

Б. Г. МАСЛОВ

# НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ИЗДЕЛИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Допущено*

*Учебно-методическим объединением*

*по университетскому политехническому образованию*

*в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности «Оборудование и технология  
сварочного производства» направления подготовки «Машиностроительные  
технологии и оборудование»*



Москва

Издательский центр «Академия»

2008

УДК 658.562.6(075.8)

ББК 34.43я73

М316

Рецензенты:

зав. кафедрой «Материаловедение и технологии материалов» Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева (КГТУ-КАИ),  
д-р техн. наук, проф. *Э. Р. Галимов*;

доцент кафедры «Технология конструкционных материалов» Московского государственного технического университета «МАМИ» (МГТУ «МАМИ»),  
канд. техн. наук *А. А. Черепухин*

**Маслов Б. Г.**

М316 **Неразрушающий контроль сварных соединений и изделий в машиностроении : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Б. Г. Маслов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 272 с.**

ISBN 978-5-7695-4275-6

Приведены сведения о физических основах и технологии проведения контрольных операций в машиностроении. Рассмотрены требования техники безопасности при проведении контрольных операций. Даны примеры решения задач, возникающих при выборе технологических параметров контроля. Представлен большой объем справочного материала, необходимого для разработки технологических процессов контроля.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 658.562.6(075.8)

ББК 34.43я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Маслов Б. Г., 2008

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2008

ISBN 978-5-7695-4275-6

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2008

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Постоянно растущие требования к качеству выпускаемой продукции, а также расширение ее номенклатуры требуют совершенствования средств и методов контроля этой продукции.

Значительное место в системе контроля качества машиностроительной продукции, изготовленной различными способами (сварка, литье, обработка давлением и др.), занимают радиационные методы и методы дефектоскопии проникающими веществами, включающие в себя методы контроля герметичности изделий и течеискания и капиллярную дефектоскопию.

Автор пособия в течение многих лет преподает дисциплины «Радиационные методы контроля» и «Контроль проникающими веществами» в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Учебное пособие подготовлено на основе ранее выпущенных издательством МГТУ им. Н. Э. Баумана учебного пособия Б. Г. Маслова и А. Л. Ремизова «Радиационная дефектоскопия. Контроль проникающими веществами» и издательством «Высшая школа» учебного пособия Б. Г. Маслова «Дефектоскопия проникающими веществами».

Данное издание дополнено и переработано в соответствии с современными методическими, справочными и нормативными документами в области радиационных методов контроля и дефектоскопии проникающими веществами.

Материалы пособия могут быть использованы при изучении дисциплин «Производство сварных конструкций», «Технология литейного производства» и «Технологияковки и объемной штамповки», в которые тема «Контроль качества изделий» входит как отдельный раздел. Учебное пособие может быть использовано работниками промышленных машиностроительных предприятий, специализирующимися на методах неразрушающего контроля, для специальной подготовки к аттестации на I и II квалификационные уровни.

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВИДАХ И МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ

---

## Глава 1

### ВИДЫ И МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

#### 1.1. Общие термины и определения

Контроль качества заключается в проверке соответствия показателей качества продукции установленным требованиям. Критериями качества могут являться физические, геометрические, функциональные и технологические показатели. Каждое несоответствие показателя качества изделия установленным требованиям называют *дефектом*.

Дефекты в изделиях выявляют при разрушающих и неразрушающих испытаниях.

*Разрушающие испытания* проводят на образцах-свидетелях, моделях или натуральных образцах изделий. Такие показатели позволяют количественно определять характеристики качества, например прочность изделий, их долговечность, коррозионную стойкость и т. п.

*Неразрушающие испытания* позволяют определять наличие дефектов в изделиях без их разрушения и косвенно характеризуют их эксплуатационные характеристики. Методы неразрушающих испытаний основаны на различных физических явлениях, имеющих место при исследованиях качества: прохождение и передача энергии или прохождение вещества через объект контроля — поэтому такие методы часто называют физическими.

