

## ПРЕЦИЗИОННЫЕ НЕРЖАВЕЮЩИЕ ТРУБЫ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.

Канд. техн. наук Ан. В.Серебряков<sup>1</sup>, С.А. Ладыгин<sup>1</sup>, В.В. Мальцев<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук Ал. В.Серебряков<sup>2</sup>, канд. техн. наук С.И.Паршаков<sup>3</sup>,  
канд. техн. наук С.П. Буркин<sup>3</sup>.

1 ОАО «ПНТЗ», Первоуральск

E-mail: Andrey.Serebryakov@pntz.ru

2 ООО «Новые технологии труб», Первоуральск

E-mail: ntt@pervouralsk.ru

3 ФГАОУ ВПО УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени первого Президента России Б.Н.

Ельцина, Екатеринбург

E-mail: omd@mtf.ustu.ru

Сегодня крупнейшим потребителем нержавеющей труб становится атомная энергетика. Обеспечение гарантированной безопасности и экономической эффективности российских АЭС определяет новые, более высокие требования к качеству труб для АЭС.

Реализация поставленных целей требует решения важных технических задач, связанных с повышением надежности и увеличением ресурса работы оборудования АЭС. Достижение высоких эксплуатационных характеристик труб, как одного из важнейших элементов оборудования, делает актуальной задачу повышения качества поверхности и точности размеров холоднодеформированных труб из коррозионностойких сталей.

От качества поверхности зависят гидравлическое сопротивление и образование отложений в трубопроводах, сопротивление материала зарождению трещин при малоцикловой усталости и термоциклировании при механических напряжениях, стойкость к межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию [1, 4].

В качестве оболочки тепловыделяющего элемента (ТВЭЛа) используют бесшовные холоднодеформированные особотонкостенные трубы. ТВЭЛы устанавливают в кассету, кассеты в сборку. На один типовой блок АЭС для изготовления ТВЭЛов требуется около 200 тыс. метров труб. Точность размеров используемых труб определяет геометрическую стабильность реакторной сборки, и как следствие, – стабильность ядерно-физических и тепло-гидравлических характеристик реактора.

Тонкостенные трубы используют в качестве теплообменной поверхности в парогенераторах и конденсаторах АЭС. Как показывает практика, трубы в парогенераторах выходят из строя вследствие образования нерастворимых отложений шлама на поверхности трубы в локальных зонах перегрева. По мере роста отложений шлама, под ними начинают концентрироваться растворимые соли, которые при достижении определенной концентрации могут вызывать коррозионное растрескивание [2]. Одной из причин образования локальных зон перегрева является наличие продольной и поперечной разностенности труб теплообменников, что приводит к различию условий теплопередачи и, как следствие, к

неустойчивости паровой рубашки.

Таким образом, для повышения надежности и увеличения ресурса работы оборудования АЭС, необходимо обеспечить, в том числе, стабильность размеров и качества поверхности труб при гарантированном удовлетворении допускам и другим требованиям технических условий [3].

Анализ известных технологических схем производства труб показал, что применяемая на отечественных заводах технология производства холоднодеформированных труб из коррозионностойкой стали не гарантирует требуемого качества поверхности и точности их размеров [4]. Это привело к необходимости разработки другого подхода к решению поставленной задачи. Сочетание новых технологических решений и современных методов контроля качества труб позволило добиться поставленных целей.

### Новые технологические решения

На основе решения проблемы адгезионного разрушения поверхностного слоя деформируемого металла были созданы новые технологии, обеспечивающие достижение гарантированной точности размеров и качества поверхности труб [5, 6].

Новая технология реализована при поставке промышленных партий следующих труб:

- прецизионные особотонкостенные трубы размерами 5,2 x 0,2 мм; 9,4 x 0,2 мм; вн6,6 x 0,2 мм и вн11,6 x 0,2 мм из стали ЭИ847 по ТУ 14-159-293-2005, на которых обеспечена гарантированная точность размеров труб как по наружному так и по внутреннему диаметру  $\pm 0,020$  мм и по толщине стенки  $\pm 0,030$  мм;
- трубы из стали 08X18H10T размером вн.16x1,5...3X7000...12000 мм по ГОСТ 9941-81, ПР. 798-2008 с гарантированной точностью размеров труб по внутреннему диаметру  $+0,20/+0,40$  мм и по толщине стенки  $+10,0/-0,0\%$ ;
- трубы из стали 08X18H10T-Y размером вн.14x2,0x5000 мм по ТУ 14-3P-197-2001 при обеспечении гарантированной точности размеров труб по внутреннему диаметру  $+0,10/-0,20$  мм и по толщине стенки  $+0,15/-0,10$  мм;

ОАО «ПНТЗ» в промышленных масштабах производит трубы для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) с гарантированными

точностью размеров и качеством поверхности. В частности, на трубах 5,2 x 0,2 мм, 9,4 x 0,2 мм, вн6,6 x 0,2 мм и вн11,6 x 0,2 мм из стали ЭИ847 по ТУ 14-159-293-2005 была обеспечена точность

$\pm 0,020$  мм по наружному и внутреннему диаметрам и  $\pm 0,030$  мм по толщине стенки. На рисунке 1 приведен типичный результат измерения толщины стенки трубы на установке УЗК ROTA 25.

