

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ СТАБИЛЬНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПОЛУЧЕНИЕ ЗАДАННОГО УРОВНЯ КАЧЕСТВА ТРУБ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR THE STABILITY AND SUSTAINABILITY OF THE PROCESS, DETERMINING THE DESIRED LEVEL OF QUALITY TUBES FOR SPECIAL PURPOSES

С.И. Паршаков, к.т.н., А.А. Богатов, д.т.н.

УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия E-mail: spi@eka-net.ru

Ан.В. Серебряков, к.т.н., С.Б. Прилуков, В.В. Мальцев, А.С. Циндраков

ОАО «Первоуральский новотрубный завод», Первоуральск, Россия

E-mail: Andrey.Serebryakov@chelpipe.ru

А.В. Серебряков, к.т.н.

«Новые технологии труб», Первоуральск, Россия

E-mail: ntt@pervouralsk.ru

The report discusses methods for evaluating stability of technological processes for production of pipes. It is shown that the statistical methods of quality assessment technology does not provide the required level of confidence to go to selective methods of control. It is proposed to use the comparison of smoothed periodograms for randomly selected tubes from the party. Invited to quantify the similarity of periodograms, which can be used as a measure of stability technology.

В последние 15—20 лет статистические методы контроля качества продукции получили широкое распространение во многих отраслях промышленности. Использование схем выборочного контроля обеспечивает снижение затрат на осуществление контроля как в процессе производства («текущий предупредительный контроль»), так и при сдаче продукции — «приемочный контроль».

Правила организации выборочного контроля определены стандартами серии ГОСТ Р ИСО 2859. Стандарты предусматривают гибкие схемы контроля в зависимости от схемы производства (последовательные или изолированные партии), от объема и количества изготавливаемых партий, а также от предыдущих результатов сдачи продукции. При стабильных результатах возможен переход к схемам с уменьшенными объемами выборки, при отклонениях — схемы контроля могут быть ужесточены. Однако, при переходе к выборочному контролю неявно предполагается, что статистические характеристики качества продукции остаются постоянными, как внутри одной партии, так и между партиями изделий.

При использовании методов выборочного контроля по альтернативному признаку из-за случайности выборки возможны ошибки при оценке всей партии изделий по выборочным характеристикам. Вероятность забракования качественной продукции по результатам выборочного контроля в литературе часто называют риском изготовителя, а вероятность приемки негодной продукции как годной — риском потребителя. Необходимо отметить, что полная ликвидация этих рисков принципиально не достижима и можно говорить только о снижении их до приемлемой величины, определяемой соглашениями между потребителем и изготовителем.

Обеспечение доверия к результатам выборочного контроля является основной предпосылкой использования выборочных методов при производстве труб специального назначения. Рассмотрим, как может быть достигнут соответствующий уровень доверия, при котором риски потребителя и изготовителя становятся приемлемыми.

К решению этой задачи возможно несколько подходов.

В основе первого подхода лежит оценка вероятности получения дефектных изделий по результатам текущего контроля. При этом следует иметь в виду, что дефекты продукции могут иметь разную природу. В частности, это связано с наличием локальных повреждений поверхности, несоответствие механических свойств или структуры металла, неудовлетворительный товарный вид, отсутствие стойкости к межкристаллитной коррозии, выход размеров трубы за пределы допусков. Дефектность продукции по показателям поврежденности, коррозионной стойкости, нарушения структуры, неудовлетворительного товарного вида характеризуется дискретными случайными величинами, например, из партии в 100 штук в окончательный брак отправлено 2 трубы. Известно, если в партии объемом N труб допускается Q дефектных изделий (риск потребителя составит

$\alpha = \frac{Q}{N}$), то вероятность появления x изделий в

выборке объема n без возврата подчиняется гипергеометрическому распределению [1]. При наличии таблицы гипергеометрического распределения [2] может быть решена обратная задача: по количеству дефектных изделий x в выборке объема n определить уровень риска потребителя α . К сожалению, накопленные результаты по таким видам дефектов страдают неполнотой и ограниченной достоверностью. Отдельные забракованные изделия либо подвергаются ремонту и повторному представлению на контроль, либо направляются в отходы.

В отличие от предыдущего, результаты измерения размеров и определения механических свойств оформляются протоколами, заносятся в журналы или хранятся в виде файлов в архивах. Эти данные доступны для анализа, а числовые значения контролируемых параметров могут рассматриваться как непрерывные случайные величины, для которых известен диапазон допустимых значений — поле

допуска. Аппроксимируя законы распределения этих величин и экстраполируя их за границы поля допуска можно оценить вероятность выхода контролируемых величин за пределы допустимого диапазона и, следовательно, вероятность получения брака. На рисунке 1 показано распределение минимальной (А) и максимальной (В) толщин стенки трубы. Площадь области 1 определяет вероятность выхода размера стенки за верхнюю границу допуска. Можно заметить, что при таком распределении вероятность выхода за нижнюю границу допуска исчезающе мала.

