



Е. И. Марукович  
А. П. Марков  
О. Ю. Бондарев

# ДИСТАНЦИОННАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ КОНТУРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
Институт технологии металлов

Е. И. Марукович  
А. П. Марков  
О. Ю. Бондарев

# ДИСТАНЦИОННАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ КОНТУРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Под общей редакцией  
академика Е. И. Маруковича*



Минск  
«Беларуская навука»  
2011

УДК 620.179.1:53.082.5

**Марукович, Е. И.** Дистанционная дефектоскопия контурных поверхностей / Е. И. Марукович, А. П. Марков, О. Ю. Бондарев; под общ. ред. Е. И. Маруковича. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 330 с. – ISBN 978-985-08-1343-5.

В монографии обобщены результаты исследований и разработок лабораторных и промышленных визуаскопов, автоматизированных средств дистанционной дефектоскопии сложноконтурных протяженных изделий на основе оптических, оптико-волоконных и оптико-электронных преобразований информативных излучений. Рассмотрены информационно-физические основы методов и средств дистанционной дефектоскопии наружных и внутренних поверхностей с учетом комбинированных преимуществ комплексных преобразований первичных признаков формирующихся отклонений в пространственно-временном поле нормированных допусков. Представлены информационно-технологические модели и характеристики пространства состояний и свойств элементов поверхности, предложены способы, средства и технологии интер- и интроскопии плоских и объемных зон изделий с изменяющимися профилями.

Предназначена для исследователей, испытателей и инженеров, занимающихся разработкой способов и технологий неразрушающего контроля а также студентов, магистрантов и аспирантов инженерных и приборостроительных специальностей.

Табл. 12. Ил. 77. Библиогр.: 104 назв.

**Р е ц е н з е н т ы:**

доктор технических наук Г. Ф. Ловшенко,  
доктор технических наук В. М. Пашкевич

**ISBN 978-985-08-1343-5**

© Марукович Е. И., Марков А. П.,  
Бондарев О. Ю., 2011

© Оформление. РУП «Издательский дом  
«Беларуская навука», 2011

## ВВЕДЕНИЕ

В современном приборостроении и различных отраслях машиностроительного комплекса в связи с усложняющейся техникой и технологиями, а также расширяющейся номенклатурой и растущими масштабами производимой продукции предъявляются повышенные требования к способам и средствам оперативного контроля.

В единой системе контроля качества изделий важное значение имеют пространственно распределенные параметры поверхностей геометрических тел. Пространственно-временные изменения свойств любого геометрического тела первоначально проявляются в некоторых их технологических и конструктивных отклонениях от нормируемых значений. В совокупности таких отклонений отражается качественное состояние поверхностей и самих изделий. В единых программах обеспечения качества особое значение приобретает анализ и своевременное выявление признаков и причин деградации материалов и изделий, в которых проявляются многофакторные взаимозависимости отклонений, поверхностных неоднородностей и качества. Стратегическая задача обеспечения контролеспособности отдельных операций и всего производственного процесса состоит не только в оценке их нормированного ресурса, но и упреждении аномальных отклонений и аварийных ситуаций [20, 74, 91].

Дефектоскопия представляет совокупность методов и средств неразрушающего контроля для обнаружения внутренних и поверхностных дефектов материалов и изделий. В дистанционной

дефектоскопии объединяются способы и средства оценки текущего состояния поверхностей геометрических тел. Она включает мониторинг, в том числе наблюдение, контроль, регулирование и управление параметрами и свойствами отдельных участков или всего изделия. С учетом воздействия определенного фактора или группы факторов строятся алгоритмы, способы и структуры дистанционной дефектоскопии.

В условиях производства и эксплуатации различных изделий технологическими нормативами определены параметры, критерии и технологии оценки состояния поверхностей геометрических тел. Однако любое технологическое воздействие, как и воздействие окружающей среды и внешних технических систем, вызывает изменение пространственно распределенных геометрических параметров поверхностей. Эти изменения проявляются в характерных физико-технических признаках поверхностей элементов геометрического тела. И если физико-технические свойства и признаки поверхностей присущи материальному телу, то на информационном уровне они абстрагируются в некотором информационном поле. Для характеристики случайных отклонений состояний и свойств поверхностей в большинстве случаев пользуются интенсивностью флуктуаций источников информации и корреляционной функцией ввиду незначительности среднего значения флуктуационного поля [23].

Пространственно-временное изменение свойств контурных поверхностей изначально появляется в некоторых технологических сообщениях, совокупно отражающих определенные признаки зарождающихся дефектов. С появлением таких сообщений проявляется первичная информация об изменяющихся свойствах и параметрах элементов поверхностей.

Во взаимодействии излучений с элементами поверхности формируются пространственно распределенные источники первичной информации. В них отражаются ненормальные свойства элементов деградирующей поверхности в форме, соответствующей отклонению (неоднородности) нормированных признаков. Само по себе нормированное признаковое пространство не информативно, в нем нет новых сведений о пространственно-вре-

менных изменениях состояний и свойств геометрического тела. Формирующаяся неоднородность является первопричиной технологической информации, ее первичным источником.