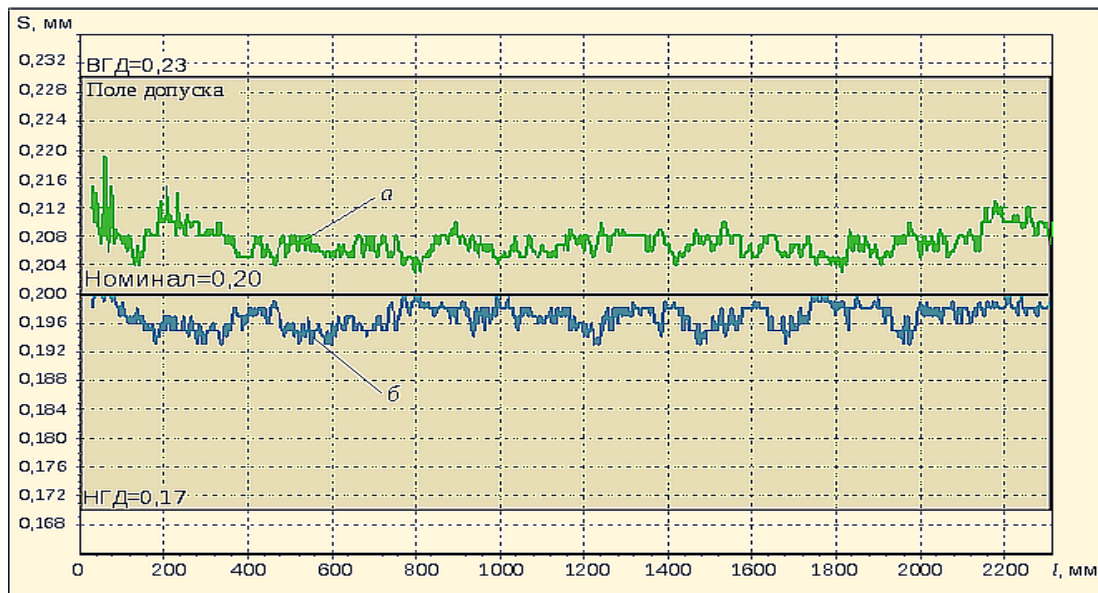


Рис. 1. Толщина стенки трубы 5,2 x 0,2 мм.

*a* — максимальная, *b* — минимальная толщины стенки в сечении трубы, ВГД — верхняя, НГД — нижняя границы допуска.

Нетрудно заметить, что разброс значений толщины стенки не превышает 40% от поля допуска.

На рисунке 2 в виде гистограмм показано распределение максимального и минимального значений внутреннего диаметра трубы вн.6,6X0,2 мм после очистки от резко отклоняющихся значений. Как видно из рисунка 2, поле

рассеивания размеров внутреннего диаметра по всей совокупности измерений для одной трубы составляет 42,5% от поля допуска. Смещение центров распределения характеризует величину овализации сечения трубы, которая, как видно из рисунка, много меньше поля допуска по диаметру.

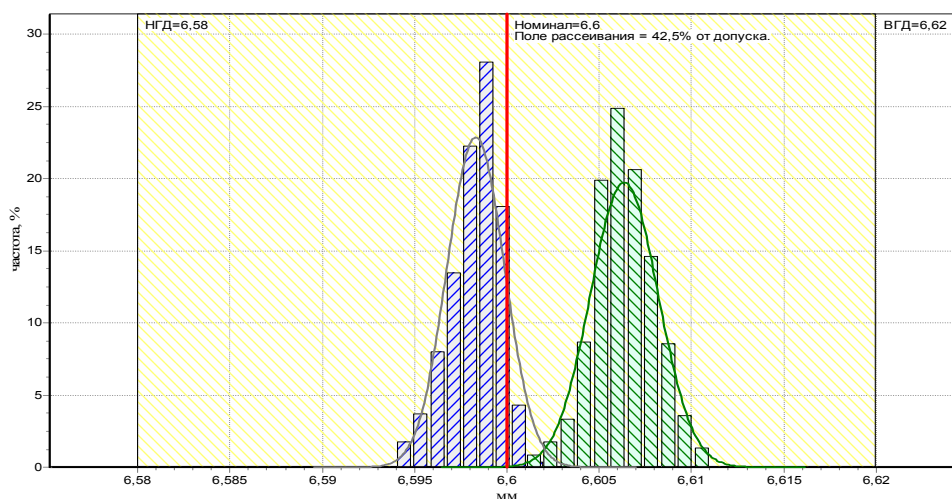


Рис. 2. Распределения максимального и минимального значений внутреннего диаметра трубы вн.6,6 x 0,2 мм после очистки.