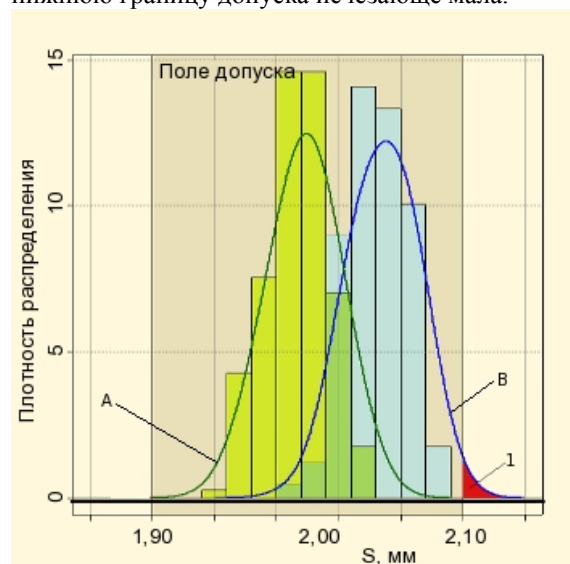


Рис.1

При осуществлении статистического анализа доверие к результатам наблюдений является основным фактором, определяющим ход исследования. На рисунке 2 показаны результаты измерений толщины стенки труб из одной партии, осуществленные вручную — а) и на аппарате УЗК ROTA-25 — б). Сплошная линия (красная) — теоретическая кривая плотности нормального распределения с параметрами, определенными для соответствующей выборки, штрих-пунктирная линия (зеленая) — распределение, полученное при измерениях. Сравнивая рисунки а) и б) приходим к выводу, что экстраполяция результатов по данным, полученным при ручных измерениях может привести к существенным ошибкам. Для данных, представленных на рисунке 2 гипотеза о нормальном распределении при уровне значимости 0,05 по критерию Колмогорова-Смирнова (lillie.test в пакете R [3]) была отвергнута для ручного измерения ($p\text{-value} < 0,0089$) и принята для аппаратного ($p\text{-value} > 0,86$).

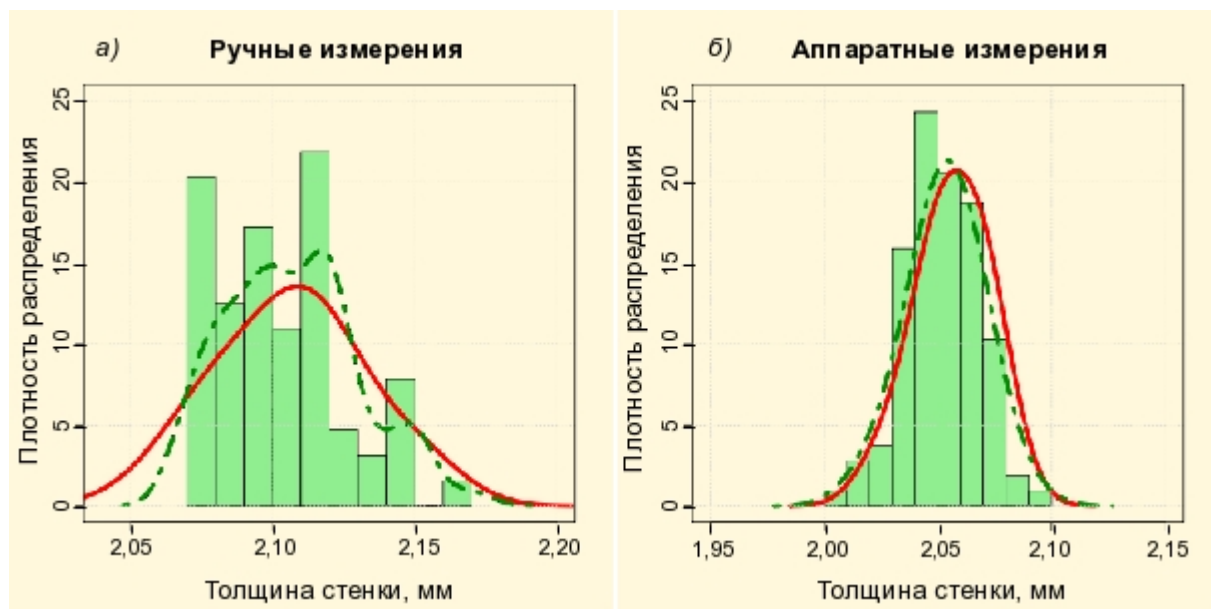


Рис.2

Искажение результатов при ручном контроле связано с несколькими факторами: недостаточной квалификацией контролеров, физической усталостью, психологическими причинами, ошибками округления результатов, и другими. Если контролируемый параметр определяется по результатам измерений путем вычислений, как, например, предел текучести (рис. 3), то дополнительно сказываются ошибки

вычислений, неправильный выбор констант, ошибки подстановки данных. На рисунке 3 особенно показательны «хвосты» (обведены пунктирной линией) в районе 280 и 340 МПа, обнаруженные при проверке нормальности распределения. Возможная причина такой группировки измерений вряд ли определяется свойствами металла и, скорее всего, лежит в области психологии контролера.

