

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.791

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ  
РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ВВЭР**

© 2016 Н.Н. Подрезов \*, С.А. Томилин \*, В.В. Шишов \*\*

\* Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

\*\* Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск,  
Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В конструкции парогенераторов ПГВ-1000 и ПГВ-1000М для реакторных установок на основе водо-водяных энергетических реакторов существует ряд проблемных швов, снижающих эксплуатационную надежность изделия. Это следует из статистики повреждаемости указанного энергетического оборудования и выявляется при планово-предупредительных ремонтах в условиях атомных электрических станций. Особого внимания требуют кольцевые швы № 111-1 и № 111-2 приварки холодного и горячего коллекторов к патрубку Ду 1200, которые работают в условиях прогрессирующей стресс-коррозии, что приводит, в ряде случаев, к потере их конструкционной прочности через 5 – 25 лет после пуска реакторных установок.

В работе рассмотрена технология сварки указанных швов в условиях Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск. Предложены производственные меры, реализация которых направлена на повышение технологической свариваемости рассматриваемых швов с целью уменьшения уровня остаточных сварочных напряжений в критической зоне, в качестве которой согласно отраслевой Методике оценки срока службы узла приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000 принята зона перехода от «кармана» коллектора к патрубку Ду 1200.

*Ключевые слова:* парогенератор, сварное соединение, дефекты сварного шва, остаточные сварочные напряжения, эксплуатационная надежность.

Поступила в редакцию 15.12.2016

С 2013 г. изготовление полных комплектов парогенераторов атомных электрических станций (АЭС) проектов В-320 и АЭС-2006 поручено филиалу АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск. Как показал опыт изготовления первых комплектов конструкции парогенераторов ПГВ-1000, ПГВ-1000М для реакторных установок на основе водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) по сварным соединениям являются технологичными. Однако в парогенераторе есть ряд проблемных сварных соединений, снижающих эксплуатационную надежность изделия, что следует из статистики их повреждаемости, выявляемой при планово-предупредительных ремонтах в станционных условиях.

Особое внимание уделяется кольцевым швам № 111-1 и № 111-2 (далее – СС №111) приварки холодного и горячего коллекторов к патрубку Ду 1200. Эти швы, как известно [1], работают в условиях прогрессирующей стресс-коррозии, что приводит, в ряде случаев, к потере их конструкционной прочности через 5 – 25 лет после пуска реакторных установок. Например, 5ПГ1 на Нововоронежской АЭС введен в

эксплуатацию в сентябре 1989 г. В 2013 г. обнаружены трещиноподобные дефекты на участке 510 мм. Срок эксплуатации до обнаружения дефектов составил 24 года.

В данный момент отсутствует тенденция к уменьшению количества ремонтов СС №111 на отечественных АЭС. Следствием этого стала разработка в 2014 г. отраслевой Методики оценки срока службы узла приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000. В качестве критической зоны принята зона перехода от «кармана» коллектора к патрубок Ду 1200 (галтель радиусом 20 мм), расположенная ниже СС № 111, рис.1.

В основу методических расчета положен учет возможности развития в «кармане» коллектора макротрещин вследствие замедленного деформационного коррозионного растрескивания. Стресс-коррозионное разрушение реализуется в условиях водно-химического режима второго контура, поддерживающего коррозионно-активную среду при следующих условиях:

- наличие концентраторов напряжений (центров активации), запускающих автокаталитические процессы питтинговой и язвенной коррозии на поверхности «кармана»;
- действие растягивающих напряжений на уровне предела текучести в области СС №111 во время работы парогенератора в режимах, отличных от нормального (разогрев, повышение/понижение мощности, отключение/включение главного циркуляционного насоса и т.п.).

