

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕСПЛОШНОСТЕЙ В МЕТАЛЛЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ КОРПУСА ПАРОГЕНЕРАТОРА С КОЛЛЕКТОРОМ НА ЭНЕРГОБЛОКАХ ВВЭР-1000

*В.Н. Воеводин, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, С.В. Шрамченко, Е.А. Крайнюк  
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: mitrofanov@kipt.kharkov.ua; тел. +38(057)335-65-42*

Несплошности в металле сварного шва узла соединения коллектора с корпусом парогенератора на энергоблоках ВВЭР-1000, обнаруженные ультразвуковым методом при плановом контроле и подтвержденные расположением зон концентрации напряжений, которые выявлены методами магнитной памяти и коэрцитиметрии, в результате проведенных металлографических исследований, были идентифицированы как поры и трещины, образующиеся от неметаллических включений. Состав включений, как было установлено микрорентгеноспектральным анализом, соответствует карбиду кремния SiC. Рассмотрено влияние обнаруженных дефектов на рабочий ресурс сварного узла.

Регулярный контроль металла оборудования и трубопроводов является неотъемлемой составляющей эксплуатации энергоблоков на АЭС. Большое разнообразие объектов контроля по геометрическим размерам, объемам, толщине и типам материалов предполагает применение различных методов неразрушающего контроля, которые постоянно развиваются с возрастом эксплуатации постоянных требований.

Для контроля узла приварки коллектора к парогенератору реакторной установки ВВЭР-1000 из всех видов неразрушающего контроля используются ультразвуковой, капиллярный и магнитные методы. Указанные методы являются косвенными, за исключением капиллярного, который применим лишь для выявления сквозных дефектов на внешней поверхности.

Показания, полученные косвенными методами, должны градуироваться с применением образцов с контрольными дефектами. Однако все разнообразие реальных дефектов нельзя воспроизвести на контрольных образцах. Для крупногабаритных толстостенных металлоконструкций идентификация и статистический набор данных по дефектам затруднены еще и ввиду исключительности случаев вывода таких конструкций из эксплуатации. Кроме того, чувствительность методов зависит от толщины металла (глубины залегания дефектов).

Многие вопросы решаются при привлечении методов визуализации дефектов (например, металлографии) и установлении корреляции данных, полученных этими методами и методами неразрушающего контроля.

При неразрушающем контроле сварного соединения корпуса парогенератора с коллектором была обнаружена серия внутренних несплошностей в зоне наплавленного металла. Величина несплошностей превышала допустимые нормативные значения. При ремонте сварного соединения была произведена выборка металла с несплошностями.

Целью настоящей работы являлись идентификация обнаруженных несплошностей с

помощью металлографии и рентгеновского микроанализа и оценка возможностей методов неразрушающего контроля толстостенных соединений в обнаружении несплошностей исследованного типа на ранней стадии развития.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований являлись сварное соединение «горячего» коллектора с патрубком Ду 1200 корпуса парогенератора ПГВ-1000М (сварное соединение №111-1), а также металл сварного шва, который был исследован на темплетях, вырезанных при ремонте этого соединения.

Контроль сварного соединения на энергоблоке осуществляли: ультразвуковым (УЗК), методом коэрцитиметрии (МК) и методом магнитной памяти металла (ММП).

При УЗК узла приварки коллектора к парогенератору реакторной установки ВВЭР-1000 методикой МЦУ-11-98п [1] были выявлены дефектные зоны в соединении №111, в которых амплитуда отраженного сигнала превышала допустимые нормы эксплуатации. Принцип действия УЗК позволяет по характеристикам акустического сигнала регистрировать дефекты в металле как «несплошности», но не дает представлений о характере дефектов и возможностях их развития.

При контроле МК измеряется напряженность магнитного поля, необходимая для размагничивания предварительно намагниченного до насыщения изделия или его локального участка [2, 3]. Измеряя параметр  $H_c$ , определяют напряженно-деформированное состояние в металлоконструкции и наличие дефектов структуры в металле. При контроле МК был использован коэрцитиметр КРМ-ЦК-2М с приставным датчиком (на основе датчика Холла) и цифровой индикацией сигналов в единицах напряженности магнитного поля – А/м.