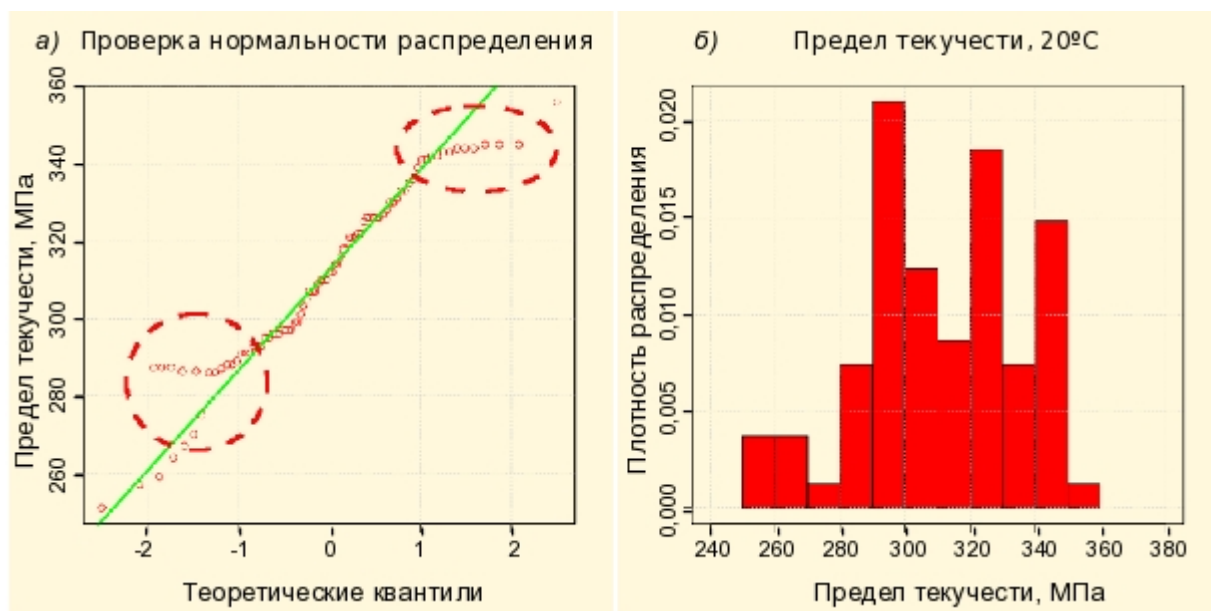


Рис.3

Таким образом, при первом подходе к оценке стабильности качества продукции, что является главным условием для использования выборочных методов контроля, мы сталкиваемся с проблемами отсутствия или недостаточного количества наблюдений (дискретные распределения) или проблемами доверия к результатам, связанные с ошибками измерений и другими факторами, действующими при ручном контроле. Решение этих проблем видится в переходе от ручных методов к аппаратному неразрушающему контролю.

Более объективным, на наш взгляд, является второй подход, направленный не на оценку стабильности качества, а на первоисточник стабильности качества — стабильность технологии. Стабильность технологического процесса может быть оценена по результатам непрерывного мониторинга всех технологических режимов от запуска заготовки до получения готовой трубы. Однако такой способ является чрезвычайно затратным. Он требует использования развитых систем сбора и обработки информации, создает дополнительную нагрузку на персонал, связанную с вводом информации, требует ряда организационных мер по контролю достоверности вводимой информации.

Однако существует другой вариант оценки стабильности технологии по результатам непрерывного неразрушающего контроля готового изделия. Готовое изделие уже содержит в себе всю необходимую информацию о стабильности технологии и проблема состоит только в том, чтобы ее извлечь. Для этого нужно подготовить «маркеры» на определенных технологических операциях, которые сохраняются до получения готового изделия, а на готовом изделии статистическими методами определить различия состоянии маркеров. Если различия не существенны, то технологию можно считать стабильной, в противном случае можно обнаружить на какой стадии изготовления произошло отклонение от заданных режимов.

В случае оценки стабильности технологии холоднодеформированных труб задача существенно облегчается тем, что многие технологические операции оставляют следы, которые могут быть использованы в качестве естественных маркеров с известной периодичностью.