На рисунке 3 показана стабильность минимальной и максимальной толщины стенки в партии труб вн.6,6X0,2мм. Для этого последовательно для каждой трубы партии проведены измерения толщины стенки, очистка результатов измерений от случайных выбросов и последующая статистическая обработка.

Кроме этого, на каждой трубе партии определены наибольшая величина максимальной стенки и наименьшая величина минимальной стенки. Эти величины ограничивают сверху поле разброса значений для максимальной стенки и снизу - поле разброса минимальной стенки. Таким образом, поле разброса значений стенки полностью заключено

между этими двумя величинами. Выход этих величин за границы поля допуска является бракующим признаком, то есть свидетельствует, что на данной трубе имеется хотя бы одно сечение, в котором стенка статистически достоверно не удовлетворяет допуску.

По диаграмме (рисунок 3) можно сделать

вывод, что при достигнутом уровне стабильности и правильной настройке на номинальный размер выход за пределы допуска по толщине стенки практически не возможен. Аналогичные результаты получены при измерении внутреннего и наружного диаметров.

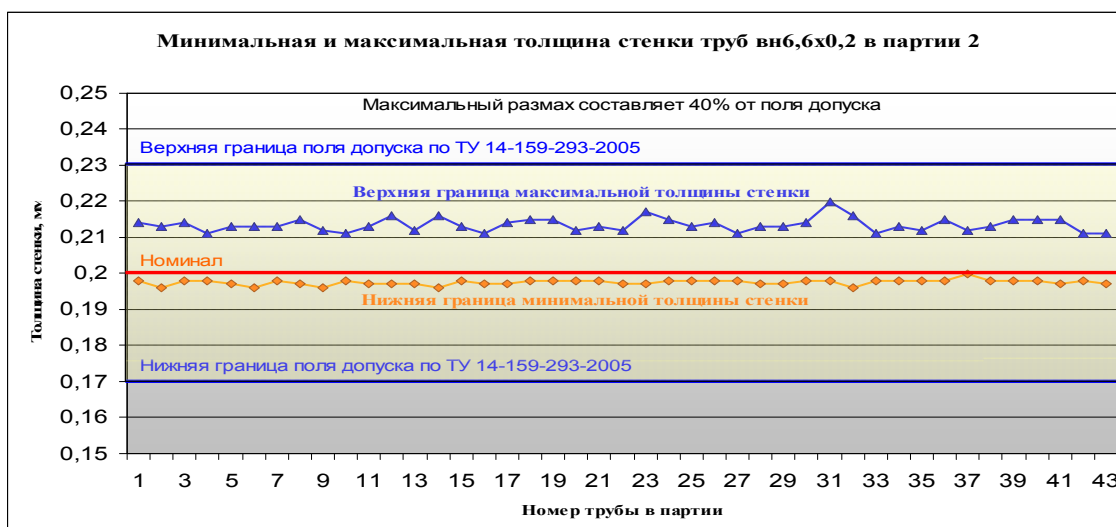


Рис. 3. Стабильность толщины стенки труб вн6,6х0,2мм в партии 2

Новая технология обеспечивает гарантированную точность размеров труб, как по наружному, так и по внутреннему диаметру  $\pm 0,020$  мм и по толщине стенки  $\pm 0,030$  мм.

Технологии и утвержденная на них нормативно-техническая документация используются в производственной деятельности ОАО «Первоуральский новотрубный завод» и защищены патентами РФ. Всероссийская организация качества дипломом и свидетельством № 235-ЦЭП-09-08 от 31.03.2008г. удостоверяет, что качество вышеуказанных труб, выпускаемых ОАО «ПНТЗ», соответствует высшему уровню качества, установленному программой «Российское качество».

Трубы из стали 08X18H10T размером вн.16X2X7000 мм, вн.16X2,5X7000 мм, вн.16X3X7000мм, вн.16X1,5X12000мм из стали 08X18H10T по ГОСТ 9941-81, ПР. 798-2008 используются в теплообменных аппаратах или в качестве оболочек жаропрочных электрических кабелей.

Поле допуска по внутреннему диаметру и толщине стенки труб не симметричное. Предельные отклонения размеров не должны превышать: по внутреннему диаметру  $+0,20 / +0,40$  мм, по толщине стенки  $+12,5 / -0,0\%$ . Шероховатость внутренней поверхности труб по параметру  $R_a$  не должна превышать 0,8 мкм. Существующая технология не обеспечивает получения труб с указанными предельными отклонениями размеров по внутреннему диаметру и толщине стенки.

Задача заключается в достижении высокой точности и стабильности размеров по длине каждой трубы в партии и между партиями, а также в обеспечении субмикронной чистоты внутренней

поверхности труб. Предложена технология, обеспечивающая решение поставленной задачи. Изготовлены промышленные партии труб вн.16X2X7000 мм, вн.16X2,5X7000 мм, вн.16X3X7000мм, вн.16X1,5X12000мм из стали 08X18H10T с вышеуказанными техническими требованиями.