Контроль методом магнитной памяти металла (ММП-контроль) применяется для определения зон

концентрации механических напряжений в металле сварных соединений. При контроле ММП измеряются напряженность магнитного поля и ее градиент путем сканирования феррозондовым датчиком поверхности контроля. Сигналы от датчика записываются в виде графиков распределения напряженности магнитного поля и ее градиента по исследуемой поверхности; по графикам можно судить о наличии зон концентрации напряжений [4].

ММП-контроль осуществлялся с помощью магнитометра ИКН-1М-3.

Металлографическим исследованиям были подвергнуты темплеты отбракованного металла, которые были вырезаны при ремонте сварного соединения и обработаны на шлифовальном станке до получения плоскопараллельных поверхностей. Радиографией и ММП определяли расположение внутренних несплошностей в металле темплетов, затем их разрезали на фрагменты, в которых несплошности выявляли путем послойного удаления металла.

Анализ формы, размеров и расположения дефектов осуществляли методами металлографии с использованием микроскопа металлографического ММО-1600-АТ и сканирующего электронного микроскопа JEOLJSM-7001F с катодом Шоттки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показано схематичное изображение сварного соединения и расположение дефектных зон. Обнаруженные с помощью МК и УЗК зоны концентрации напряжений (ЗКН) и зоны с несплошностями обозначены желтым и красным цветом соответственно. ЗКН, определенные ММП-контролем, указаны на рис. 1 с внутренней стороны сварного соединения.

С помощью стандартизованной методики УЗК, предназначенной для выявления в сварных швах и околошовной зоне различных дефектов без расшифровки их характера, но с указанием координат, условных размеров и количества, было установлено, что по этим параметрам дефекты в участках, указанных на рис. 1, превышают браковочные уровни, установленные для соединения №111 нормативными требованиями, что и явилось причиной ремонта соединения.

Контроль магнитными методами выявил зоны концентрации напряжений практически в тех же местах соединения, где УЗК показал наличие несплошностей.

Как видно из рисунка, места с несплошностями, обнаруженными УЗК, тождественны зонам концентрации напряжений, выявленным магнитными методами.

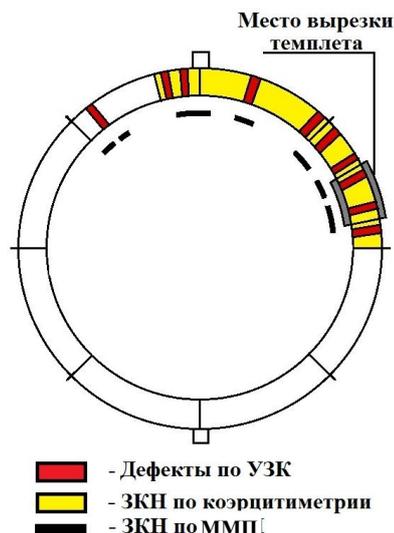


Рис. 1. Расположение несплошностей и зон концентрации напряжений на схеме сварного соединения: красный – УЗК; желтый – коэрцитиметрия; отрезки черного цвета – магнитная память металла

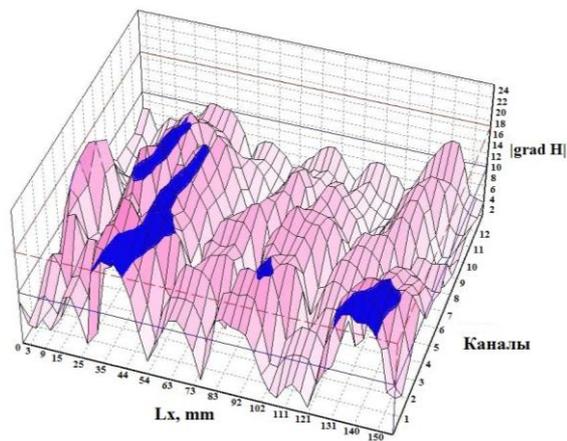
Исследования, проведенные для визуализации несплошностей и зон концентрации напряжений в металле сварного шва, были выполнены на темплете длиной 180 мм, шириной 72 мм и толщиной 27 мм, расположение которого в сварном соединении показано на рис. 1.

Путем построчного сканирования поверхности темплетом было исследовано распределение собственных магнитных полей рассеяния в нем (рис. 2,а). По оси « $L_x$ » отложены расстояния вдоль темплетом, по оси «каналы» отложены номера строк сканирования (расстояние между строками сканирования, либо каналами, составляет 6 мм), по оси «grad H» отложен градиент напряженности магнитного поля  $dH_p/dx$  (магнитный параметр, используемый при ММП-контроле). Места, где  $dH_p/dx$  в четыре раза превышает средний уровень по металлу, согласно [5-7] являются зонами концентрации напряжений. Проведенные измерения позволили составить картограмму расположения зон повышенной концентрации напряжений на поверхности темплетом. На рис. 2,б эти зоны отмечены цифрами 1-4 и обведены контурами.

