рис. 10. Скопление пор (выделены кругами)

ся в расплаве металла и участвует в формировании макроструктуры. На рис.11 показаны частицы карбида кремния в металле.

Скопления SiC или отдельные частицы на границе сварных валиков могут создавать локальные напряжения. Коэффициент термического расширения SiC в несколько раз меньше, чем у стали – (3...4) и (16...18)·10<sup>-6</sup> соответственно, поэтому при кристаллизации расплава под действием возникающих напряжений возможно образование микротрещин с последующим их раскрытием и подрастанием в условиях эксплуатации. Зарождению трещин могут также способствовать углы неметаллических включений (как концентраторы напряжений). Эти дефекты не выявляются методами контроля сразу после изготовления и в начальный период эксплуатации; они становятся заметны при подрастании под действием эксплуатационных факторов (пуск-останов).



Элемент	Массовый процент	Атомный процент
<b>C</b>	22,17	39,97
<b>Si</b>	77,83	60,03
<b>Итого</b>	100,00	100,00

Рис. 11. Включения в сварном шве: а – расположение карбида кремния в металле шва; б – спектр включения и его химический состав

Параллельное расположение трещин является явным признаком того, что их рост связан с направленными напряжениями в СС. Небольшую длину трещин, которые образовались, можно объяснить тем, что трещина распространяется хрупко через столбчатую зону сварочного валика, но затухает вязко при входе в зону с мелкокристаллической структурой. Возникает вопрос об опасности такого растрескивания для эксплуатации. Локальный характер действия включений, затухание трещин от них в пределах одного-двух слоев сварочных валиков, а также направленность трещин под углом 40...50° к оси шва позволяют предположить, что их слияние в магистральную трещину маловероятно. Это дает основание допускать эксплуатацию соединения при условии регулярного контроля.

**Магнитные свойства и микроструктура металла.** Образцы для исследований магнитных свойств в различных зонах СС имели размеры 4,3×3,0×1,7 мм. Образцы изготавливали распиловкой темплета на пластинки толщиной 1,7 мм на фрезерном станке с последующей вырезкой образцов электроэрозионным методом. Магнитные свойства образцов определяли с помощью магнитного гистерографа с применением импульсно-индукционной методики [17] в соответствии с ГОСТ 8.377–80 [18].

Проведенные измерения показали, что для образцов с различным содержанием столбчатой микроструктуры магнитные свойства различны. На рис. 12 показаны образцы с разной микроструктурой. В подписях к рисункам указано содержание столбчатой структуры, усредненное по толщине образцов, номера образцов и измеренные значения коэрцитивной силы.

В таблице приведены значения процентного содержания столбчатой микроструктуры  $A_{cp}$ , полученные для них результаты коэрцитивной силы  $H_c$  (А/м), остаточной магнитной индукции  $B_r$  (Тл) и максимальной магнитной проницаемости  $\mu$ .

По результатам исследований можно констатировать, что имеют место существенные изменения измеренных магнитных параметров от микроструктурных особенностей образцов. В частности, для коэрцитивной силы наблюдается тенденция к увеличению  $H_c$  с увеличением содержания столбчатой микроструктуры в образцах. Так, в наплавленном металле с наибольшим содержанием мелкокристаллической структуры (образец № 1) имеют место наименьшие значения  $H_c$ , тогда как в образце с преимущественно столбчатой структурой (образец № 3) наблюдали в два раза большее значение  $H_c$ .

Указанные особенности можно объяснить тем, что  $H_c$  является фактором, который зависит от микроструктуры и текстуры материала, а также его напряженного состояния. Более высокие значения коэрцитивной силы для столбчатой структуры по сравнению с мелкокристаллической можно объяснить неоднородным распределением продуктов распада аустенита. Это приводит к напряженному состоянию столбчатых слоев. Подтверждением этого являются результаты ранее проведенных исследований микроструктуры и микротвердости многослойного СС № 111 [19], где было отмечено, что в слоях с мелкокристаллической структурой трещины развиваются вязко, а в столбчатой структуре – хрупко, что является признаком напряженного состояния металла в столбчатых слоях.