Горячекатаная заготовка сохраняет следы винтовой линии от прошивки, период которых определяется диаметром валков и углом подачи. Последующая прокатка на автомат-станах, непрерывных и редуционных станах оставляет следы от эксцентриситета и износа валков с периодами, пропорциональными катающему диаметру. На заготовке, подвергавшейся обточке и расточке, формируются спиральные канавки от резцов с периодом, определяемым в первую очередь величиной подачи. При термообработке в проходных печах неоднородность нагрева может возникать вследствие неравномерного охлаждения транспортирующих роликов, что приведет к периодичности изменения механических свойств металла с периодом, определяемым шагом и диаметром роликов. Правка труб в валковых правильных машинах оставляет следы поверхности валков и неправильной настройки с периодами, определяемыми диаметром валка и расстоянием между валками. Наиболее устойчивые периодические составляющие размеров диаметра и стенки трубы формируются при холодной прокатке на станах ХПТ и ХПТР. Это связано с особенностями процесса деформации: раскаткой порций металла периодически подаваемых в зону деформации что, в конечном итоге, приводит к возникновению продольных колебаний толщины стенки и диаметра с периодом, равным произведению величины подачи на коэффициент вытяжки. Эти периодичности сохраняются при последующем волочении. Наименьший вклад в периодическую неоднородность геометрических размеров вносят операции волочения, хотя и в этом случае могут оставаться следы упругих колебаний в виде «дрожания» и «кольцеватости».

Периоды этих колебаний определяются резонансными частотами упругой системы «стан-труба», длиной звена цепи и шагом звездочки. На готовых трубах, подвергнутых шлифованию на бесцентрово-шлифовальных станках обнаруживаются колебания толщины стенки частота которых зависит от величины подачи, а амплитуда — от настройки. Многие из перечисленных источников имеют (или должны иметь) фиксированные характеристики, определяемые либо размерами рабочего инструмента, например, диаметром вала правильного стана, либо технологической инструкцией, например, углом подачи, величиной подачи и т. п.. Следы, оставленные такими источниками периодичностей могут служить маркерами, позволяющими сравнить технологии изготовления разных труб в партии или разных партий.

В большинстве случаев такие маркеры: следы от прошивки, спиральные следы от механической обработки и правки; неоднородности, вызванные эксцентриситетом и износом валков и транспортирующих роликов, — могут быть описаны простыми гармоническими функциями, в которых вместо времени используется координата вдоль длины трубы. Периоды таких функций имеют размерность длины. В процессе изготовления трубы, вследствие вытяжек при пластической деформации, периоды неоднородностей могут изменяться, но, если известен маршрут, всегда можно определить их новые значения.

В частности, новый период P_j после j -той

технологической операции может быть определен

простой зависимостью $p_j = p_i \cdot \prod_{k=i}^j \mu_k$ где p_i —

период в i -той операции, а μ_k — коэффициенты вытяжки в технологических операциях между i и j . Вследствие случайных колебаний размеров заготовки, износа инструмента и влияния других случайных факторов величины периодов несколько размываются и по степени размывания можно судить насколько стабильны режимы технологии. Эти периодичности могут быть затемнены последующими операциями деформации, но следы их сохраняются в размерах толщины стенки и диаметра, в неоднородностях структуры и механических свойств и могут быть обнаружены при непрерывном неразрушающем контроле.

Примеры с результатами такого контроля приведены на рисунке 4. Минимальный и максимальный размеры стенки в поперечном сечении с точностью в третьем знаке после запятой регистрировались с дублированием (W1 и W2) через каждые 3 мм вдоль всей длины трубы на установке УЗК Rota-25. На диаграммах можно заметить, что профиль толщины стенки имеет периодически повторяющиеся участки, но однозначных выводов о наличии закономерностей по рисунку сделать невозможно.