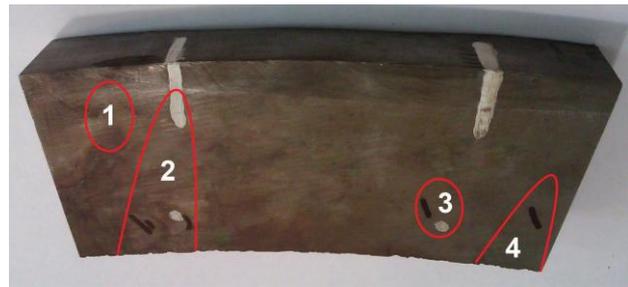
Радиографическая дефектоскопия через толщину темплетом показала наличие структурных дефектов в этих же зонах.

Расположение несплошностей в темплетом было также определено из результатов УЗК сварного соединения.

Темплет с разметкой аномальных зон по результатам УЗК, радиографии и ММП-контроля показан на рис. 2,б.



*a*



*b*

*Рис. 2. Результаты контроля темплета: а – график распределения собственных магнитных полей рассеяния с отмеченными зонами концентрации напряжений; б – темплет с разметкой аномальных зон по результатам УЗК, радиографии и ММП*

Белыми метками обозначены направление и глубина залегания несплошностей, обнаруженных УЗК, красными линиями обведены зоны концентрации напряжений 1-4, черные штрихи показывают места неоднородностей по радиографии.

Металлографические исследования проводили на макро- и микрошлифах в поперечном сечении темплета.

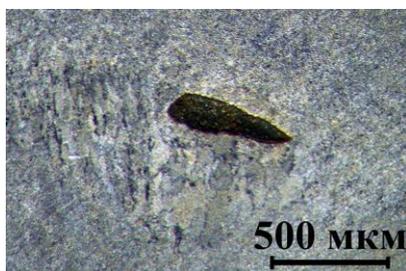
Исследования показали, что сварной шов имеет многослойную структуру с чередующимися

мелкокристаллическими и столбчатыми слоями (рис. 3,а), свойственную сварным соединениям, полученным многопроходной электродуговой сваркой.

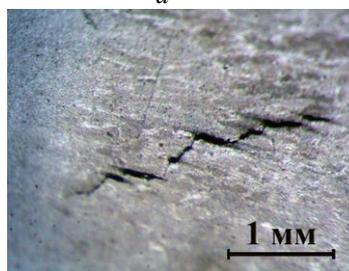
В зонах темплета 1-4 (см. рис. 2,б) при послойном снятии металла были обнаружены отдельные трещины длиной до 3 мм и поры размерами до 0,6 мм, типичный вид которых показан на рис. 3,б и в.



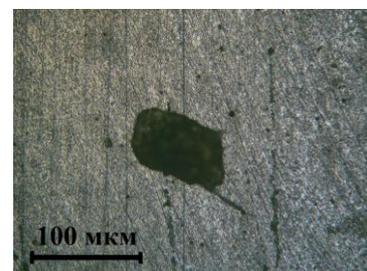
*a*



*б*



*в*



*г*

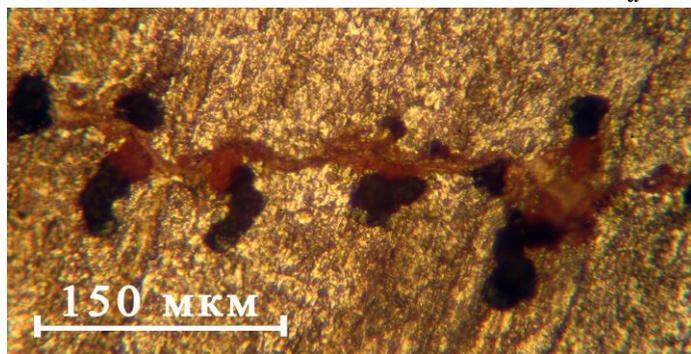
*Рис. 3. Макро- и микроструктуры металла на шлифе в поперечном сечении темплета: а – структура сварного шва; б – пора; в – трещина; г – неметаллическое включение*