**Водород в сварном соединении.** Концентрацию водорода в металле сварного соединения приварки патрубка к коллектору парогенератора определяли путем термоактивированной де-

**Процентное содержание столбчатой микроструктуры и магнитные параметры образцов**

Номер	$A_{cp}$ , %	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл	$\mu$
1	0	430	0,103	150
2	68	524	0,074	89
3	92	831	0,096	106

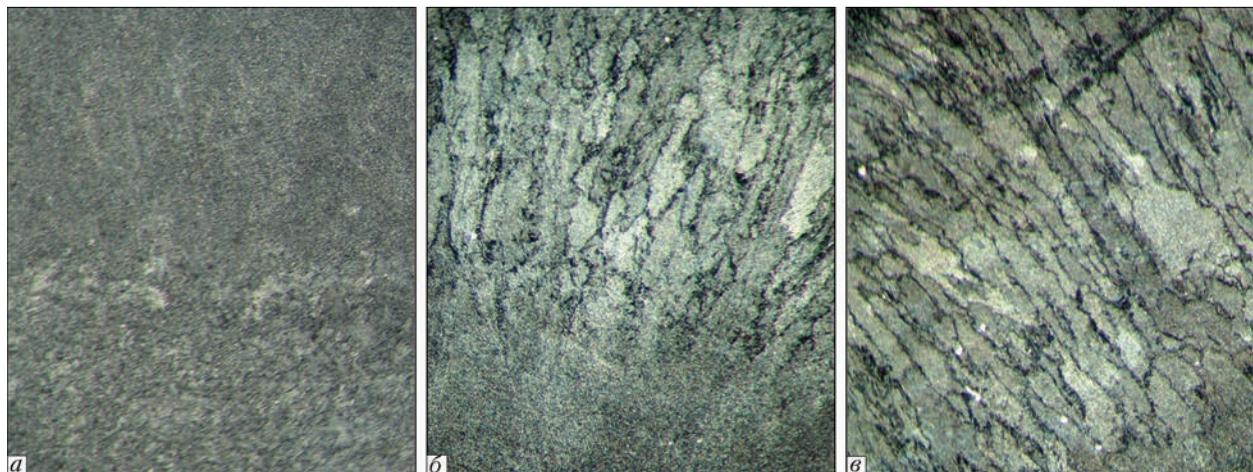


Рис. 12. Микроструктура и магнитные свойства образцов: а – образец № 1, структура кристаллическая,  $H_c = 430$  А/м; б – образец № 2, структура столбчатая 68 %,  $H_c = 524$  А/м; в – образец № 3, структура столбчатая 92 %,  $H_c = 831$  А/м

сорбции [20, 21]. При этом применяли динамический метод анализа содержания газа. Метод основан на измерении давления в вакуумной камере, которое прямо пропорционально скорости десорбции газов из прогреваемого образца. Измерения выполнены с помощью масспектрометра MX 7304. В этих экспериментах отжиг образцов в интервале температур 300...1500 К вели со скоростью 6 град·с<sup>-1</sup>. Нагрев образцов осуществляли резистивным методом. Давление остаточных газов в камере составляло около 5·10<sup>-5</sup> Па. Количественные характеристики выделения водорода из металла образцов получали при формировании навесок массой приблизительно 0,2 г и размером 1×1×72 мм. Полученные температурные зависимости скорости десорбции показаны на рис.13. Содержание водорода в образцах определяли путем интегрирования этих кривых.

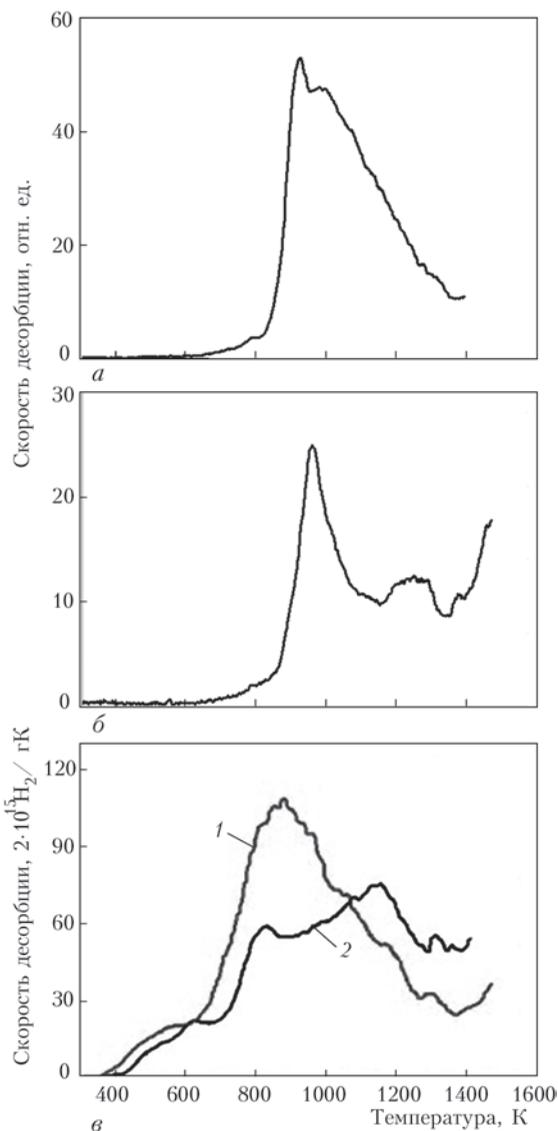


Рис. 13. Распределение водорода в сварном шве: а – в зоне корня шва; б – на расстоянии 10 мм от поверхности; в – мелкокристаллическая (1) и столбчатая (2) микроструктуры