Различают виды и методы контроля.

Согласно терминологии, установленной ГОСТ 16504—81, *видом* испытаний (контроля) называют классификационную группировку контроля по определенному признаку.

*Методом* контроля называют правила применения определенных принципов и средств контроля, при этом метод контроля может содержать в себе информацию об определенной последовательности применения этих принципов на практике.

Перечень видов контроля установлен ГОСТ 18353—79.

Различают 10 видов неразрушающего контроля:

- акустический;
- капиллярный;
- магнитный;
- оптический;
- радиационный;
- радиоволновый;
- тепловой;
- течеискание;
- электрический;
- электромагнитный (вихретоковый).

Средства контроля, исполнители и контролируемые объекты представляют собой систему контроля, элементы которой взаимодействуют между собой по правилам, установленным нормативно-технической документацией на контролируемые изделия. Такая система включает в себя три этапа: предварительный, пооперационный (технологический) и приемочный контроль.

*Предварительный* контроль включает в себя проверку квалификации исполнителей, состояния контрольного оборудования, аппаратуры и приспособлений, применяемых материалов.

*Пооперационный* контроль предусматривает проверку качества подготовки изделия или его элементов к проведению технологического процесса, а также правильности порядка его выполнения. Такой контроль позволяет своевременно корректировать технологический процесс в случае его нарушения и оперативно исправлять дефектные места в изделиях.

*Приемочный* контроль завершает технологический процесс изготовления изделий, разделяя их на две группы: годные и негодные (бракованные); приемочный контроль бывает сплошным или выборочным.

## **1.2. Классификация методов неразрушающего контроля**

При контроле изделий различного назначения в различных отраслях промышленности и строительства наибольшее распространение получили ультразвуковые, радиационные, магнитные и капиллярные методы, а также методы контроля герметичности изделий и течеискания.

*Ультразвуковые методы* контроля изделий различного назначения находят в последнее время все более широкое применение. Эти методы позволяют надежно выявлять наиболее опасные дефекты в изделиях — трещины площадью около  $0,7 \text{ мм}^2$  с раскрытием до  $10^{-5}$  мм. Ультразвуковые методы позволяют контролировать любые материалы толщиной от 4 мм до нескольких метров. При ультразвуковом контроле определяют амплитуду сигнала от

дефекта, координаты его залегания и условные размеры. Контроль выполняют с помощью дефектоскопов. Индикация дефектов выполняется на электронно-лучевых трубках. Кроме того, выпускаются специализированные дефектоскопы со стрелочной или цифровой индикацией.

Широкому применению ультразвукового контроля способствуют разработка и внедрение высокочувствительных автоматизированных установок, позволяющих осуществлять запись и автоматическую расшифровку параметров дефектов.

*Радиационные методы контроля* позволяют выявлять в изделиях объемные дефекты, трещины с раскрытием до 0,1 мм, а также некоторые наружные дефекты, например подрезы. Оценка глубины залегания дефектов затруднена и может выполняться приближенно.

Размеры дефектов определяют путем их сравнения с изображениями эталонов — дефектометров канавочного или проволочного типов.

Радиационные методы и, в частности, радиография получили наибольшее распространение при выявлении в изделиях внутренних дефектов различного вида. Контролируют как металлы, так и неметаллические материалы.

Для выявления дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов применяют *магнитные* (магнитопорошковый и магнитографический) методы. Эти методы позволяют выявлять поверхностные и подповерхностные трещины, а также крупные внутренние объемные дефекты, расположенные на глубине до 6 мм от поверхности контролируемого изделия. Толщина контролируемых изделий — до 20 мм.

*Капиллярные* методы контроля (люминесцентный, цветной и люминесцентно-цветной) применяют в основном для контроля изделий из немагнитных неметаллических материалов для выявления дефектов, выходящих на поверхность.