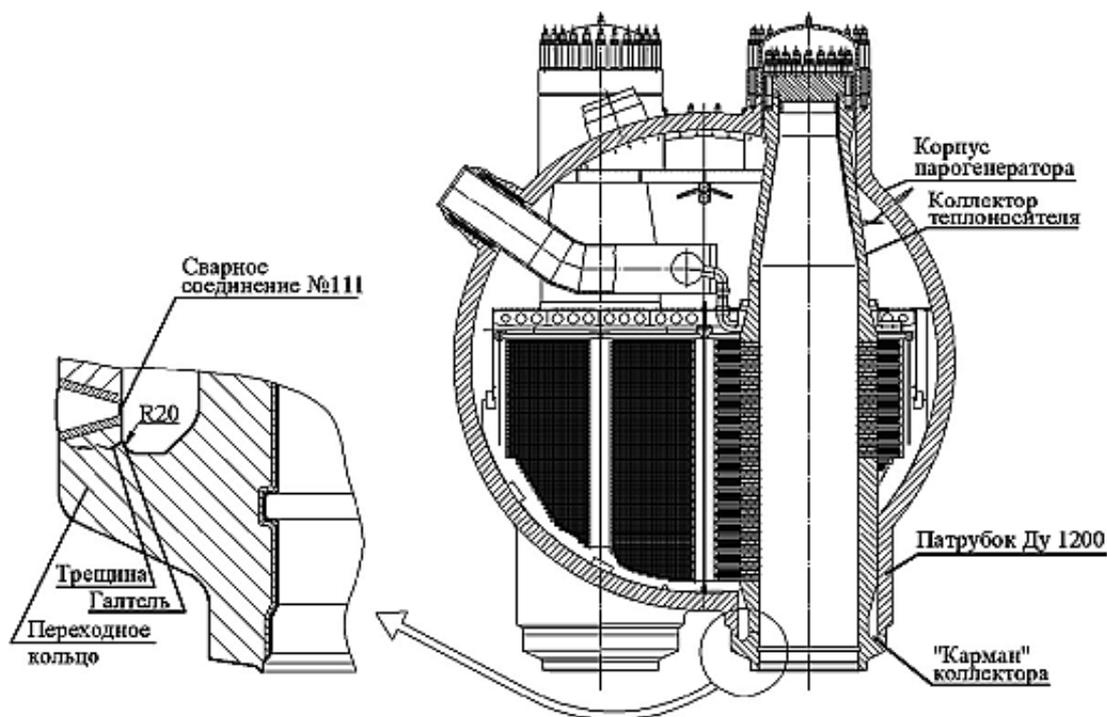


Рис. 1. – Критическая зона повреждаемости «кармана» коллектора

За последнее время проделана большая работа по снижению риска возникновения замедленного деформационного коррозионного растрескивания. В частности, изменена на более благоприятную форма разделки СС № 111 для парогенераторов более поздних модификаций ПГВ-1000МКП и ПГВ-1500М. В процессе эксплуатации предусмотрены процедуры гидродинамических отмывок, химических промывок и продувок для удаления шлама со стенок «карманов», оптимизируется переход на этаноламиновый водно-химический режим, снижающий интенсивность коррозии.

Поскольку разрушения сварных соединений носит задержанный по времени характер, то до последнего времени на производственные факторы их изготовления обращалось недостаточное внимание. Однако, измерение остаточных напряжений СС №111 на «горячих» коллекторах 5ПГ1-4 Нововоронежской АЭС, во время планово-предупредительного ремонта 2009 г. специалистами ВНИИАЭС и АО «ИНКОТЕС» методом акустоупругости показало [2], что на всех четырех 5ПГ1-4 остаточные напряжения в критических зонах СС №111 были сопоставимы с пределом текучести стали 10ГН2МФА. Как следствие, все парогенераторы энергоблока №5 Нововоронежской АЭС были повреждены в период 1998 – 2009 годов и отремонтированы (некоторые не один раз) в области СС № 111. Достижение уровня высоких эксплуатационных напряжений в области кармана стало возможным из-за высокой остаточной напряженности проблемного узла после сварки в производственных условиях.

В настоящее время специалистами Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск предпринят ряд мер для уменьшения остаточных напряжений, исключения концентраторов напряжений в «кармане» в рамках действующей технологии сварки СС №111.

При ручной аргонодуговой сварке корневой части шва для качественного формирования обратного валика предусмотрены герметизация зоны сварки и поддув аргона со стороны «кармана». После первого прохода корневой части СС №111 проводится визуальный оптический контроль эндоскопом на отсутствие подрезов, наплывов, непроваров в корне шва. В случае обнаружения дефекты устраняются с помощью специального пневматического инструмента с гибким приводом.