Для эффективной эксплуатации и ресурсосбережения с хорошо продуманной системой базовой автоматизации контрольно-измерительных операций лучшую контролируемость и управляемость обеспечивают оперативная дефектоскопия и диагностика. В такой стратегии определяющее значение имеет выявление взаимосвязи разнородных воздействий и соответствующей технологической изменчивости, отображаемых в формирующейся первичной информации. И здесь особую значимость приобретают системные факторы проявляемых физико-технологических признаков аномальных отклонений и их корреляционных связей с информативными излучениями в пространственно-временных координатах поверхностей и объемов [3, 31].

Изменчивость состояний и свойств элементов поверхности позволяет оперативно оценивать отклонения их геометрических параметров, отличающихся природой, спецификой структуры и режимами работы изделия. При этом задача дефектоскопии на первичном уровне состоит в описании и выделении аномальных признаков пространственно-распределенных отклонений с последующей идентификацией и классификацией фактического дефекта по информативному источнику.

Специфика пространственно-распределенных источников информации определяется случайным сосредоточением некоторых характерных признаков поверхности (объема), отличающейся протяженностью, макро- и микрорельефом и конструктивным своеобразием профиля изделия. При этом источник первичной информации «модулирует» зарождающиеся технологические отклонения и соответствующие информационные неоднородности с отображением их пространственно-временных координат, свойств и параметров. И естественным критерием оценки информативности источников служит количество сведений, содержащихся в них.

Для удаленных элементов поверхности с труднодоступными зонами и распределенными участками контроля (в статике и ди-

намике) особо важно наличие максимальной информации, получаемой оперативно и своевременно в процессе дефектоскопии. В любом случае информационно-преобразовательные операции дефектоскопии сводятся к получению численных значений спектрально-энергетических параметров информативных излучений. Это относится как к оценке параметров в импульсно- или синусоидально-модулированном, так и в аналоговом режиме излучения. Если для источников информации средней и максимальной мощности их выявление связано с ориентацией приемника, то для слабых излучений особо значимо их проявление в реальной помеховой обстановке. И здесь в большей мере существенно как распределение мощности во времени (форма сигнала), так и в пространстве (поверхностная плотность). В таких случаях спектрально-энергетическое взаимодействие источников излучений, среды и материальной поверхности играет определяющую роль.

Формализованное пространственно-временное распределение отдельных операций и разграничение поставленных задач дефектоскопии позволяют для отдельно взятого элемента изделия использовать свой математический аппарат и конкретизировать многопараметровые функциональные зависимости с учетом наложенных ограничений. В них учитываются все совокупности выходных и входных переменных, определяемых структурой протяженного изделия и элементов его поверхности.

Установить даже имеющиеся разнообразные и многофакторные причинно-следственные связи между признаками отклонений и их пространственно-временным проявлением весьма сложно. И обследование всей совокупности состояний и свойств и их причинно-следственных взаимосвязей не представляется возможным и реализуемым. Однако ряд причин, не поддающихся прогнозированию и учету, в условиях эксплуатации создает экстремальные ситуации, связанные с его критическим состоянием и дальнейшей работоспособностью. Прогнозы пространственно-временного состояния случайно распределенных источников технологической информации из-за отсутствия достаточных статистических сведений о наличии отклонений и отказов далеки от истинных значений.

Статистические способы в оперативном контроле создают возможности ограничивать ресурс использования, скорректировать нормативную базу. Но для этого требуются длительное обследование, испытания, опытная эксплуатация и систематизированный набор статистических данных.

Более эффективно проводить дефектоскопию по морфологическим и генетическим признакам. При этом первичная информация формируется не в абсолютном параметрическом пространстве, а в пространственно-временных отклонениях от установленных допусками норм. Такой методический подход позволяет перейти от абсолютных способов и схем первичных преобразований к относительным и косвенным по отклонениям в некотором признаковом пространстве. И тогда первичная информация проявляемых технологических признаков формируется с появлением аномальных отклонений.

По существу в процессе дефектоскопии получают новые сведения о состоянии поверхности только тогда, когда ее параметрическое пространство выходит из некоторых нормативно обусловленных границ. И здесь особо значимо экстремальное состояние в этих границах, обуславливающее критические ситуации в условиях эксплуатации. При нормальном функционировании само изделие «не информируется», а источники информативных сообщений формируются только при появлении аномальных отклонений в некотором многопараметровом пространстве. Ненормальному состоянию участка поверхности с его характерными геометрическими параметрами соответствует совокупность сигналов другой физической природы, отображающих абстрактное неоднородное информационное поле. В такой структурной взаимосвязи материально-физическому изделию соответствует информационно-физическое абстрактное отображение его свойств [63, 64].

Аномальные отклонения с зарождающимися информационно-физическими неоднородностями в динамике приводят к различного рода дефектам. Наличие такой неоднородности, а еще хуже – одновременно проявляющейся совокупности неоднородностей приводит к неработоспособному, в худшем случае ава-

рийному состоянию. И здесь особую значимость приобретают системные факторы и источники их проявления, которые могут использоваться в системах тестирования и особенно в режиме он-лайн.