Результаты исследований свидетельствуют о том, что после длительной эксплуатации парогенератора водород накапливался в области корня сварного шва, которая граничит с рабочей средой второго контура. Концентрация водорода в этой зоне достигает 36 см<sup>3</sup>/100 г и постепенно снижается до 11 см<sup>3</sup>/100 г на глубине около 10 мм от поверхности.

Повышенное количество водорода у корня сварного шва можно объяснить тем, что на поверхности металла проходят процессы коррозии. Вследствие взаимодействия металла с теплоносителем под влиянием рабочих факторов водород выделяется и диффундирует в металл. Можно также предположить, что насыщение металла водородом до указанных концентраций частично произошло за счет сварочного процесса.

Полученные результаты также свидетельствуют, что количество водорода в глубине сварного соединения меняется в зависимости от структуры металла и составляет около 8 см<sup>3</sup>/100 г для мелкокристаллической и 5 см<sup>3</sup>/100 г для столбчатой. Температура интенсивного выхода водорода из мелкокристаллической структуры составляет ~ 850 К; для столбчатой – 800 и 1150 К.

### Выводы

Проведены комплексные исследования состояния металла сварного шва №111 в соединении коллектора с парогенератором ПГВ-100 после длительной эксплуатации на энергоблоке № 3 Южно-Украинской АЭС, включающие методы магнитного контроля, металлографии, растровой электронной микроскопии и микрорентгеновского анализа, а также метод водородного анализа путем термодесорбционной масспектрометрии.

В результате проведенных исследований было установлено, что металл сварного шва № 111 соответствует низколегированной ферритно-перлитной стали, имеет полосчатую структуру с чередованием столбчатых и мелкокристаллических слоев, что характерно для многопроходной электросварки. Показано, что микротвердость металла изменяется периодически в соответствии с микроструктурой шва, при этом значения микротвердости лежат в пределах требований технических условий к материалу сварного шва.

Методами неразрушающего контроля были обнаружены несплошности в сварном шве, превышающие нормативные требования. Методами металлографии и электронной микроскопии несплошности были идентифицированы как поры размерами до 1 мм и трещины длиной до 5 мм. Было установлено, что трещины развиваются от частиц карбида кремния, которые были занесены во время изготовления СС. Исследование строения дефектов показало, что их величина и

локальное расположение в металле допускает дальнейшую эксплуатацию сварного соединения при условиях регулярного контроля.

Напряженно-деформированное состояние в СС № 111, установленное с помощью коэрцитиметрии и магнитной памяти металла, коррелирует с данными ультразвукового контроля и соответствует результатам металлографических исследований.

*Авторы благодарны за помощь в работе сотрудникам Южно-Украинской АЭС А. В. Бажукову, А. М. Палию и П. Е. Мельнику*

1. Комплексний підхід до визначення ресурсу зварного з'єднання приварки патрубків до колектору парогенератора ПГВ-1000М реактора ВВЕР-1000 / Л. С. Ожигів, А. С. Митрофанов, Є. О. Крайнюк [та ін.] // 36. наукових статей за результатами, отриманими в 2013–2015 рр. Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». – К.: Ін-т електросварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2015. – С. 314–327.
2. Внутренние несплошности в швах сварных соединений приварки коллекторов к патрубкам корпусов парогенераторов на энергоблоках ВВЭР-1000 / В. Н. Воеводин, Л. С. Ожигів, А. С. Митрофанов [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 11–12. – С. 8–13.
3. Дубов А. А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля. Учебное пособие / А. А. Дубов, Ал. А. Дубов, С. М. Колокольников. – М.: ЗАО «Тиссо», 2003. – 320 с.
4. Каталог данных неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния корпусов реакторов типа ВВЭР-1000 и трубопроводов АЭС / И. М. Неклюдов, Л. С. Ожигів [и др.] // Свідчення про реєстрацію авторського права на твір №41953 від 30.01.2012 р.
5. Перераспределение напряжений в узле соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при его нагружении после термообработки // В. В. Харченко, Г. В. Степанов, В. И. Кравченко [и др.] // Проблемы прочности. – 2009. – № 3. – С. 25–31.
6. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – К.: Наукова думка, 2006. – 620 с.
7. Влияние воды высоких параметров на склонность стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, О. Ю. Петров [и др.] // Машиностроение и инженерное образование. – 2007. – № 4. – С. 35–41.
8. Эрозионно-коррозионный износ оборудования атомных электростанций / В. И. Бараненко, Б. И. Нигматулин, Т. Е. Щедеркина [и др.] // Атомная техника за рубежом. – 1995. – № 8. – С. 9–13.
9. Про причини ушкодження зварних з'єднань № 111 парогенераторів ПГВ-1000 / А. С. Митрофанов, Л. С. Ожигів, Є. О. Крайнюк [та ін.] // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. – Т.1 4, № 4. – С. 79–83.