После завершения ручной аргонодуговой сварки корневой части выполняется ее радиографический контроль и аттестация на отсутствие дефектов. При обнаружении «непроходных» дефектов и невозможности их устранения с последующей подваркой, коллектор первого контура отрезается от корпуса парогенератора для восстановления кромок под сварку и новой сборки с патрубком Ду1200. Следует отметить, что такие экстраординарные случаи в производственных условиях Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск не отмечались и, по-видимому, маловероятны в дальнейшем.

Поводом для такого оптимистического прогноза является наличие на предприятии хорошо зарекомендовавшей системы подготовки и аттестации сварщиков для ручной аргонодуговой сварки и ручной дуговой сварки ответственных швов. Так, прежде чем приступить к сварке основного СС №111, даже аттестованные сварщики выполняют пробные сварные соединения, полностью имитирующие штатные. Пробное сварное соединение проходит все виды неразрушающих контролей, что и штатный шов, а на поперечном макрошлифе оценивается формирование шва и отсутствие дефектов в зоне сплавления. Однако после получения положительных заключений по результатам проведенных контрольных операций аттестованный сварщик еще не допускается к работе на штатном шве. Перед самым началом сварки он должен выполнить пробный шов на имитаторе и, только после положительного экспресс анализа имитационного пробного сварного соединения, наконец, получает окончательный допуск.

Заполнение разделки ручной дуговой сварки на полное сечение ведется при сопутствующем подогреве зоны сварного соединения до температур 100 – 200 °С двумя сварщиками одновременно, которые располагаются в диаметрально противоположных сторонах коллектора первого контура. Этих мер, как показывает опыт, достаточно для исключения деформаций увода коллектора от вертикальной оси, соблюдения заданных тепловых зазоров между коллектором первого контура и патрубком корпуса ПГВ

Ду800 и снижения неравномерности распределения временных и послесварочных остаточных напряжений в сварном соединении. После каждого прохода сварной шов слесарным способом зачищается до чистого металла, проводится визуальный контроль на отсутствие дефектов. В процессе сварки штатного СС № 111, длящегося двое суток в непрерывном режиме, постоянно контролируется температура сопутствующего подогрева во всех зонах сварного соединения.

После облицовки СС № 111 и проведения слесарных работ по финишной зачистке в технологическом процессе предусмотрена оценка качества на соответствие требованиям конструкторской документации. В процессе визуального и измерительного контроля обязательно эндоскопируется внутренняя (со стороны «кармана») поверхность сварного шва на предмет качественного и бездефектного обратного формования, а сам шов с прилегающей околосшовной зоной основного металла проходит цветную дефектоскопию, ультразвуковой контроль и рентгенографическую дефектоскопию. После аттестации результатов контроля по отраслевым нормам качества и получения положительных результатов сварные соединения №111-1 и № 111-2 одновременно подвергают местной термической обработке.

Местная термическая обработка применяется для стабилизации строго вертикального положения коллектора и снятия послесварочных напряжений. В качестве источника тепла используются нагревательные панели фирмы Hitachi Kokusai Electric, теплоизоляция располагается таким образом, чтобы обеспечить равномерный прогрев каждого из сварных соединений и прилегающего к ним основного металла. Режим местной термообработки (скорость подъема температуры не более 40 °С в час до 620 – 640 °С, выдержка 8 – 10 часов, регулируемое остывание до 200 °С со скоростью не более 30 °С в час) регламентирован и контролируется достаточным количеством термопар, выведенных на самописцы. После проведения термической обработки все этапы неразрушающего контроля повторяются.