В подходе к комплексному решению задач дефектоскопии исходят главным образом из возможностей отдельных методов системного объединения их преимуществ в трансформации первичных признаков в едином информационно-формализованном процессе. В дистанционной дефектоскопии определяющими являются естественное пространство состояний, унификация и формализация. При этом особое значение имеют формализованные взаимосвязи между различными факторами и характером изменений под влиянием многофакторных воздействий и разнообразных условий. В моделях их формализации обеспечивается взаимодействие всех компонент, характер их организации и функционирования. В унификации и формализации моделируется не «физическая реальность», а локальная взаимосвязь – между отдельными признаками, свойствами и величинами (сигналами).

Структуризация информационно-преобразовательных процессов устанавливает главные взаимосвязи между функциональными элементами, модулями, блоками с переходом к детальному моделированию механизмов и зависимостей функционирования по отдельным эффектам, операциям и всей структуре дистанционной дефектоскопии. В монографии использована общепринятая терминология неразрушающего контроля [49, 51].

Авторы признательны рецензентам за доброжелательное отношение к представленной рукописи, а также профессору П. И. Маркову за предоставленные описания неопубликованных авторских свидетельств и замечания по структуре монографии. В подготовке материалов принимали участие магистрант В. В. Потапкин (разделы 4.2, 4.3, 5.4), В. В. Писарик (разделы 1.3, 5.1), Е. М. Патук (разделы 1.2, 6.3), В. Ф. Гоголинский (разделы 6.4, 6.5).

## **ЭЛЕМЕНТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПЕРВИЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

Различия в информационно-преобразовательной структуре дистанционной дефектоскопии обусловлены спецификой линейно-угловых величин, элементов, параметров и диапазонов контролируемых изделий. Если измерения длин и углов строятся на оценке расстояния между двумя точками поверхности, то для дистанционной дефектоскопии пространственно распределенных и конструктивно связанных элементов поверхности необходим ряд сложных аналитических зависимостей ее координат. Существенное значение имеют и совокупности непрерывно расположенных элементов, их конструктивные особенности, поверхностные неровности и несплошности и др. Если неровность определяет изменения (отклонения) геометрического параметра поверхности геометрического тела, то поверхностная или сквозная несплошности обусловлены нарушениями прочности изделия [56].

Для любого геометрического тела нормирование его параметров устанавливает некоторые границы изменений допускаемых предельных значений его геометрических параметров. Чтобы оценить их реальное состояние, необходим комплекс различных видов обеспечения [45].

Обеспечение предполагает применение совокупности способов, средств и технологий с целью создания требуемых условий профильного функционирования изделия. Метрологическое обеспечение – применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для дости-

жения единства и требуемого качества измерений. Техническое обеспечение определяет использование совокупности технических средств, а также вычислительных устройств, периферийных средств и средств связи. Эргономическое обеспечение предусматривает создание оптимальных условий для деятельности дефектоскописта. Учет всех этих разновидностей обеспечения позволяет оптимизировать структуру способов дистанционной дефектоскопии, адаптированной к характеру производства, специфике изделий, условиям эксплуатации и задач отрасли.

В любом случае дефектоскопия изделий неразрывно связана с элементами поверхности геометрического тела. Для реальных поверхностей принципиальное отличие состоит в том, что оцениваются:

- расстояние между некоторыми характерными точками;
- геометрические параметры и их отклонения;
- пространство состояний и свойств поверхности.

В оценке расстояния между точками поверхности достаточно задать эти точки, провести через них осевую линию и наложить на нее эталон (единицу длины). При этом весьма существенное значение имеет отсчет начальной точки и считывание числа единиц длины, которое уложится на этой оси. То есть для измерения расстояний необходимо иметь начало отсчета (условный нуль), относительно которого фиксируются целые или дробные значения единиц длины. Если в абсолютных измерениях используются значения физических постоянных путем прямых измерений одной или нескольких величин, то в относительных измерениях фиксируется отношение расстояния к одноименной длине, принятой за исходную.

В отличие от измерений длины переносными устройствами, когда используется мера и измерительное средство сравнения, в координатных измерениях последовательно считываются распределенные по поверхности значения координат с последующей обработкой по принятому алгоритму в заданной системе координат. В координатных способах расстояние рассчитывается по известной зависимости между координатами точек поверхности, чем существенно усложняются технологии дефектоскопии.

## 1.1. Геометрические параметры поверхностей и их отклонения

Геометрические параметры изделий определяются характерными особенностями поверхности. Сама поверхность выступает как граница, отделяющая геометрическое тело от внешнего пространства.

В технологиях литья и металлургии практически невозможно представить процесс или изделие без поверхности как границы, одновременно определяющей и соединяющей элементарные части геометрического тела, более сложные структуры и образования. От процессов, происходящих в этой достаточно тонкой приграничной поверхностной зоне, зависит разрешение различных противоречивых явлений, ход которых может отразиться как на любом объекте управления, так и на окружающей его среде. Всякая поверхность отличается особыми макроскопическими свойствами, которые формируются и зарождаются на микроуровнях.

Ведущую роль играют поверхностные процессы в современных технологиях литейного производства и металлургии. Наряду с проблемой рационального применения материалов и энергии важное значение приобретают процессы интегрирования разнообразных свойств в локализованной приповерхностной зоне (области) геометрического тела. В приграничной области на границе раздела двух фаз более эффективно проявляются особенности взаимодействия различных воздействий (тепло-энергетических, оптических и других излучений) с элементами геометрического тела. Наряду с рациональным использованием свойств металлических поверхностей существует проблема создания геометрических элементов заданными свойствами.