Также встречаются неметаллические включения в виде краугольных кристаллов размерами до 100 мкм (см. рис. 3,г), причем включения часто находятся в руслах трещин. Трещины от начала появления на поверхности до полного затухания

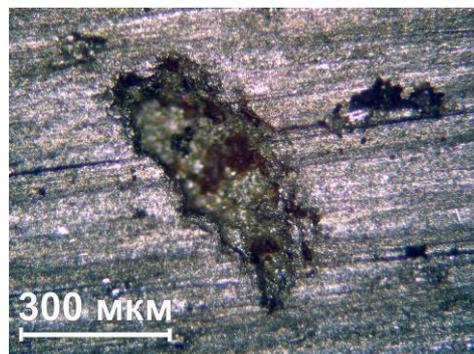
были исследованы по глубине залегания при послойном снятии металла. Было установлено, что глубина трещин так же, как и длина, не превышает 3 мм. При этом в трещинах наблюдаются участки скопления включений, как показано на рис. 4,а.



а



б



в

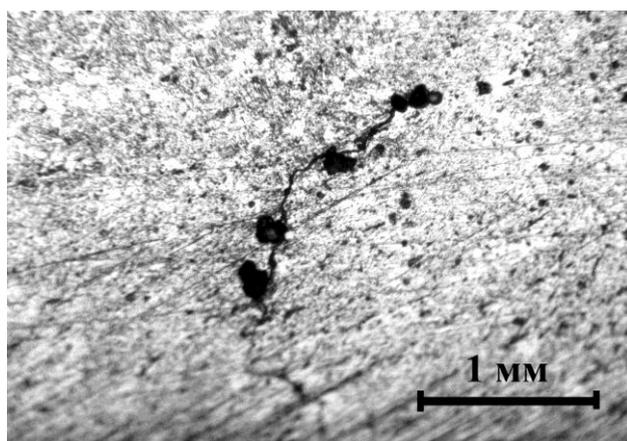
Рис. 4. Несовершенства металла сварного соединения: а – общий вид; б – зона скопления включений; в – пора

На глубине около 2,5 мм от начала обнаружения трещины в ее русле выявлено скопление включений (см. рис. 4,б). При дальнейшем снятии слоя металла на 0,5 мм под трещиной была обнаружена пора длиной 0,6 и шириной 0,2 мм (см. рис. 4,в). Ниже поры дефектов в металле не выявлены.

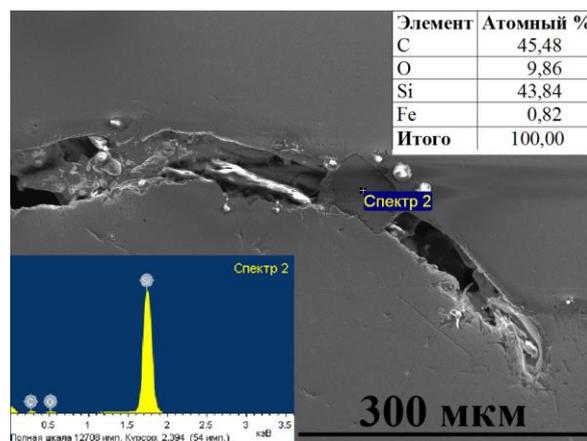
В зоне 1 (см. рис. 2,б) была обнаружена сомкнутая трещина, показанная на рис. 5, которая стандартизированной методикой УЗК не была определена как несплошность. Трещина проходит

через группу включений и отличается от уже описанных трещин тем, что по всей глубине залегания длина ее не превышает 1,5 мм.

Обнаруженные включения чаще всего находятся в трещинах, порах или вблизи них, как показано, например, на рис. 5. Установленный рентгеновским микроанализом состав включений близок к карбиду кремния SiC (типичный состав включений показан на вставке к рис. 5,б).



а



б

Рис. 5. Трещины с включениями: а – трещина в зоне 1; б – включение карбида кремния в полости трещины

Присутствие в металле шва включений карбида кремния можно объяснить особенностями технологии сварки, при которой предусмотрена последовательная зачистка валиков от образующихся шлаков с использованием абразивных кругов. Так как в состав абразивных материалов для изготовления шлифовальных кругов входят микрофракции порошков карбида кремния,

то при зачистке возможно внедрение этих частиц в обрабатываемый металл, особенно между валиками.