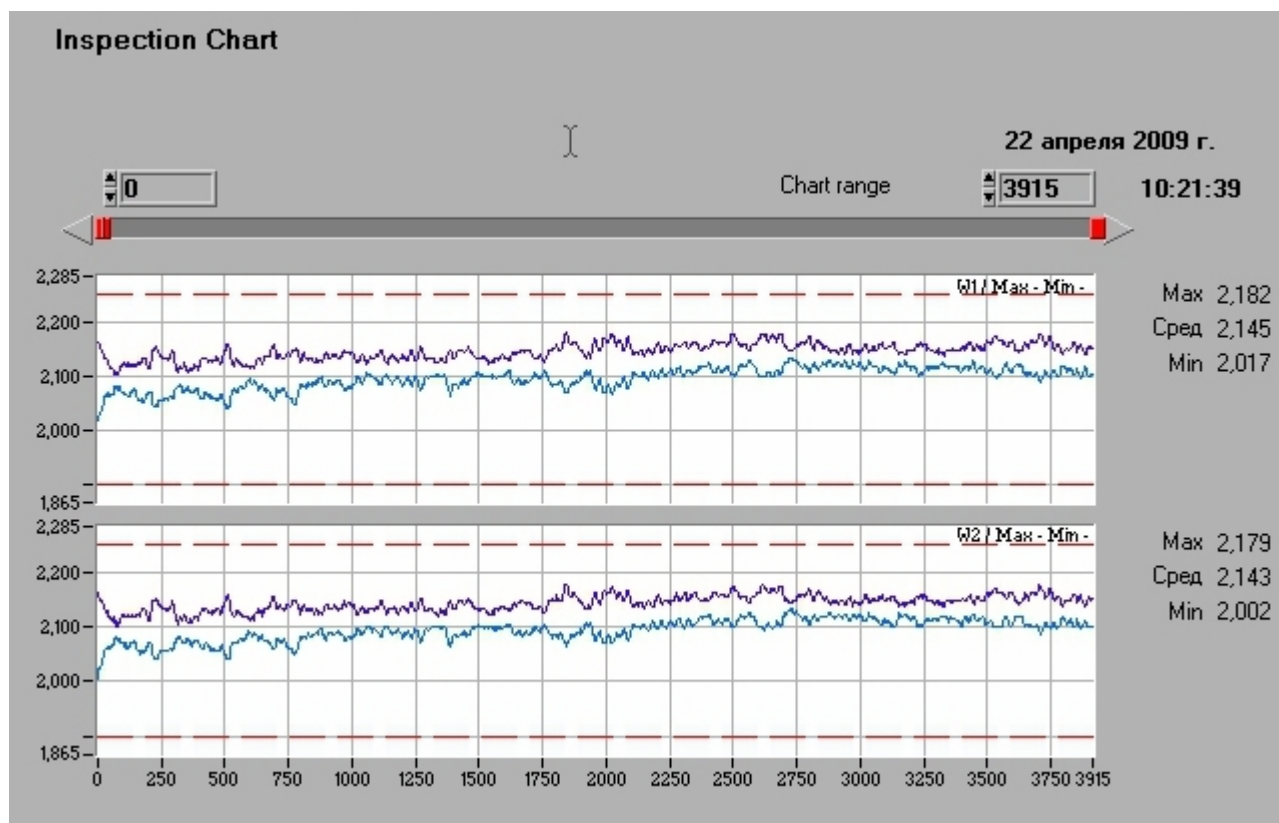


Рис.4

Для выявления скрытых периодичностей можно воспользоваться известными методами цифрового спектрального анализа [4]. В нашем случае

эффективным оказался метод сглаженных периодограмм, который позволил по данным измерения толщины стенки не только обнаружить

следы периодичностей, но и сделать выводы о нарушениях стабильности технологии.

Периодограммный анализ известен с 1898 года, когда он впервые был применен для оценки цикла солнечных пятен. Сначала применение этого метода было связано с преодолением многочисленных трудностей, связанных с вычислением периодограмм. Однако в конце двадцатого — начале двадцать первого века эти трудности удалось преодолеть благодаря использованию мощных средств вычислений и в настоящее время периодограммный анализ широко применяется для исследования выборочных спектров. В описываемом случае для труб вн.14X2мм из стали 08X18Н10Т-У результаты измерений толщины стенки (рис.4) и диаметров трубы, осуществленные вдоль контролируемой трубы с шагом 3 мм были сохранены в виде текстовых файлов и подвергнуты цифровому

спектральному анализу в открытом статистическом пакете R [3]. Для получения выборочного спектра

(рисунок 5)
$$\tilde{P}_{xx}(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot k} \right|^2$$
, который

является исходной не модифицированной формой периодограммной оценки спектральной плотности мощности (СПМ), использовали быстрое преобразование Фурье (БПФ). Здесь f — частота, N — число наблюдений, $x_k, k = 0, \dots, N-1$ — измерения толщины стенки или диаметра. На рисунке приведена лишь часть спектра на низких частотах, период которых не менее 30 мм. Высокие частоты с периодом менее 30 мм, сравнимым с величиной шага измерений (3 мм), не представляют интереса при поиске следов технологических воздействий.