Особенность активности металлических поверхностей во взаимодействии с излучениями заключена в микроскопической структуре приповерхностного слоя. И всякие их изменения в дальнейшем проявляются на микроуровнях. Необходимость изучения процессов взаимодействия излучений с геометрическими телами превратила поверхность металлов в своеобразный

полигон для создания физических методов контроля и дефектоскопии [19].

В приповерхностном слое более эффективно спектрально-энергетическое взаимодействие излучений с элементами геометрического тела. Трудности близкого наблюдения за текущими изменениями свойств, проявляющихся в спектрально-энергетических характеристиках отображаемого информативного излучения, обусловили развитие и использование физических эффектов проявления микроскопического и макроскопического состояний поверхностей. Целенаправленное использование свойств поверхностей геометрических тел и запрограммированное управление этими свойствами требуют современных методов и средств моделирования и натуральных испытаний.

Результаты косвенных измерений в натуральных испытаниях связаны с большими объемами количественной обработки косвенной информации и ее интерпретации. А для этого необходимо использовать математические модели, способные адекватно описывать исследуемые явления в условиях многофакторных взаимовлияющих зависимостей большого числа переменных.

Сложные зависимости моделей описания поверхностных элементов геометрических тел отражают основные конструкции и их свойства. Они имитируют изделие, пока не созданы алгоритмы решения конкретных математических задач взаимозависимости изменения характеристик геометрического тела и свойств поверхности. Имитируя ту или иную ситуацию натурального эксперимента или проектных изысканий, создают возможность получить количественные результаты и предсказать (прогнозировать) изменение геометрического тела в экстремальных условиях. Сочетание и сбалансированное использование всех известных методов моделирования и технологического контроля, включая микропроцессорные методы обработки и интерпретации результатов, способствуют повышению эффективности исследований и испытаний новых разработок и творческой активности специалистов разных профессий.

**Отличительные признаки геометрических параметров поверхностей.** В общем случае поверхности геометрических тел различаются по видам и параметрам (рис. 1.1, 1.2).

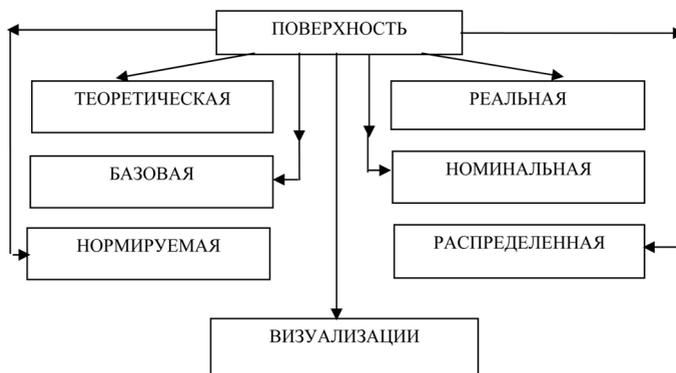


Рис. 1.1. Виды поверхностей элементов геометрических тел

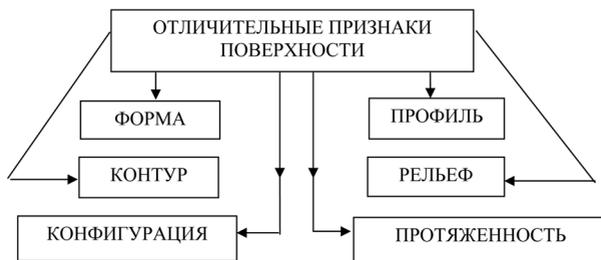


Рис. 1.2. Конструктивные особенности поверхностей

Отличительные признаки изменяющихся в эксплуатации состояний и свойств геометрического тела проявляются в реальной поверхности. В реальной поверхности с изменением контура отдельных участков отчетливо вырисовывается характер изменений и внутреннего состояния изделия.

Если теоретическая поверхность определяется расчетными координатами точек, то реальная – фактическими координатами, ограничивающими изделие и отделяющими его от окружающей среды. В свою очередь базовая поверхность представляется поверхностью, относительно которой определяются ее геометрические параметры, а для номинальной поверхности параметры определены технической документацией.

По существу параметры геометрического тела задаются нормируемой поверхностью с определенными отклонениями в некотором поле допусков. При этом технологические отклонения характеризуются случайным распределением в соответствующих пространственных координатах. Для информационно-измерительных средств поверхность визуализации определяется физической средой графического устройства, на котором воспроизводятся изображения.

Каждый элемент геометрического тела как объекта контроля характеризуется своими отличительными признаками поверхности. Если формой представляются внешние очертания изделия, а контур-линия очерчивает форму, то рельеф отображает совокупность неровностей поверхности. В отличие от конфигурации как внешнего вида очертания поверхности ее протяженность характеризует распределение и связь отдельных геометрических элементов в пространственных координатах изделия.