Сопоставление результатов примененных методов неразрушающего контроля с полученными данными металлографических исследований позволяет утверждать, что обнаруженные несплошности и зоны концентрации напряжений в сварном шве идентифицируются с выявленными

структурными дефектами в наплавленном металле (трещины, поры и включения). Магнитные методы регистрируют локальные напряжения, создаваемые вокруг включений, тогда как УЗК регистрируют поры и трещины как неоднородности структуры, развивающиеся вокруг включений.

Локальные напряжения, создаваемые включениями, частично релаксируют при образовании трещин, но не исчезают полностью и регистрируются ММП и МК как зоны концентрации напряжений. Сопутствующие включениям поры и трещины являются объектами, регистрируемыми методиками УЗК. От сомкнутых трещин длиной 1,5 мм и менее сигнал находится в пределах методического допуска. Этим можно объяснить тот факт, что трещина в зоне 1 темплета не была отмечена при УЗК, и в то же время ММП выявил в этом месте зону концентрации напряжений.

Полученные в работе экспериментальные данные указывают на то, что магнитные методы контроля способны регистрировать не только несплошности в металле, но также и неметаллические включения. Это может быть важным на предэксплуатационной стадии контроля металлоконструкций, когда несплошности в металле не получили еще достаточного развития и не воспринимаются УЗК. Полученные в настоящей работе данные по включениям частиц карбида кремния в металле сварных швов и роли этих включений в процессах образования пор и трещин свидетельствуют о целесообразности развития методической и приборной базы магнитных методов для обеспечения возможности их применения в технологическом контроле изготовления ответственных металлоконструкций.

Очень важным является вопрос о влиянии обнаруженных неоднородностей микроструктуры наплавленного металла на рабочий ресурс сварного соединения. В проведенных исследованиях не были обнаружены трещины более 3 мм, выходящие за пределы одного–двух валиков, и можно предполагать, что со временем эксплуатации при подрастании трещин до указанной длины происходит релаксация напряжений со стороны включений до величины, не достаточной для дальнейшего роста трещин. Исходя также из направленности трещин, можно считать маловероятным слияние их в магистральную.

Эти особенности строения трещин в металле исследованного темплета дают основания считать безопасной дальнейшую эксплуатацию сварных соединений №111 с несплошностями исследованного типа при условии проведения регулярного контроля.

В то же время имеется вероятность слияния исследованных внутренних дефектов с трещинами от коррозионных язв на поверхности металла [8], что делает возможным начало необратимого процесса развития несплошностей.

В сводке сведений о поврежденных сварных соединениях №111 на энергоблоках ВВЭР-1000 [2] указано, что из 19 вышедших из строя в разное время парогенераторов 14 были изготовлены на

заводе Атоммаш в 1988, 1989 гг. В сводке показано, что частота выхода из строя парогенераторов на разных станциях различна, наработка парогенераторов до первого ремонта составляла от 9 до 20 лет. Рассматривались разные причины повреждений, чаще всего их объясняли коррозионным растрескиванием под напряжением, несоблюдением правил эксплуатации, например, нарушением водохимических режимов, а также нерегулярностью химических отмывок от шламовых отложений, повышенной напряженностью узла и другими факторами [3, 9-11]. Следует отметить отсутствие системности в объяснении инцидентов. В то же время случайный характер наблюдаемых повреждений на основании проведенных исследований можно объяснить развитием внутренних трещин от хаотично расположенных включений и слиянием их с трещинами от коррозионных язв, растущих со стороны внутренней поверхности металла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При контроле сварного узла приварки коллектора к корпусу парогенератора на одном из энергоблоков ВВЭР-1000 методами неразрушающего контроля было показано, что расположение несплошностей в металле, обнаруженных УЗК, совпадает с зонами концентрации напряжений, выявленными МК и ММП металла.