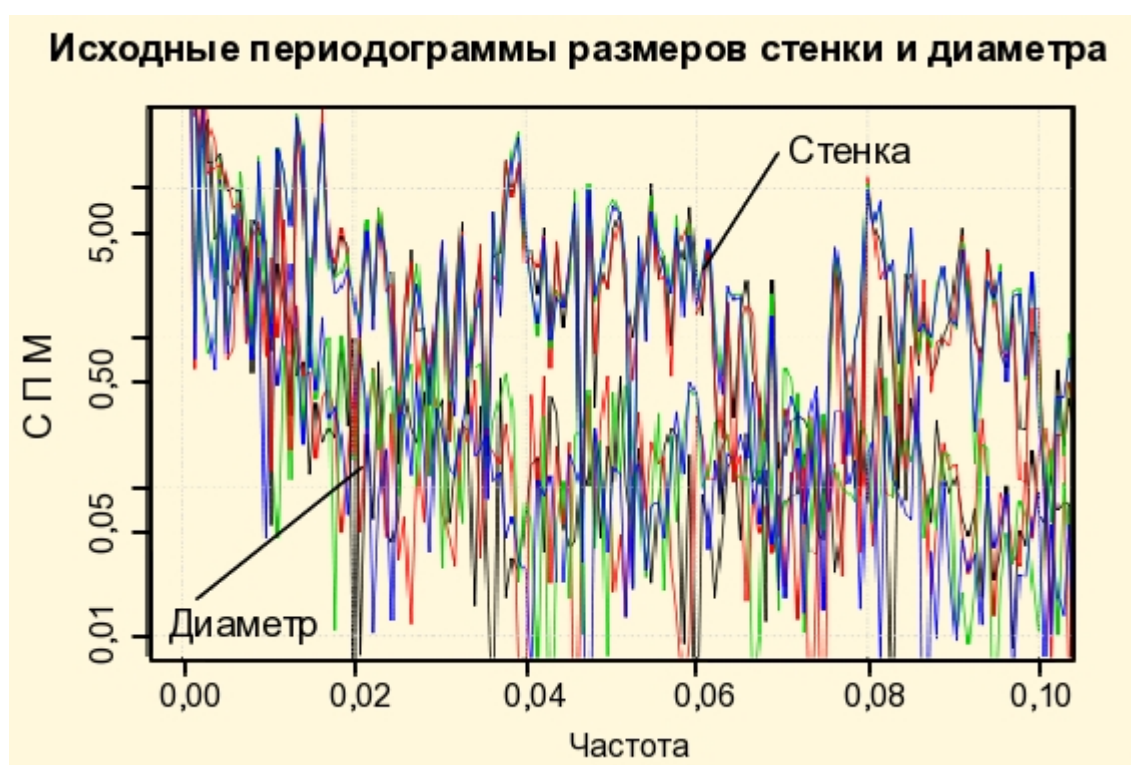


Рис.5

Какие-либо выводы по исходной («сырой») периодограмме сделать трудно в связи с упомянутым выше размытием периодичностей из-за случайных факторов.

Для сглаживания быстрых случайных флуктуаций выборочного спектра был использован

$$\hat{P}_D[f_i] = \frac{1}{2n+1} \sum_{k=i-n}^{i+1} w_{k-i+1} \tilde{P}_{xx}[f_k], \quad w_0 = w_{2n} = 0,5; \quad w_1, \dots, w_{2n-1} = 1.$$

Сглаживание выборочного спектра, приведенного на рисунке 5 осуществляли по соседним

модифицированный метод Даньелла [5] — усреднение по соседним спектральным частотам методом скользящего среднего с ослаблением влияния краевых точек окна

11 частотам ($n = 5$). Сглаженная периодограмма приведена на рисунке 6.