Ниже приведены анализ качества поверхности, точности размеров и оценка стабильности новой технологии на примере партии труб размером вн.16 x 2,0 x 7000 мм. (Объем промышленной партии составил 497 м, 71 шт.).

Качество поверхности исследовали на образцах от трех труб партии. Исследования поверхности проводили на растровом электронном микроскопе PHILIPS SEM 535 в режиме отраженных электронов. Область просмотра поверхности составляла 5...10 мм в продольном, 2...3 мм в поперечном направлениях образца трубы. Наиболее характерные участки поверхности фотографировали при увеличении 85 и 500 крат. Результаты представлены на рисунке 4(продольная ось трубы расположена вертикально).

Шероховатость внутренней поверхности по параметру  $R_a$  (ГОСТ2789-73) определяли на образцах от трех труб партии. Измерения параметра  $R_a$  производили на профилометре модели 170622 при следующих условиях: длина трассы - 3 мм, отсечка шага (базовая длина) — 0,8 мм, предел измерения — 10 мкм. Измерения осуществляли в пяти точках на образце вдоль образующей трубы. По результатам всех измерений определяли максимальное и минимальное значения параметра  $R_a$  для партии труб. Шероховатость внутренней поверхности труб по параметру  $R_a$  составила 0,63...0,72 мкм.

Для статистического анализа точности

размеров осуществляли измерения толщины стенки и внутреннего диаметра труб. Измерения проводили на образцах от переднего и заднего концов каждой трубы партии.

Измерения толщины стенки производили микрометром МТ25-1 ГОСТ 6507-90 (предел допускаемой погрешности:  $\pm 2$  мкм). Измерения осуществляли в шести точках поперечного сечения трубы. По результатам измерений определяли максимальный и минимальный размер толщины стенки в поперечном сечении трубы.

Для измерения внутреннего диаметра использовали нутромер трехточечный цифровой SXTD4M (диапазон измерения: 10-20 мм, разрешение: 0,001 мм). Измерения осуществляли в шести точках поперечного сечения трубы. По результатам измерений определяли максимальный и минимальный размер внутреннего диаметра в поперечном сечении трубы.

Для статистической обработки результатов измерений применяли классические методы статистического анализа (ISO 10017:2003 «Руководство по статистическим методам применительно к ИСО 9001:2000»), реализованные в открытом программном продукте [R Development Core Team (2007). R: A language and environment for

statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>].

При статистической обработке проверяли нормальность распределения по критерию Колмогорова-Смирнова, оценивали вероятность выхода размеров за поле допуска и оценивали стабильность технологии.

### Результаты и обсуждение.

Качество поверхности оценивали по микрофотографиям. На рисунке 4 показаны наружная и внутренняя поверхности труб размером вн.16х2,0х7000 мм из стали 08X18H10T, ГОСТ9941-81, Протокол ПР798-2008, изготовленных по новой технологии. Как видно, внутренняя поверхность однородна и не имеет дефектов, обусловленных деформацией металла. Топография поверхности определяется структурой поверхностного слоя металла (размерами и границами зерен). Шероховатость поверхности по параметру  $R_a$  (ГОСТ 2789-73) составляет 0,63...0,72 мкм. Наружная поверхность также однородна и не имеет дефектов. При увеличении 500 крат на наружной поверхности видны вытравленные углубления по границам зерен.