Особую группу методов испытаний составляют методы контроля *герметичности* изделий и *течеискания*, предназначенные для выявления сквозных дефектов, нарушающих герметичность объектов контроля, поскольку радиационные, ультразвуковые, магнитные и капиллярные методы не позволяют обнаружить сквозные несплошности (неплотности). Такие методы часто дополняют систему контроля, когда к изделию предъявляются требования по отсутствию неплотностей.

Большинство методов (магнитный, вихретоковый, капиллярный, ультразвуковой) можно использовать для контроля при одностороннем доступе к изделию. Радиационные методы требуют двустороннего доступа к объекту: с одной стороны находится источник излучения, а с другой — преобразователь информации (детектор).

## **Контрольные вопросы**

1. Что понимают под видом и методом контроля?
2. Какие виды контроля применяют при оценке качества и испытаниях машиностроительной продукции?
3. Какие основные этапы включает в себя система контроля изделий машиностроения?
4. Каковы основные достоинства и недостатки разрушающих и неразрушающих испытаний?

## ВЫЯВЛЯЕМОСТЬ ДЕФЕКТОВ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

### 2.1. Дефекты изделий машиностроения

При изготовлении и эксплуатации изделий машиностроения могут возникать различные дефекты:

- нарушение сплошности материала;
- изменение геометрических размеров изделия;
- изменение физико-механических свойств материала изделия.

К дефектам *первой группы* относятся раковины, трещины, различные включения, поры и т.п., *второй группы* — отклонения длины, ширины, диаметра, толщины стенки изделия, глубины поверхностного (закаленного или науглероженного) слоя, толщины защитного покрытия и т.п., *третьей группы* — изменение значений твердости, предела прочности, предела текучести, относительного удлинения, магнитной проницаемости, остаточной индукции, удельной электрической проводимости материала и других характеристик по отношению к нормативным значениям.

Встречающиеся в металлических изделиях и полуфабрикатах дефекты различают по размерам, расположению и природе появления. Дефекты могут образовываться в процессе:

- плавки и литья (раковины, поры, рыхлоты, включения, трещины, ликвационные зоны и др.);
- обработки давлением (внутренние и поверхностные трещины, расслоения, утяжины, заковы, рванины, плены и др.);
- термической и химико-термической обработки (грубозернистая структура, перегрев, пережог, несоответствие толщины закаленного, цементованного, азотированного и других слоев заданным значениям);
- механической обработки (шлифовочные трещины, прижоги);
- сварки, пайки и склеивания (трещины, непровары, непропаи, непрочности и др.);
- хранения и эксплуатации (усталостные трещины, коррозионные повреждения и др.).

Дефекты могут быть явными и скрытыми, а также малозначительными, значительными и критическими.

Технологические процессы литейного производства, обработки металлов давлением, прокатного производства чаще всего являются промежуточными и позволяют получать заготовки и полуфабрикаты, предназначенные для дальнейшей обработки.



Процессы сварочного производства обычно являются окончательными, позволяющими получать изделия, готовые к эксплуатации, поэтому анализ дефектов сварных соединений имеет особое значение.

Дефекты сварных соединений можно разделить на три группы: наружные, внутренние и сквозные.

К **наружным** дефектам относятся подрезы, наплывы, смещения швов от оси, усадочные раковины, незаплавленные кратеры и трещины.

**Внутренними** дефектами являются непровары, трещины, шлаковые, оксидные и металлические включения, пористость.

К **сквозным** дефектам относятся сквозные трещины, прожоги и свищи.

*Подрезами* называют углубления в местах перехода от основного металла к металлу шва. Это наиболее часто встречающиеся наружные дефекты. Наличие подрезов приводит к ослаблению рабочего сечения сварной конструкции, местной концентрации напряжений и, как следствие, к снижению несущей способности конструкции.