В отличие от расстояний (линейно-угловых величин) геометрические параметры геометрических тел оцениваются по сложным аналоговым зависимостям от координат элементов, непрерывно расположенных на реальной поверхности. В этом случае для оценки несоответствия геометрического параметра номинальному значению необходимо иметь некоторую базовую поверхность. Если базовая поверхность является номинальной, то эту номинальную поверхность необходимо каким-то образом вписать в реальный геометрический элемент поверхности. При этом практически считывается множество координат точек поверхности и осуществляется дискретизация измеряемой аналоговой величины.

Состояние пространственно-распределенных элементов поверхности определяется характерными геометрическими параметрами (рельеф, форма, расположение, микронеровности и др.). Они рассчитываются по определенным математическим зависимостям и алгоритмам. Но в любом случае необходимо задать сам элемент (зону, участок) в принятой системе координат (ортогональная или декартова система) поверхности как объекта контроля.

Сами по себе геометрические параметры ввиду протяженности поверхностей представляют интерес не в абсолютном представлении, а в их максимальном или среднем арифметическом отклонении от номинальной формы геометрического элемента. Но для оценки отклонений надо знать, от какой базовой поверхности эти отклонения отсчитывать. Если это номинальная базовая поверхность, то необходимо и эту поверхность каким-то образом вписать в реальный геометрический элемент, чтобы потом по определенной схеме оценить фактическое значение отклонения.

Практически невозможно прямыми абсолютными методами оценить геометрические параметры поверхностей и их отклонений, что требует изыскания специфических признаков и зависимостей косвенных и сопоставимых сравнений реальных и нормируемых поверхностей.

## **1.2. Моделирование отклонений элементов контура**

**Элементы поверхности как объекты дефектоскопии.** Всякое геометрическое тело как материальная конструкция является системой большого числа в той или иной степени функционально взаимозависимых элементов поверхности. Система этих элементов находится в некотором пространственно-временном положении относительно окружающей среды и других сопрягаемых поверхностей. С учетом особенностей и взаимосвязей элементов поверхности могут быть использованы современные эффекты взаимодействия излучений и современной элементной базы. Эти особенности необходимы для выделения основных характеристик геометрического тела и набора определяющих геометрических параметров поверхности его элементов. При этом в математических моделях описания свойств таких поверхностей учитываются особенности структуры материалов, специфика конструктивных переходов и межэлементных связей, проявляющихся в тех или иных технологических отклонениях. Учет таких особенностей позволяет четко и предметно формулировать задачи и условия математического моделирования.

Образующаяся в процессе изготовления поверхность элементов геометрического тела с некоторым приближением соответствует расчетной. Микроструктура материала и технологии изготовления обуславливают наличие некоторых ступеней и изгибов в приповерхностном слое. Поверхностный слой может изменять свою структуру как спонтанно, так и под внешними воздействиями среды. Пространственно-временная изменчивость структуры материала проявляется в изменениях геометрической структуры и неоднородностях поверхности. Изменчивость структуры материала и неоднородности поверхности в общем случае непредсказуема.

Структура способов дистанционной дефектоскопии строится на моделях элементов поверхностей различных геометрических тел. Определяющими являются ненормированные отклонения элементов реальной поверхности от теоретической.

Способы и технологии оценки отклонений геометрических параметров поверхностей имеют обобщенную структуру процедуры трансформации их конструктивных признаков. В этих признаках формализованно в виде моделей реализуются аналитические зависимости между элементами конструкции и между выходной и входной величинами операционных преобразований. При этом используются существующие функциональные и корреляционные (по метрологии) связи между геометрическими параметрами и конструктивно-технологическими признаками элементов поверхности, что представляет некоторые трудности [31]. Поэтому при выборе и разработке способа и средства (системы) оценки требуемого геометрического параметра и устанавливается соответствующая метрологическая сущность сходства и принципиальных отличий от других аналогичных. Необходимо также адекватное описание и наличие откалиброванной базовой поверхности в определенной системе координат.

Весьма существенно, что геометрические параметры представляют не только сами размерные параметры, но и параметры отклонения величины и пространственного расположения рассматриваемого элемента поверхности. По совокупности эксплуатационных причин в реальной поверхности появляются неко-

торые специфические «ненормальные» отклонения геометрических параметров. Такие «ненормальности» отличаются своей конструктивно-технологической природой проявления и причинно-следственными многофакторными связями с реальным состоянием и характерными особенностями геометрического тела и условий эксплуатации.

Геометрические параметры составляют базу для математического описания взаимосвязи геометрии поверхности тела и его эксплуатационных свойств. По геометрическим параметрам эффективно прогнозирование эксплуатационных свойств поверхности (детали, изделия) в ее пространственно-временных координатах.

В общем объеме дефектоскопических операций большую часть и значительную сложность представляют измерения отклонений геометрических параметров и в их числе сечений, профилей, форм. Особенную значимость имеют длинномерные, сложноконтурные, протяженные и габаритные изделия. Значительной трудоемкостью отличаются измерения следующих отклонений:

- форм внутренних и наружных поверхностей;
- расстояний от контура до воображаемой линии (точки);
- расстояний между контурами и поверхностями;
- координат переменных профилей (типа лопаток);
- рельефа пространственно-распределенных поверхностей.