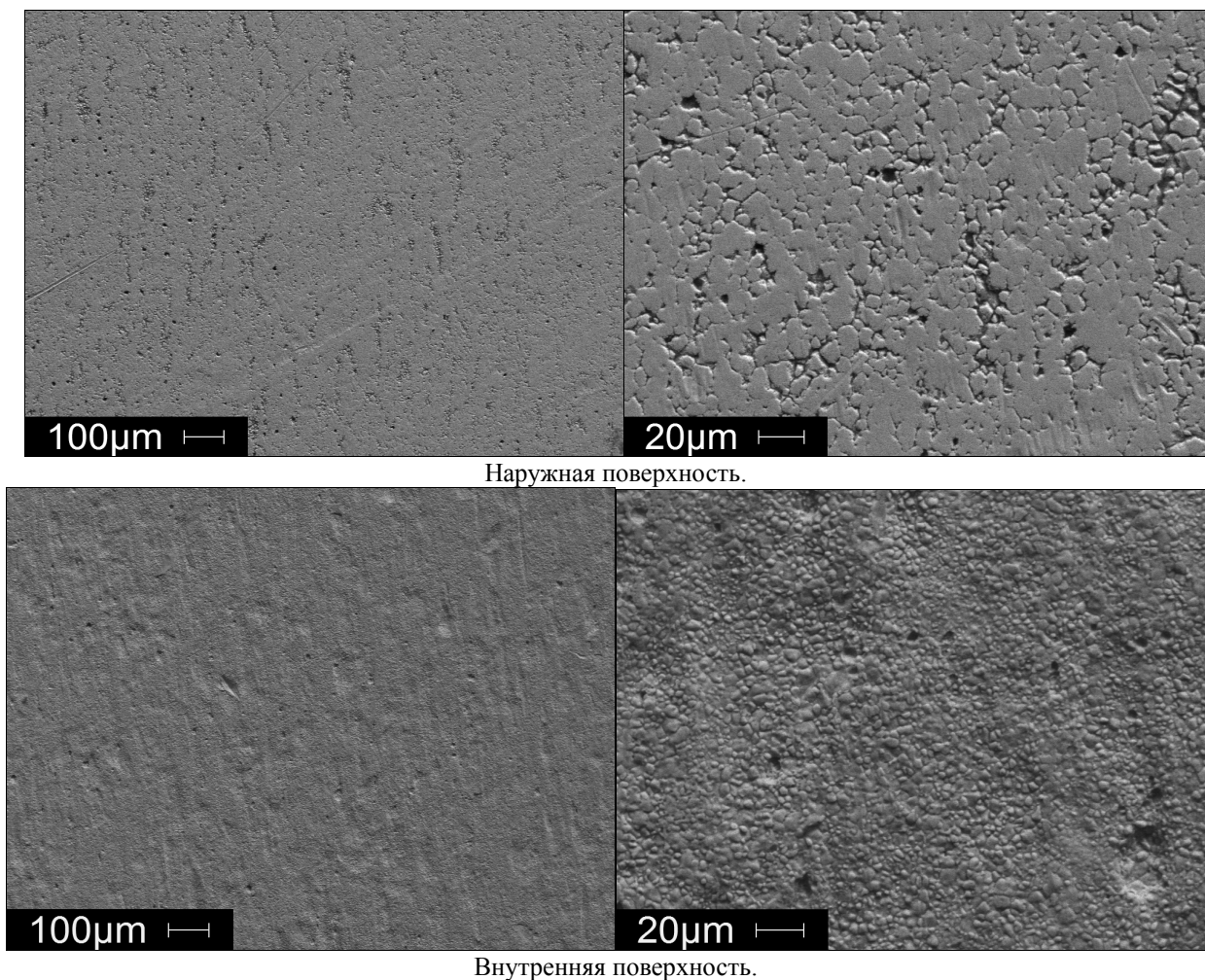


Рис. 4. Микрофотография поверхности труб размером вн.16 х 2 х7000 мм из стали 08X18H10T, ГОСТ 9941-81, Протокол ПР. 798-2008. Наружная и внутренняя поверхности травленные

Точность размеров оценивали вероятностью выхода за поле допуска. На рисунке 5 показана плотность распределения толщины стенки (по всему массиву измерений) труб размером вн.16 x 2 x7000 мм из стали 08X18Н10Т, ГОСТ 9941-81, Протокол ПР. 798-2008 в партии. Поле рассеивания размера толщины стенки составляет менее 65% от поля допуска, вероятность выхода за нижнюю

границу поля допуска не превышает  $2,0 \cdot 10^{-7} \%$ , за верхнюю — не более  $2,2 \cdot 10^{-9} \%$ .

На рисунке 6 показана плотность распределения внутреннего диаметра (по всему массиву измерений) труб размером вн.16 x 2 x7000 мм из стали 08X18Н10Т, ГОСТ 9941-81, Протокол ПР. 798-2008 в партии.

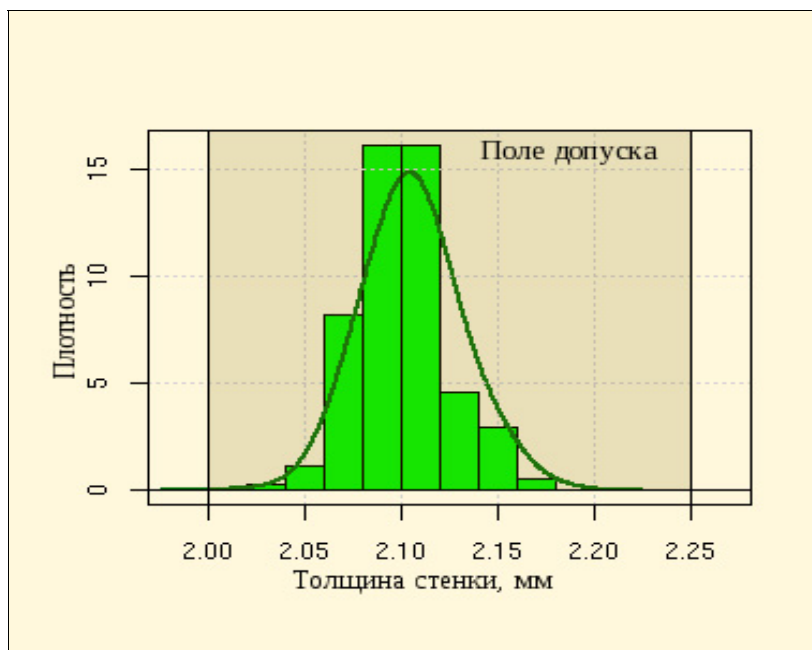


Рис. 5. Плотность распределения толщины стенки труб размером вн.16 x 2 x7000 мм из стали 08X18Н10Т, ГОСТ 9941-81, Протокол ПР. 798-2008 в партии.