Проведенными металлографическими исследованиями темплета несплошности и ЗКН были идентифицированы как поры и трещины, вызванные в металле сварного шва включениями карбида кремния. Экспериментально установлено, что магнитные методы контроля могут регистрировать напряжения, создаваемые частицами включений в металле сварного шва на той стадии, когда еще не проявляются несплошности, регистрируемые УЗК.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.Н. Рызраев. Результаты использования методики ручного ультразвукового контроля узла приварки коллектора к парогенератору реакторной установки ВВЭР-1000 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Обеспечение безопасности АЭС»*. Подольск: Гидропресс, 2011, в. 29, с. 61-69.
2. Обеспечение надёжности сварных соединений №111 ПГ ВВЭР-1000 // *Совещание на площадке ЗАЭС, Украина, г. Энергодар, 29-30.11.2011 г.*
3. А.Ю. Чирков, В.В. Харченко, С.В. Кобельский, В.И. Кравченко и др. Напряжённое состояние узла приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-100М при воздействии эксплуатационных нагрузок с учётом остаточных технологических напряжений // *Проблемы прочности*. 2013, №4, с. 98-106.
4. ДСТУ 4857:2007. *Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу*: Загальні вимоги.

Введ. 2009-01-01. Київ: Держспоживстандарт України, 2008, 10 с.

5. А.А. Дубов, Ал.А. Дубов, С.М. Колокольников. *Метод магнитной памяти металла и приборы контроля*: Учебное пособие. М.: Издательский дом «Спектр», 2012, 395 с.

6. Л.С. Ожигов, С.В. Шрамченко. Магнитный контроль сварных соединений приварки коллектора теплоносителя к патрубку корпуса парогенератора энергоблоков ВВЭР-1000 // *Сб. научных трудов XXI Международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»*, 07-11 октября 2013 г., г. Гурзуф, АР Крым.

7. Г.Я. Безлюдько, С.Н. Ковбасенко, В.В. Корниенко. Диагностика сварных соединений ядерных энергоблоков с помощью магнитных методов оценки ресурса металла // *Сварщик. Информационно-технический журнал*. 2005, №2, с. 13-15.

8. И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, В.Н. Воеводин и др. Особенности

коррозионной повреждаемости сварных соединений парогенераторов ВВЭР-1000 // *Физика и химия обработки материалов*. 2013, №2, с. 18-25.

9. В.В. Потапов, В.Г. Веземский. Механизм разрушения металла зоны сварного соединения №111 и его обоснование // *Надійність і довговічність машин і споруд*. 2013, в. 37, с. 37-40.

10. В.А. Федорова, Б.З. Марголин, В.И. Костылев. Анализ возможных причин повреждений узла приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000М // *Сборник тезисов докладов 8-й Международной конференции (14-17 июня 2004)*. Санкт-Петербург, Сосновый Бор, 2004.

11. С.А. Харченко, Н.Б. Трунов, В.В. Денисов, Н.Ф. Коротаев. Анализ причин повреждения металла в зоне сварного шва №111 парогенераторов ПГВ-1000М // *Сборник трудов 7-го Международного семинара по горизонтальным парогенераторам*. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2006.

*Статья поступила в редакцию 01.07.2014 г.*

## **ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕСУЦІЛЬНОСТЕЙ В МЕТАЛІ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ КОРПУСУ ПАРОГЕНЕРАТОРА З КОЛЕКТОРОМ НА ЕНЕРГОБЛОКАХ ВВЕР-1000**

***В.М. Воєводин, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, С.В. Шрамченко, Є.О. Крайнюк***

Несуцільності в металі зварного шва вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора на енергоблоках ВВЕР-1000, котрі визначені ультразвуковим методом при плановому контролі та які було підтверджено розташуванням зон концентрації напружень, виявлених методами магнітної пам'яті і коерцитиметрії, за результатами проведених металографічних досліджень, було ідентифіковано як пори та тріщини, що утворилися від неметалевих включень. Елементний склад включень, як було встановлено мікрорентгеноспектральним аналізом, відповідає карбиду кремнію SiC. Розглянуто вплив виявлених дефектів на робочий ресурс зварного вузла.

## **IDENTIFICATION OF DEFECTS IN THE METAL OF WELD OF THE CASE OF STEAM GENERATOR TO THE COLLECTOR ON THE WWER-1000**

***V.N. Voyevodin, L.S. Ozhigov, A.S. Mitrofanov, S.V. Shramchenko, Y.A. Krainyuk***

In the metal of the weld of the node connecting of collector with case of steam generator for power units of VVER-1000 by ultrasonic method found defects. Location defects also confirmed by the existence of stress concentration, which are identified by magnetic memory method and coercimetry method. Metallographic method has been established that defects are pores and also cracks, which formed by non-metallic inclusions. Microprobe analysis showed that non-metallic inclusions are silicon carbide SiC. The influences of the defects found on the working resource of the weld have been considered in the text.