*Напльвами* называют дефекты соединений, когда жидкий металл шва натекает на основной, но с ним не соединяется. Напльвы часто сопровождаются крупной чешуйчатостью швов, которые имеют неравномерную ширину.

*Непроварами* называют локальные несплавления основного металла с наплавленным; непроваром также считают неполное заполнение металлом расчетного сечения шва. При односторонней сварке стыковых соединений со скосом кромок или без нее непровары возникают в корне шва, а при сварке с X-образным скосом кромок — в середине шва. Непровары значительно снижают прочность сварной конструкции, особенно при динамических нагрузках, и могут быть причиной разрушения конструкции.

*Прожогами* называют дефекты, проявляющиеся в том, что жидкий металл вытекает сквозь отверстие в сварном шве, при этом с обратной стороны шва возникают натеки металла.

*Свищами* называют дефекты в виде несплошностей, выходящих на поверхность шва. Такие дефекты могут инициировать появление трещин в соединении.

*Кратерами* называют углубления в металле сварного шва, возникающие при обрыве дуги. Кратеры снижают прочность сварной конструкции, приводят к местной концентрации напряжений и могут привести к появлению трещин.

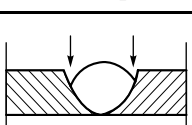
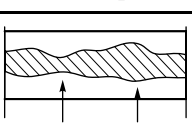
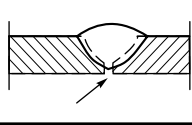
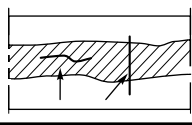
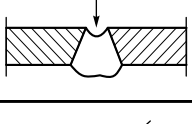
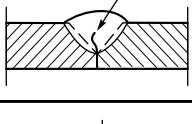
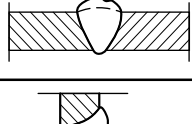
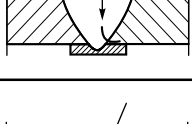
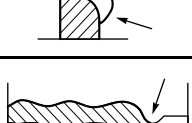
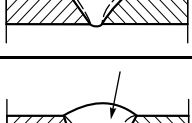
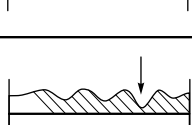
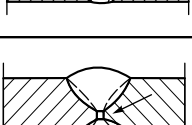


*Шлаковые включения* образуются вследствие того, что в шве остаются шлаки, не успевшие всплыть на поверхность металла шва. Шлаковые включения могут быть одиночными, а также образовывать цепочки или скопления.

*Оксидные включения* возникают в металле шва из-за их слабой растворимости или вследствие слишком быстрого охлаждения шва. Такие дефекты характерны для сварки алюминиево-магниевых и титановых сплавов. Оксидные включения ослабляют рабочее сечение шва и являются зонами повышенной концентрации напряжений, что приводит к снижению несущей способности конструкции.

*Пористостью* называют полости в сварном шве, заполненные газами. Она возникает в жидком металле шва вследствие интенсивного газообразования, когда не все газовые пузырьки успева-

Таблица 2.1

**Дефекты сварных соединений**

Эскиз дефекта	Характер дефекта	Эскиз дефекта	Характер дефекта
	Подрезы		Неравномерная ширина шва
	Непровар в корне шва		Наружные продольная и поперечная трещины
	Утяжка		Трещина, развившаяся от стянутого непровара
	Чрезмерное усиление шва		Трещина в шве на остающейся подкладке
	Наплыв		Поры
	Незаплавленный кратер		Шлаковые включения
	Западание между валиками		Непровар между слоями

ют выйти наружу до затвердевания металла шва. Поры могут быть одиночными, а также образовывать цепочки или скопления. Чрезмерная пористость может снизить механические характеристики сварного соединения.

При слишком большой погонной энергии при сварке могут возникнуть *перегрев* и *пережог* металла, что существенно ухудшает механические характеристики сварного соединения.