Таким образом, описанная выше технология выполнения СС № 111 по приварке коллекторов первого контура к патрубку Ду1200 корпуса парогенератора обеспечивает требования, предъявляемые к этим швам и в целом к парогенератору конструкторско-технологической документацией проектной организации. Однако учитывая задержанный характер появления дефектов для снижения вероятности их возникновения спустя годы эксплуатации необходимо дополнительно реализовывать производственные меры, направленные, прежде всего, на повышение технологической свариваемости этих швов [3] с целью уменьшения уровня остаточных сварочных напряжений в критической зоне (рис.1). В частности, в качестве варианта рассматривается возможность автоматизации процесса сварки швов № 111-1 и № 111-2, заполнение которых сейчас выполняются в ручном режиме. Это позволит исключить влияние человеческого фактора и повысить прогнозируемость и повторяемость результатов изготовления проблемных швов и изделия в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дуб, А.В. и др. Разработка методик ультразвукового контроля и определения работоспособности узла приварки коллектора к парогенератору ПГВ-1000М [Текст] / А.В Дуб, В.А. Дурнынин и др. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – №4 – С. 36–51.
2. Гетман, А.Ф. и др. Причины повреждений сварных швов №111 ПГВ-1000 и предложения по их устранению [Электронный ресурс] / А.Ф. Гетман, А.И. Усанов, Б.И. Лукаевич, А.А. Тутнов, Л.А. Пасманик, В.А. Смирнов, А.В. Камышев. – Режим доступа: URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar8/documents/sgpg2010-017.pdf>. – 10.12.2016.

3. Доронин, Ю.В. и др. Необходимость формализации понятия свариваемости в производстве изделий АЭС [Текст] / Ю.В. Доронин, Н.Н. Подрезов // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – №3(12). – С. 26–30.

## REFERENCES

- [1] Dub A.V., Durynin V.A., etc. Razrabotka metodik ultrazvukovogo kontrolya i opredeleniya rabotosposobnosti uzla privarki kollektora k parogeneratoru PGV-1000M [Development of techniques of ultrasonic control and definition of welding knot operability of a collector to the PGV-1000M steam generator]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy control* [Technical diagnostics and nondestructive control], 2014, №4, ISSN 0235-3474, pp. 36–51. (in Russian)
- [2] Getman A.F., Usanov A.I., Lukasevich B.I., Tutnov A.A., Pasmanik L.A., Smirnov V.A., Kamyshev A.V. Prichiny povrezhdeniy svarnykh shvov №111 PGV-1000 i predlozheniya po ikh ustraneniyu [Damage reasons of welded seams № 111 PGV-1000 and offer on their elimination]. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar8/documents/sgpg2010-017.pdf> (in Russian)
- [3] Doronin Yu.V., Podrezov N.N. Neobkhodimost formalizatsii ponyatiya svarivaemosti v proizvodstve izdeliy AES [Need of formalization of welding concept for manufacturing of the NPP products]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global nuclear safety], 2014, №3(12), ISSN 2305-4141X, pp. 26–30. (in Russian)

### Operational Reliability Increase of Welded Connections of Steam Generators for PWR Reactor Installations

N.N. Podrezov\*<sup>1</sup>, S.A. Tomilin \*<sup>2</sup>, V.V. Shishov\*\*<sup>3</sup>

\* *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», 73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

<sup>1</sup> *e-mail: p1n2f@rambler.ru*; <sup>2</sup> *e-mail: SATomilin@mephi.ru*

\*\* *Atom mash the branch of JSC AEM-technology in Volgodonsk, Zhukovskoye shosse, 10, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

<sup>3</sup> *e-mail: shishov\_vv@atom mash.ru*

**Abstract** – A number of the problem seams reducing operational reliability of product exists in a design of PGV-1000 and PGV-1000M steam generators for pressurized water reactor installations. The special attention is required by ring seams № 111-1 and № 111-2 of welding of cold and hot collectors to Du 1200 branch pipe. These collectors work in the conditions of progressing stress corrosion that sometimes leads to loss of their constructional durability in 5 – 25 years after start-up of reactor installations.

In work the technology of welding of the specified seams at the Atom mash the branch of JSC AEM-technology in Volgodonsk is considered. Production measures which realization is directed to increase in a technological welding of the considered seams for the purpose of level reduction of residual welding tension in the critical zone are proposed. A critical zone is considered to be transition zone from collector "pocket" to Du 1200 branch pipe according to Technique of assessment of service life of the heat carrier welding collector knot to the PGV-1000 steam generator case.

*Keywords:* steam generator, welding connection, welded seam defects, residual welding tension, operational reliability.