10. Повышение надежности эксплуатации коллекторов парогенераторов ПГВ-1000–1000М / Ю.Г. Драгунов, О.Ю. Петрова, С.Л. Лякишев [и др.] // Атомная энергия. – 2008. – 104, № 1. – С. 9–13.
11. Лобанов Л. М. Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрцитиметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса / Л. М. Лобанов, А. Ю. Бондаренко, Ю. К. Бондаренко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 1. – С. 3–8.
12. Махненко В. И. Трещины стресс-коррозии в зоне сварного соединения № 111 парогенераторов ПГВ-1000М энергоблоков ВВЭР-1000 (проект 1.1) / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко // Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкції, споруд та машин. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 2–10.
13. Чирков А. Ю. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций / А. Ю. Чирков. – К.: Изд-во Ин-та проблем прочности, 2003. – 250 с.
14. Неклюдов И. М. Эксплуатационные повреждения теплообменных трубок и сварных соединений в парогенераторах энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 / И. М. Неклюдов, В. М. Ажажа, Л. С. Ожигів [и др.] // Проблемы прочности. – 2008. – № 2 (392). – С. 105–111.
15. Заготовки из стали марки 10ГН2МФА, 10ГН2МФА-ВД, 10ГН2МФА-Ш для оборудования АЭС. ТУ 0893-014-00212179–2004 (взамен ТУ 108.766–86). – [Введен. 2005-02-01]. – М.: Госстандарт России ВНИИстандарт, 2005. – 28 с.
16. Идентификация несплошностей в металле сварного соединения корпуса парогенератора с коллектором на энергоблоках ВВЭР-1000 / В. Н. Воеводин, Л. С. Ожигів, А. С. Митрофанов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2014. – № 4 (92). – С. 82–87.
17. Чечерников В. И. Магнитные измерения / В. И. Чечерников. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – 387 с.
18. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик: ГОСТ 8.377–80. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 21 с.
19. Особенности поврежденных сварных соединений № 111 в парогенераторах энергоблоков ВВЭР-1000 / И. М. Неклюдов, Л. С. Ожигів, А. С. Митрофанов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 2. – С. 18–25.
20. Неклюдов И. М. Сочетание метода ядерных реакций, термодесорбционной спектроскопии и двухлучкового облучения при исследовании поведения гелия и водорода в конструкционных материалах / И. М. Неклюдов, Г. Д. Толстолуцкая, В. В. Ружицкий [и др.] // Тр. XIV Международного совещания «Радиационная физика твердого тела» г. Севастополь, 5–10 июля 2004 г. – М.: ГНУ «НИИ ПМТ», 2004. – С. 592–596.
21. Неклюдов И. М. Гелий и водород в конструкционных материалах / И. М. Неклюдов, Г. Д. Толстолуцкая // ВАНТ. – 2003. – № 3. – С. 3–14.

Coercimetry and magnetic memory techniques were used to perform diagnostic testing of stress-strain state of metal in the assemblies connecting collectors to housing of PVG-100M steam generator after long-term operation in power unit of South-Ukrainian NPP. Results of comprehensive studies of metal state were analyzed. Microcracks, pores and nonmetallic inclusions were detected and identified, and their composition was determined. Change of metal microhardness by weld height was studied. It is shown that in weld root zone the amount of accumulated hydrogen is three times higher than in other sections of welded joint metal. 21 References, 1 Table, 13 Figures.

*Keywords: steam generator, welded joint, service defects, metal microstructure, thermodesorption, stress-strain state, magnetic diagnostic techniques*

*Поступила в редакцию  
07.03.2016*