Наиболее опасными дефектами сварных соединений являются *трещины*. Они могут возникать как в металле шва, так и в околошовной зоне. Причиной появления трещин чаще всего является несоблюдение технологии и режимов сварки. Появление трещин может привести к быстрому разрушению конструкции, особенно при динамических нагрузках.

Основные виды дефектов вышеперечисленных сварных соединений показаны в табл. 2.1.

Влияние дефектов на работоспособность конструкции зависит от их формы и расположения по отношению к направлению действующих нагрузок. Более опасными считают дефекты вытянутой формы, менее опасными — дефекты округлой формы. Изделия с порами или шлаковыми включениями в ряде случаев допускают к эксплуатации без исправлений, особенно если конструкция выполнена из материала с высокой пластичностью и работает при статических нагрузках.

## 2.2. Чувствительность методов контроля

Основной характеристикой любого метода контроля является его *чувствительность*, определяющая способность метода выявлять дефекты минимальных размеров, которую оценивают абсолютными или относительными (по отношению к толщине контролируемого материала) размерами выявляемых дефектов.

Чувствительность контроля зависит от вида дефекта, его размеров, ориентации и местоположения в изделии.

При контроле изделий в машиностроительном производстве методы контроля выбирают исходя из способов изготовления изделий, а также видов и размеров дефектов, подлежащих выявлению. Неразрушающим испытаниям всегда предшествует внешний осмотр контролируемых изделий (визуально-оптический контроль) на отсутствие недопустимых наружных дефектов. Ни один из известных методов контроля не является универсальным и не может в полной мере удовлетворять требованиям практики.

В табл. 2.2 приведены характеристики выявляемости дефектов металлических машиностроительных изделий различными видами неразрушающего контроля (НК) по пятибалльной системе (высший балл 5).

**Оценка выявляемости дефектов изделий различными видами  
неразрушающего контроля (в баллах 0—5)**

Вид дефекта	Вид неразрушающего контроля					
	Визуальный	Радиационный	Магнитный	Капиллярный	Вихретоковый	Акустический
Включения неметаллические и шлаковые	0	4	0	0	2	4
Газовая пористость	0	4	2	2	4	3
Волосовины	0	0	5	0	3	0
Закаты	2	0	0	2	3	3
Вмятины	4	0	0	0	2	0
Заковы	2	0	2	2	3	3
Заливины	4	0	0	0	2	0
Коррозия атмосферная и межкристаллитная	3	0	0	3	4	4
Ликвация	0	2	0	0	0	0
Непровар	0	3	3	0	0	4
Непроклей	0	0	0	0	0	4
Непропай	0	3	0	0	0	4
Несоответствие толщины закаленного слоя	0	0	4	0	4	4
Несоответствие толщины слоя после химико-термической обработки	0	0	3	0	4	3
Несоответствие толщины слоя покрытия	0	0	4	0	4	0
Оксидные пленки	0	0	0	2	2	3
Перегрев, перегрев металла	0	0	3	0	3	3

Важную роль при выборе методов играют технические условия (правила контроля) на отбраковку изготавливаемых деталей. При равной чувствительности предпочтение отдают тому методу, который проще, доступнее, имеет более высокую производительность и достоверность результатов контроля. Обычно методы дефектоскопии конкретных изделий предусмотрены соответствующими отраслевыми или внутризаводскими техническими условиями, ОСТами и ГОСТами.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое чувствительность метода контроля?
2. Чем следует руководствоваться при выборе метода контроля?
3. Каковы основные виды дефектов сварных соединений?
4. Дефекты какого вида лучше всего выявляются при ультразвуковом контроле?
5. Дефекты какого вида лучше всего выявляются при магнитопорошковым контроле?
6. Дефекты какого вида лучше всего выявляются при радиационном контроле?

## Глава 3

## ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

## 3.1. Классификация и физические основы радиационного контроля

Радиационный контроль является методом определения качества материалов, изделий и сварных соединений с использованием ионизирующих излучений. Система контроля (рис. 3.1) включает в себя источник ионизирующих излучений  $I$ , объект контроля  $2$  и регистрирующее устройство (детектор)  $3$ .