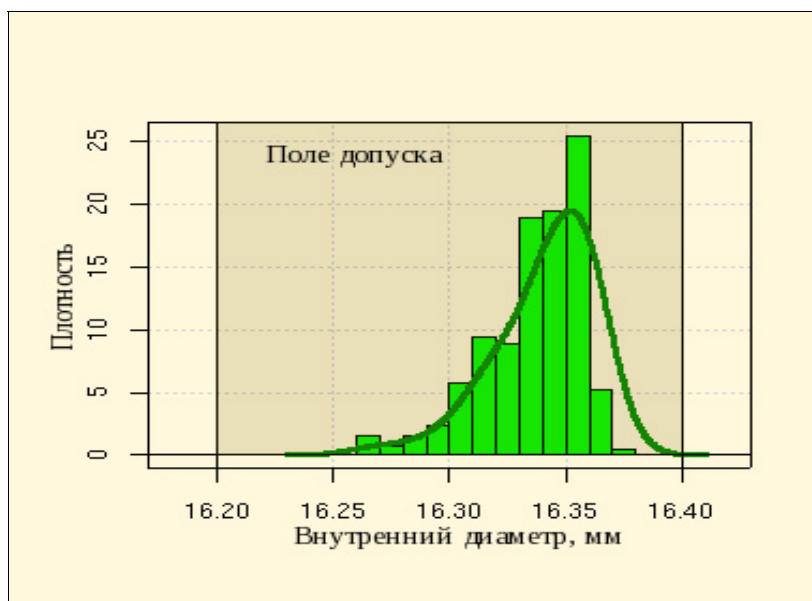


Рис. 6. Плотность распределения внутреннего диаметра труб размером вн.16 x 2 x7000 мм из стали 08X18Н10Т, ГОСТ 9941-81, Протокол ПР. 798-2008 в партии.

Поле рассеивания размера внутреннего диаметра составляет около 60 % от поля допуска, вероятность выхода за нижнюю границу поля допуска не превышает  $2,1 \cdot 10^{-9}$  %, за верхнюю — не более  $2,5 \cdot 10^{-6}$  %.

Стабильность технологии оценивали по изменению размеров труб внутри партии и вероятностью выхода размеров за поле допуска. Состояние стабильности иллюстрируется рисунками 7 и 8.

На рисунке 7 показан разброс максимальной и минимальной толщины стенки труб размером вн.16 х 2 х7000 мм из стали 08X18H10T, ГОСТ 9941-81, Протокол

ПР. 798-2008 в партии. Как видно, при достигнутом уровне стабильности и соответствующей настройке, выход за пределы допуска по толщине стенки практически не возможен.

На рисунке 8 показан разброс максимального и минимального внутреннего диаметра труб размером вн.16 х 2 х7000 мм из стали 08X18H10T, ГОСТ 9941-81, Протокол ПР. 798-2008 в партии. Как видно, при достигнутом уровне стабильности и соответствующей настройке, выход за пределы допуска по внутреннему диаметру практически не возможен.

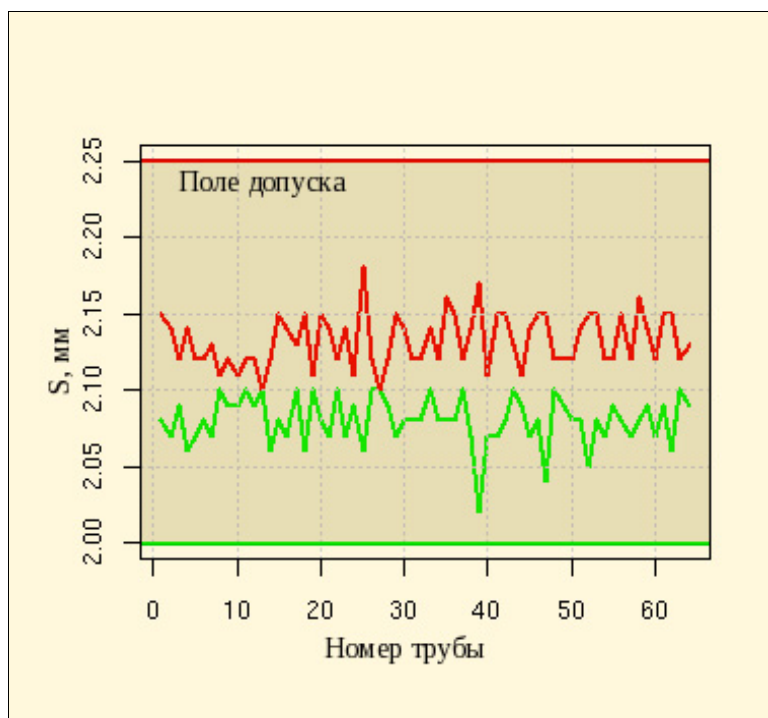


Рис. 7. Разброс максимальной и минимальной толщины стенки труб размером вн.16 х 2 х7000 мм из стали 08X18H10T, ГОСТ 9941-81, Протокол ПР. 798-2008 в партии.