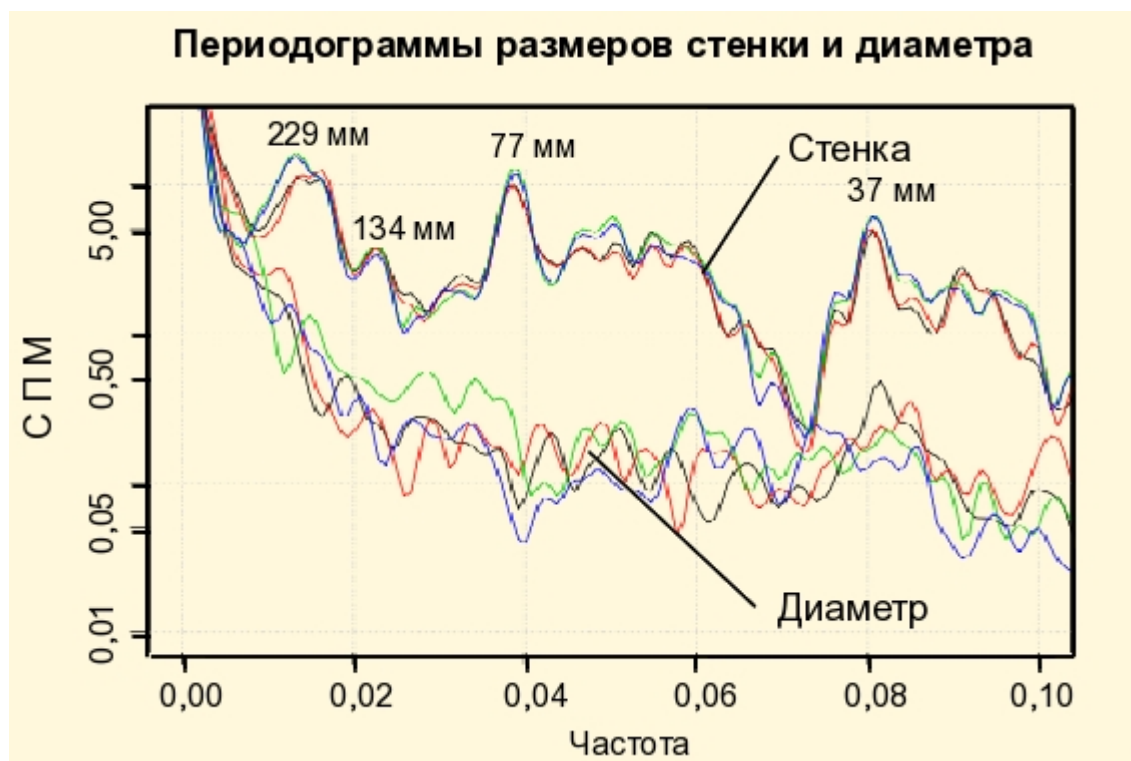


Рис.6

По периодограмме сразу можно сделать вывод, что следы периодичности технологического процесса лучше сохраняются в спектре толщины стенки, что вполне объясняется с позиции теории пластической деформации. Исходя из теоретических представлений, кроме того, можно предполагать, что чем тоньше стенка, тем лучше будут сохраняться следы технологических операций. На периодограмме четко выделяются несколько пиков, соответствующих колебаниям толщины стенки с различными частотами. Периодам 77 мм и 37 мм соответствуют острые пики, что позволяет говорить о их происхождении в последних операциях. Пики с периодами 229 мм и 134 мм много слабее и, очевидно, порождены более ранними операциями. Наиболее вероятным источником этих периодичностей является прокатка на станах ХПТ. Если известный параметр калибровки валков стана ХПТ $m\mu$ умножить на величину последующей суммарной вытяжки, то близость полученного результата к одному из периодов однозначно идентифицирует источник периодичности.

Очевидно, если технологические режимы: величины подачи, последовательность технологических операций, вытяжки на операциях волочения, настройки оборудования, — поддерживаются в пределах требований технологических инструкций, то и периодограммы будут мало отличаться для труб, изготовленных по одной технологии. Существенные отличия в периодограммах скорее всего свидетельствуют о

нестабильности режимов.

На рисунке 7 приведены сглаженные периодограммы для труб вн.14X2мм из стали 08X18Н10Т-У, взятых из двух партий. Периодограммы а) для разных труб из одной партии практически повторяются. Можно говорить, что обе трубы в этой партии изготовлены при точном соблюдении всех требований технологических инструкций. В периодограммах б) заметны существенные отклонения для разных труб из партии. Пики с периодами 73 мм и 64 мм смещены относительно друг друга, что может свидетельствовать о различии величины вытяжек в соответствующих проходах. Первый пик с периодом около 204 мм имеет разную степень размытости для разных труб, что может быть вызвано, например, использованием оправочного прохода в одном случае и безоправочного в другом. Рассматривая совокупность периодограмм можно выработать количественные критерии стабильности технологического процесса. Например, можно ввести метрику, оценивающую «расстояние» между периодограммами и по величине расстояния оценивать качество реализации технологического процесса. В качестве такой метрики предлагается использовать накопленную разность СПМ на сетке из K частот для труб с номерами n и m :

$$D = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |\hat{P}_D^n[f_i] - \hat{P}_D^m[f_i]|.$$