При всей сложности и многообразии задач дистанционная дефектоскопия требует максимальной адаптации к специфике геометрии и эксплуатационных условий. В оперативном контроле и дефектоскопии поверхностей применимость способов координатных измерений ограничена. Мобильность и производительность аппаратного обеспечения требуют малогабаритных, легко приспособляемых к геометрическому телу, к операциям, к технологическому процессу и условиям производства способов и средств. Особо жесткие требования в дефектоскопии поверхностей предъявляются к структуре и метрологии при монтажно-наладочных работах и натурных испытаниях.

**Геометрические параметры поверхностей.** Реальное состояние геометрических тел, характер и технологии их соедине-

ний определяются геометрическими параметрами сопрягаемых поверхностей. Геометрические параметры как база для описания взаимосвязи конструктивных элементов геометрического тела отражают эксплуатационные свойства поверхности в реальных пространственно-временных координатах. В совокупности взаимозависимостей поверхностей элементарных участков проявляется конфигурация всей поверхности и формируются технологические признаки зарождающихся «ненормальностей» в текущих отклонениях геометрических параметров (рис. 1.3).

Участок расчетной (базовой, теоретической) поверхности моделируется абсолютно гладким контуром 1. Для нормированной поверхности 2 устанавливается некоторый технологический допуск, в пределах которого отклонения в виде выступов 3 или впадин 5 ограничены полем допуска  $\delta = x_{\max} - x_{\min}$ . Для неидеальной поверхности характерно наличие экстремальных ненормальностей 4, когда отклонения геометрических координат  $x_i$  реального контура превышают нормированные границы по верхнему или нижнему отклонениям от нормы. При этом для формирования первичного сообщения в виде появляющейся ненормальности достаточно хотя бы одного выхода из нормированного поля допуска независимо от нижнего или верхнего отклонений.

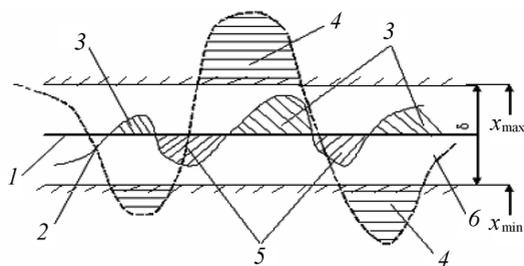


Рис. 1.3. Модель элементарного контура поверхности геометрического тела: 1 – поверхность базовая теоретическая; 2 – поверхность нормированная технологическая; 3 – выступы; 4 – отклонения экстремальные; 5 – впадины; 6 – поверхность реальная;  $\delta$  – поле допуска;  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  – максимальное и минимальное отклонения

В зависимости от характера сопряжения наружной и внутренней поверхностей (система вала или система отверстия) поле допуска может быть симметричным относительно базовой поверхности или ассиметричным. В первом случае верхнее и нижнее отклонения по модулю будут одинаковыми, во втором – определяться типом посадки для разъемных и неразъемных соединений.

### **1.3. Отклонения геометрии и неоднородности поверхностей**

Для любой поверхности изменения геометрических параметров проявляются в пространстве состояний и свойств. В изменении пространства состояний и свойств поверхности отражаются физические признаки отклонений и неоднородностей поверхностной структуры. Особой информативностью отличаются ненормальные отклонения, связанные с их выходом из поля нормированных допусков. Отклонения геометрических параметров составляют информационную базу для формализованной взаимосвязи геометрии с эксплуатационными свойствами поверхности. По отклонениям геометрических параметров эффективно прогнозирование эксплуатационных свойств поверхности (детали, изделия) в ее пространственно-временных координатах.

В совокупности эксплуатационных причин изменений реальной поверхности проявляются некоторые специфические «ненормальные» отклонения геометрических параметров. Такие «ненормальности» отличаются своей конструктивно-технологической природой проявления и причинно-следственными многофакторными связями с реальным состоянием и характерными особенностями геометрического тела. При этом на природу экстремальных отклонений геометрических параметров существенное влияние оказывает предрасположенность элементов самой поверхности. В большинстве случаев наблюдаются противоречия между информационно-физическими признаками зарождающейся «ненормальности» и ограниченностью априорной информации о динамике и характеристиках отклонений.

Отклонения геометрических параметров и их признаки могут быть статическими и динамическими, пространственными и временными, сосредоточенными и распределенными, детерминированными и вероятностными. Все признаки отклонений, а также условия их проявления являются стохастическими. В отличие от стохастических признаков, описываемых некоторыми случайными закономерностями, детерминированные признаки поддаются точному проявлению. Особую сложность представляют признаки чисто случайные, не поддающиеся расчету.

Обнаружение первичных признаков отклонений в основном сводится к выявлению информативных источников в виде неоднородностей в информационном отображении элементарного участка поверхности. Из всей совокупности информативных параметров неоднородностей выделяется некоторый ограниченный набор признаков отклонений, их соответствующих неоднородностей и корреляционных и аналитических соотношений. При этом используются физические, технологические, статистические и информационные отображения отклонений геометрических параметров.

В общем случае отклонения геометрических параметров и их информационные неоднородности могут быть разделены на три группы:

отклонения определены с заранее известными признаками; определены физические величины, диапазоны и нормы на их значения;

отклонения определены, но пространственно-временные характеристики их случайны; физические величины и нормы на их значения, определяющие известные свойства, заданы; однако их расположение в пределах пространственной области геометрического тела случайно;

отклонения неопределенные и для их обнаружения проводится поиск и обследование поверхности с заранее неизвестными свойствами, которые в лучшем случае могут быть только предсказаны; характерные признаки таких отклонений не определены, пространственно-временное распределение их и диапазоны не известны.