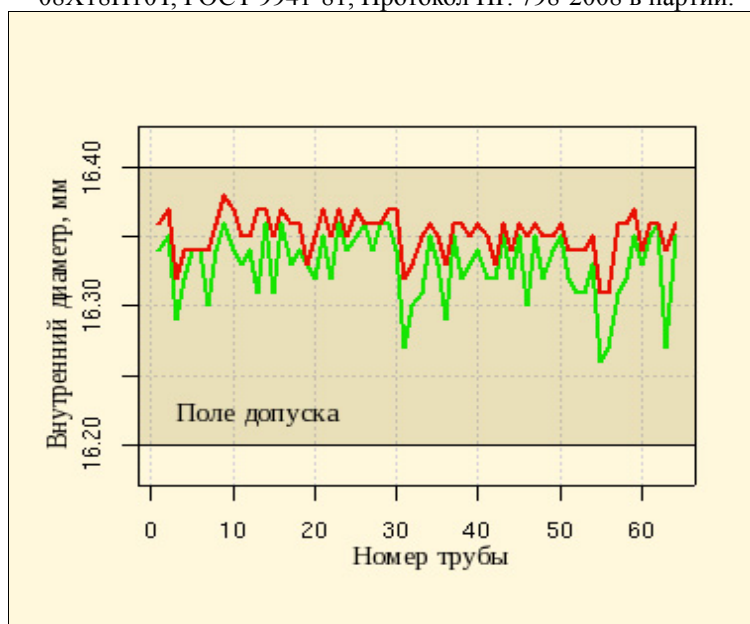


Рис. 8. Разброс максимального и минимального внутреннего диаметра труб размером вн.16 х 2 х7000 мм из стали 08X18H10T, ГОСТ 9941-81, Протокол ПР. 798-2008 в партии.

На трубах  $\text{вн}16 \times 2,0 \times 7000$  мм из стали 08X18H10T по ГОСТ 9941-81, Протокол ПР. 798-2008, достигнута точность внутреннего диаметра в пределах  $+0,20/+0,40$  мм и точность толщины стенки —  $+10,0\%/-0,0\%$  (см. рис.7, 8). Шероховатость внутренней поверхности труб по параметру  $R_a$  не превышает 0,8 мкм.

На промышленных партиях труб

$\text{вн}14 \times 2,0 \times 5000$  мм из стали 08X18H10T-У по ТУ 14-3Р-197-2001, Протокол ПР. 508-2007 для датчиков контроля излучения обеспечена гарантированная точность внутреннего диаметра  $+0,10/-0,20$  мм и точность толщины стенки  $+0,15/-0,10$  мм. На рисунке 9 и 10 приведены диаграммы стабильности толщины стенки и внутреннего диаметра в промышленных партиях труб.

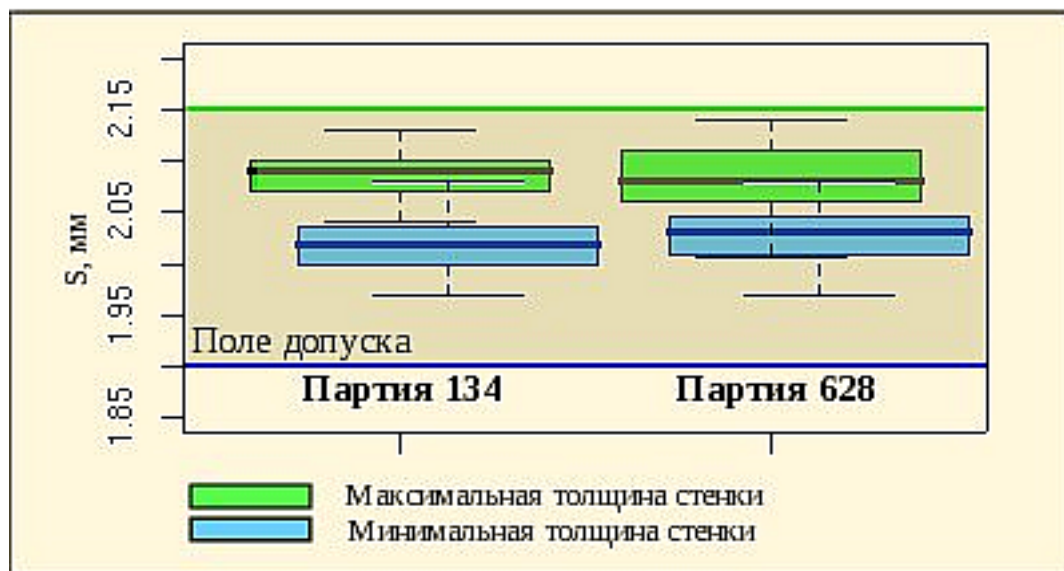


Рис. 9. Стабильность толщины стенки труб  $\text{вн}14 \times 2,0 \times 5000$  мм