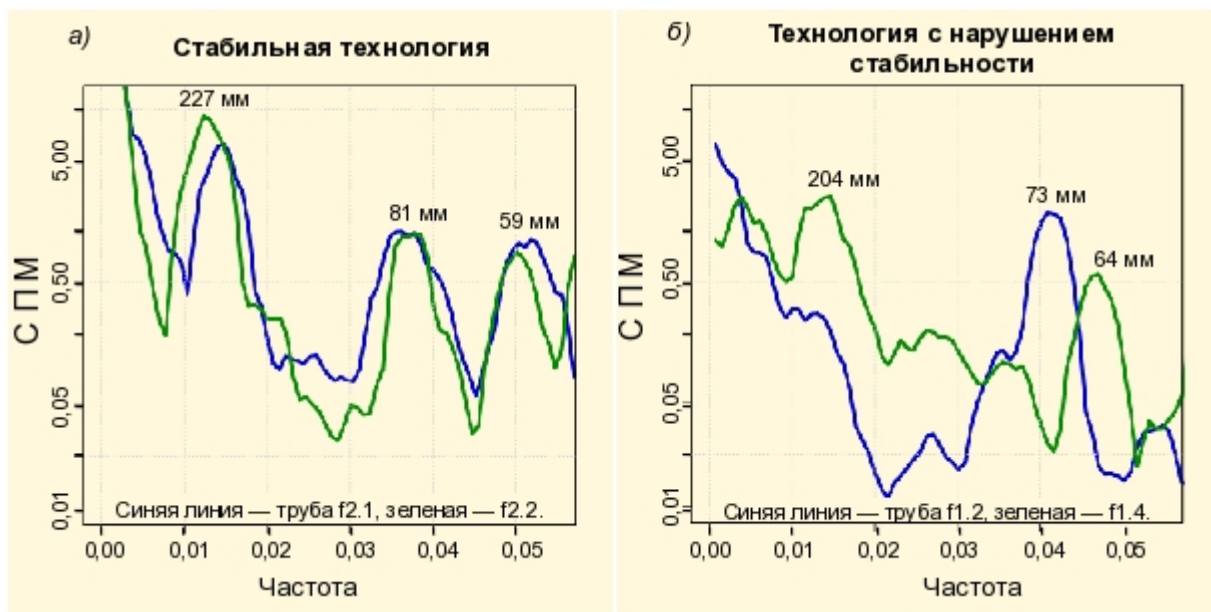


Рис.7

При наличии точной информации о параметрах технологических операций есть возможность ассоциировать пики с определенными операциями, тем самым вскрыть источники неоднородности качества и нарушений стабильности, возникшие из-за ошибок персонала, неправильной настройки оборудования или износа инструмента.

Выводы

Аппаратный контроль позволяет исключить ошибки, связанные с человеческим фактором. Благодаря тому, что при аппаратном контроле регистрируются достаточно большие массивы данных, появляется возможность работать в поле статистики больших чисел и использовать методы цифрового спектрального анализа для установления источников неоднородности качества и нарушений стабильности технологии.

Готовое изделие в скрытом виде содержит информацию о качестве технологии и причинах появления отклонений от заданного уровня, но эта информация может быть извлечена только при наличии следующих условий:

1. Должен быть обеспечен полный неразрушающий контроль состояния готового изделия, в частности, для труб должны регистрироваться, по крайней мере, минимальная и максимальная толщина стенки, максимальный и минимальный размеры наружного и внутреннего диаметров в поперечном сечении на всей длине трубы с шагом, не превышающим допустимой длины дефекта.
2. Должна быть сформирована база данных, содержащая полную информацию о технологии изготовления труб. В базе должны быть приведены сведения о параметрах каждой технологической операции, в том числе, о величинах деформаций, расстояниях

между валками и диаметрах валков всех валковых агрегатов, как-то прокатного и правильного оборудования, используемого в данном технологическом процессе. В базе должны быть зарегистрированы величины подач при периодической прокатке, калибровки оправок и валков, величины эксцентриситетов, а так же некоторые характеристики механического оборудования, например, диаметры и шаг звездочек цепного волочильного стана, передаточные числа и параметры шестерен редукторов, шаг и диаметры роликов проходных печей, используемых для термообработки, а также другая информация, позволяющая определить источники периодичности.

По периодограммам (рисунок 6) можно судить, что исходные периодичности в большей мере отражаются на размерах толщины стенки и мало заметны как на результатах измерения наружного, так и внутреннего диаметров. Об этом свидетельствует отсутствие заметных пиков на периодограммах, относящейся к измерениям диаметров.

Вся статистическая обработка результатов измерений, в том числе и построение периодограмм, осуществлена с использованием открытого программного продукта R [3], реализующего классические методы статистического анализа в соответствии с ISO 10017:2003 «Руководство по статистическим методам применительно к ИСО 9001:2000».

Результаты статистического и гармонического анализов использованы для управления качеством при реализации технологических процессов производства труб для атомной энергетики. С этой целью была предусмотрена соответствующая организация средств технического и программного обеспечения.

В результате применения комплексного подхода, сочетающего создание новых технологий и методологии контроля было освоено производство

нержавеющих труб с высокой точностью внутреннего диаметра и высоким качеством поверхности. Высокое качество и точность обеспечены за счет решения проблемы стабильности технологических режимов. 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-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;

➤трубы из стали 08X18H10T размером вн.16x2,0x7000 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 $+10,0/-0,0\%$;

➤на трубах вн16x2,0 вероятность выхода размера стенки за нижнюю границу поля допуска не $2,0 \cdot 10^{-7} \%$, за верхнюю — не более $2,2 \cdot 10^{-9} \%$;

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 816 с. — ISBN 5-9221-0707-0.

2. Liberman G.J., Owen D.B. Tables of the hypergeometric probability distribution. Stanford Univ. Press. Stanford. Calif., 1961

3. R Development Core Team (2009). 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>.

4. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 584 с. — ISBN5-03-001191-9.

5. Daniell P.J. Discussion of «On the Theoretical Specification and Sampling Properties of Autocorrelated Time-Seies», J.R.Stat. Soc., ser. B, vol. 8, pp 88-90, 1946.