С учетом этого техника и технологии дистанционной дефектоскопии ориентируются на специфику отклонений и массогабаритных параметров изделия.

В способах и средствах дистанционной дефектоскопии поверхностей первичным признаком отклонений выступает выход отдельных точек или участков из допустимых границ  $\Delta$  относительно нормируемой поверхности 1 (рис. 1.4).

При этом реальная поверхность 2 может выйти из допуска в максимальном или минимальном отклонении 3.

В ситуации, когда реальная поверхность совпадает с нормируемой, отклонение имеет нулевое значение 4.

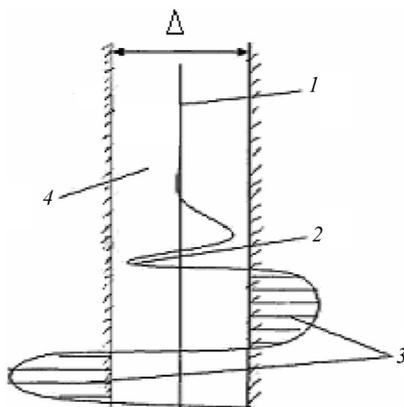


Рис. 1.4. Схема формирования технологических признаков: 1 – поверхность нормируемая; 2 – поверхность реальная; 3 – отклонение anomальное; 4 – отклонение нулевое;  $\Delta$  – допуск

**Особенности дефектоскопии сложноконтурных поверхностей.** Для сложноконтурных геометрических тел выявление отклонений профилей или контуров протяженных поверхностей связано с проблемой базирования в принятых пространственно-временных координатах. Как номинальный, так и периодический профиль является случайным отображением формы поперечного сечения элемента геометрического тела.

Отклонения нормируемой поверхности определены системой соединения сопрягаемых деталей и соответствующей посадкой. С учетом посадки соединения поверхностей реальных деталей образуются с зазором или натягом, т. е. подвижные или неподвижные [27]. В таком случае в структурно-алгоритмической реализации метода и схемы дистанционной дефектоскопии принципиально важно выявление характера распределения отклонений формы протяженных сложнопрофильных геометрических тел. В таких структурах алгоритм оценки отклонений про-

филя строится по случайному контролируемому участку контура (рельефа) или по всему периметру обследуемой поверхности. В условиях непрерывного производства с пространственно-временными особенностями операционных взаимодействий алгоритмы и методы схемно и конструктивно должны быть адаптированы к специфике самого изделия.

Для сложноконтурных изделий оценка отклонений сечений и профилей отдельных участков, особенности схем измерений и технических средств обусловлены особенностями изделия. Как номинальный, так и периодический профиль поверхности является случайным отображением формы поперечного сечения элемента. Такая особенность принципиально важна для выявления характера распределения отклонений формы особенно протяженных сложнопрофильных изделий, т. е. оценка профиля по отдельным контролируемым участкам контура или по всему периметру поверхности. Для непрерывного производства (без разрыва процесса вытяжки) движущегося изделия способ и средства дефектоскопии схемно и конструктивно должны быть приспособлены к особенностям самого технологического процесса.

Для единичного и мелкосерийного производства более эффективны технические средства пассивного оперативного контроля профилей. Как стопроцентный, так и выборочный контроль изделий является сложной и ответственной операцией, в том числе и трудоемкой. Автоматизация такого контроля обеспечивает замену человека на наиболее физически напряженных операциях по базированию технического средства (как бы самоустанавливающегося), съему и обработке (счетно-вычислительные операции) измерительной информации. Обработка информации с помощью современной оптико-электронной и микропроцессорной техники улучшает эргономику, повышает достоверность и производительность контроля. С учетом этих требований контрольно-измерительные средства должны быть в некоторой мере универсальными и унифицированными устройствами оперативного контроля.

Лучшими тактико-техническими характеристиками отличаются способы и бесконтактная техника дефектоскопии. Бескон-

тактным схемам присущи некоторые метрологические преимущества:

быстродействие и отсутствие обратного воздействия в цепи преобразований;

нет погрешностей от износа чувствительного элемента при непосредственном механическом контакте с поверхностью;

не влияет материал поверхности изделия;

возможность оперативного контроля легко деформируемых поверхностей;

допустимость некоторых смещений изделия на измерительной позиции.

Комплексное обследование поверхностей предполагает получение и трансформацию физико-технических признаков изменчивости их геометрических параметров и формирующихся неоднородностей в абстрактное оптическое изображение. Такое обследование находит отображение в алгоритме дефектоскопии, программной обработке получаемых результатов, в способах и технических средствах. Их обоснованный выбор определяется характером отклонений геометрических параметров и их информационными неоднородностями.