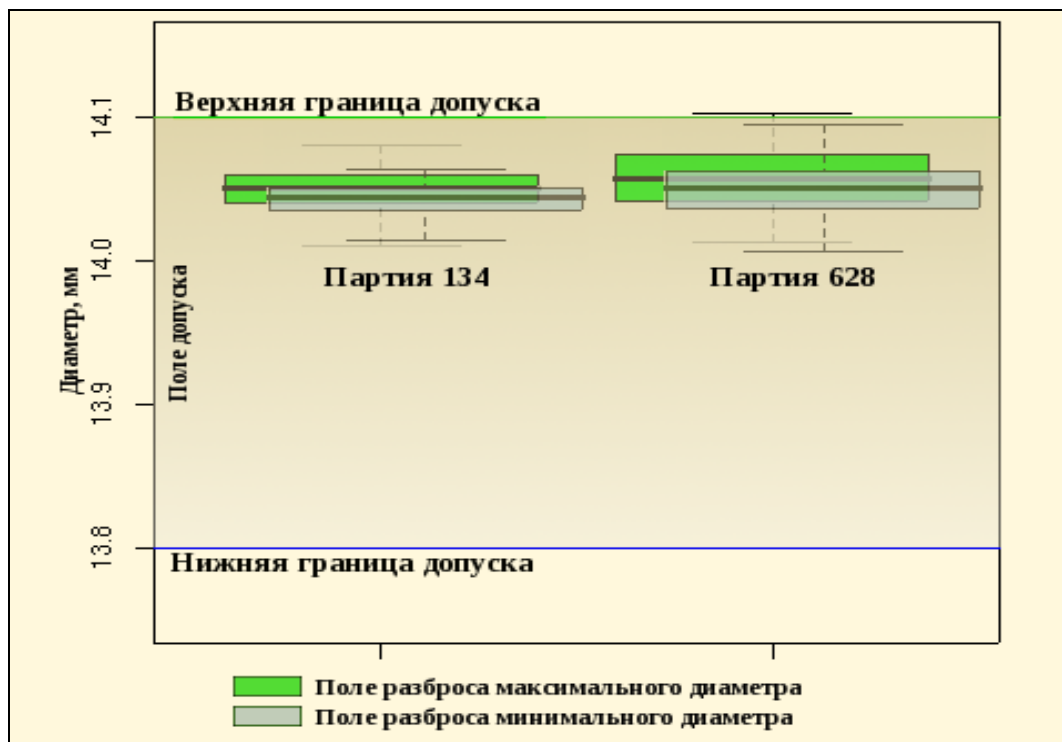


Рис. 10. Стабильность внутреннего диаметра труб  $\text{вн}14 \times 2,0 \times 5000$  мм

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют констатировать, что разработанная технология в полной мере обеспечивает удовлетворение требованиям к точности размеров труб, требуемые характеристики шероховатости наружной и

внутренней поверхностей всех труб. Таким образом, новая технология гарантирует точность и стабильность размеров труб, что обеспечит повышение надежности и увеличение ресурса работы оборудования АЭС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хусу А.П., Виттенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. – М.: Наука, 1975. – 334 с.
2. Карзов Г.П., Суворов С.А., Федорова В.А. [и др.] Оценка динамики зарождения и развития повреждений теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ-1000 в рабочих режимах // Официальный сайт ОКБ «Гидропресс». - 2001. - [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/publications/seminars/seminar7/section3.htm> (дата обращения: 12.05.2009).
3. Кузнецов Д.Е., Вахрушева В.С., Кузнецов Е.Д. Взаимозаменяемость оболочек тепловыделяющих элементов атомных реакторов // Вопросы атомной науки и техники. - 2006.- №4. -С. 47-54.
4. Серебряков Ан. В. Исследования, разработка технологии и освоение производства прецизионных труб из коррозионностойкой стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. - 24 с.
5. Серебряков Ан.В., Марков Д.В., Ладыгин С.А., Прилуков С.Б., Серебряков А.В., Богатов А.А. Новая технология производства прецизионных труб из коррозионностойкой стали // Сталь. – 2006.- №7. - С. 61-64.
6. Паршаков С.И., Серебряков А.В., Розенбаум М.М., Серебряков Ан.В., Марков Д.В., Прилуков С.Б. Новая технология получения особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали // Сталь, – 2007. - №5. - С.89-93.
7. R Development Core Team (2007). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org> (дата обращения:10.05.2009).