Ионизирующим называют излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию в этом веществе ионов различного знака. Различают фотонное и корпускулярное ионизирующие излучения.

Фотонное ионизирующее излучение является электромагнитным, а корпускулярное излучение представляет собой излучение частиц с массой, отличной от нуля (электронов, протонов, нейтронов и др.).

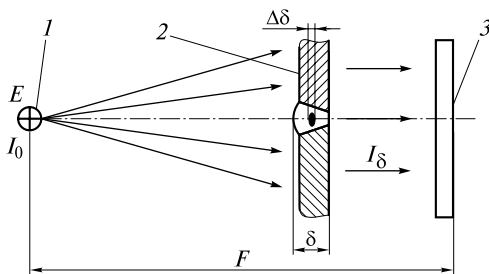


Рис. 3.1. Структурные элементы радиационного контроля:

$I$  — источник излучения;  $2$  — объект контроля (сварное соединение);  $3$  — детектор излучения;  $E$  — энергия излучения;  $\delta$  — толщина материала;  $I_0$ ,  $I_\delta$  — интенсивность падающего и прошедшего излучений соответственно;  $\Delta\delta$  — характеристический размер дефекта;  $F$  — фокусное расстояние

При прохождении через вещество ионизирующего излучения происходит его ослабление (поглощение и рассеяние). Степень ослабления зависит от толщины  $\delta$  и плотности  $\rho$  контролируемого материала, а также энергии  $E$  и интенсивности излучения  $I$ .

Интенсивностью излучения  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>, называют отношение потока энергии квантов ионизирующего излучения за некоторый промежуток излучения к этому времени. Интенсивность излучения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника излучения.

Наличие в материале изделия внутренних несплошностей размером  $\Delta\delta$ , отличающихся по плотности от основного материала, приводит к резкому изменению значений  $E$  и  $I_0$  пучка излучения, что регистрируют детекторами ионизирующих излучений.

Размер минимального выявляемого при контроле внутреннего дефекта определяет чувствительность контроля  $W_{\text{abc}} = \Delta\delta_{\text{min}}$ . Часто чувствительность оценивают по отношению размера минимального выявляемого дефекта к толщине материала в виде  $W_{\text{отн}} = \Delta\delta_{\text{min}}/\delta$ . Такую чувствительность указывают в процентах.

Основным свойством ионизирующего излучения, определяющим его пригодность для контроля, является достаточная проникающая способность, определяемая энергией излучения  $E$ .

Детекторы ионизирующих излучений оценивают интенсивность  $I_\delta$  излучения, прошедшего через контролируемый материал. Методы радиационного контроля классифицируют в зависимости от вида детектора ионизирующих излучений.

Различают следующие методы радиационного контроля: радиографию, радиоскопию и радиометрию.

При *радиографии* изображение контролируемого объекта фиксируют на фоточувствительных детекторах (рентгеновских пленках). Количественным показателем детектора является плотность почернения пленки. При контроле получают «статическое» изображение внутренней структуры объекта контроля. Метод позволяет контролировать изделия различной формы и любых размеров с чувствительностью до 2%. Радиографию применяют в полевых, монтажных, стапельных и лабораторных условиях.

При *радиоскопии* детекторами изображение контролируемого объекта наблюдают на видеоконтрольных устройствах (экранах), количественным показателем детектора является яркость свечения экрана. Радиоскопия позволяет получать видимое «динамическое» изображение внутренней структуры объекта контроля. Метод позволяет контролировать изделия из сталей толщиной до 20 мм или легких сплавов толщиной до 50 мм. Чувствительность радиоскопии составляет 2... 4%. Метод позволяет вести непрерывный контроль с рассмотрением изделия под разными углами. Анализ результатов выполняют в процессе контроля.