Особой сложностью и трудоемкостью отличается дефектоскопия поверхностей с неопределенными отклонениями. Совокупность таких отклонений определяет большую информационную емкость при многообразии информативных параметров. При этом предъявляются высокие метрологические требования при больших диапазонах допускаемых отклонений и разрешающей способности, особенно в динамическом режиме. Однако способы и средства дефектоскопии поверхностей таких уникальных изделий не ограничиваются производительностью и финансово-экономическими требованиями. Структурно-алгоритмическая реализация таких способов дефектоскопии не обусловлена функциональными зависимостями между отклонениями, неоднородностями и их отображением. Однако в этих случаях накладываются жесткие ограничения на динамические характеристики способов и средств дефектоскопии поверхностей с неизвестными свойствами, признаками и распределения-

ми неоднородностей. С учетом таких особенностей эти способы и средства носят универсальный характер и по существу являются многоцелевыми в применении к другим изделиям и отраслям со схожими задачами дистанционной дефектоскопии.

Дефектоскопия поверхностей определенных изделий со случайными характеристиками отклонений позволяет исследовать и установить области существования их признаков и свойств и получить статистические зависимости информативных параметров при заданных диапазонах и нормах. При ограниченном объеме первичной информации способы и средства дефектоскопии отличаются расширением функций по обработке, хранению и документированию результатов. Специализированный характер дефектоскопии в таких случаях учитывает широкий динамический диапазон и повышенные метрологические требования.

Способы и средства дефектоскопии поверхностей с известными видами и диапазонами отклонений и неоднородностей ориентированы на оценку пригодности изделия по геометрическим параметрам к функционированию в заданных условиях. В простейшем виде дефектоскопия таких изделий сводится к оценке пригодности: «да» или «нет», «годен» или «не годен», брак и его виды и т. д. Дефектоскопия таких изделий отличается простотой технологий и средств, сравнительно невысокой стоимостью и узкоспециализированным предназначением.

Информационно-технологическая трансформация признаков аномальных отклонений и неоднородностей поверхности в совокупность абстрактных сигналов строится на моделировании взаимодействия воздействующих излучений с отклонениями ее отдельных зон. При этом в таком взаимодействии добиваются максимального проявления экстремальных отклонений выявления их выходов из нормальных допусков и достоверного обнаружения чувствительными элементами системы.

#### **1.4. Первичная информация и ее источники**

Поверхности различных изделий, полученные путем механических, теплофизических и других энергофизических воздействий в процессе эксплуатации, изменяют свои свойства, форму,

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<i>Глава 1. Элементы поверхностей и первичная информация</i> .....	9
1.1. Геометрические параметры поверхностей и их отклонения . . .	11
1.2. Моделирование отклонений элементов контура .....	15
1.3. Отклонения геометрии и неоднородности поверхностей .....	19
1.4. Первичная информация и ее источники .....	24
<i>Глава 2. Моделирование информационно-физических преобразований в структуре дефектоскопии</i> .....	37
2.1. Проявляемость и выявляемость поверхностных неоднородностей .....	38
2.2. Проявляемость и трансформация информативных признаков .	45
2.3. Структура пооперационных преобразований .....	53
2.4. Моделирование переноса энергии и изображений оптически прозрачными средами .....	79
<i>Глава 3. Спектрально-энергетическая трансформация оптических излучений</i> .....	93
3.1. Особенности спектрально-энергетического взаимодействия лучистого потока с неоднородной поверхностью .....	94
3.2. Ориентированный поиск информативных источников .....	111
3.3. Спектрально-энергетическое согласование в световодной трансформации информативных излучений .....	128
3.4. Способы и структуры управляемого согласования .....	136
<i>Глава 4. Информационно-преобразовательная структура дефектоскопии</i> .....	143
4.1. Математическое моделирование функции преобразования информативных излучений .....	144
4.2. Структурная оптимизация дефектоскопии .....	148
4.3. Методология выбора структуры дефектоскопии .....	152
<i>Глава 5. Визуаскопия неоднородных поверхностей</i> .....	159
5.1. Элементная база дефектоскопии .....	159
5.2. Операционная структура визуаскопии поверхностей .....	201
5.3. Взаимодействие излучателей и приемников в визуаскопии . . .	219
5.4. Способы и структура ориентированной визуаскопии .....	229

<b>Глава 6. Техника и технологии дистанционной дефектоскопии поверхностей</b> .....	253
6.1. Особенности световодной дефектоскопии .....	255
6.2. Алгоритмы и структура световодных преобразований. ....	272
6.3. Техника и технологии световодной интроскопии .....	281
6.4. Комбинированная дефектоскопия протяженных поверхностей	290
6.5. Некоторые направления совершенствования дистанционной де- фектоскопии .....	300
<b>Заключение</b> .....	319
<b>Литература</b> .....	322

Научное издание

**Марукович** Евгений Игнатьевич  
**Марков** Алексей Петрович  
**Бондарев** Олег Юрьевич

## **ДИСТАНЦИОННАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ КОНТУРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Редактор *И. Л. Дмитриенко*  
Художественный редактор *А. М. Гасова*  
Технический редактор *М. В. Савицкая*  
Компьютерная верстка *Н. И. Кашуба*

Подписано в печать 09.11.2011. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Печать цифровая. Усл.-печ. л. 19,2. Уч.-изд. л. 15,4. Тираж 120 экз. Заказ 264.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом  
«Беларуская навука». ЛИ № 02330/0494405 от 27.03.2009.  
Ул. Ф. Скорины, 40, Минск, 220141.