

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

9.1 Общие сведения

Качество изделий определяется множеством физико-механических, химических, геометрических, функциональных и структурных параметров материалов, из которых сделаны изделия, а также соответствием технологических приемов (соблюдением геометрических размеров, чистотой обработки поверхности, тепловой обработкой, цементированием, поверхностными покрытиями и др.) требованиям технической документации.

Для определения параметров и характеристик материалов и изделий применяются методы и средства неразрушающего контроля (НК), при которых изделия остаются пригодными для использования по назначению. Существующие средства НК предназначены для решения следующих задач: выявления дефектов типа нарушения сплошности и однородности материалов и изделий; оценки структуры материалов; контроля геометрических параметров изделий; оценки физико-химических свойств материалов и определения их характеристик после проведения технологических операций.

Дефекты материалов и изделий могут быть производственно-технологического и эксплуатационного происхождения. К производственно-технологическим дефектам относятся: трещины, раковины, пористости, шлаковые включения, включения других материалов, спаи, рванины, закаты, волосовины, внутренние разрывы, непровары (при сварке), непропаи, закалочные и шлифовочные трещины и др.

При эксплуатации изделий и машин возникают следующие дефекты: трещины усталости и ползучести, трещины-надрывы, коррозионные и механические повреждения.

Дефекты могут быть поверхностными, подповерхностными (на глубине до 1 мм) и внутренними (на глубине более 1 мм).

Дефекты разделяются (ГОСТ 15467—79) на допустимые и недопустимые. Недопустимые дефекты подлежат устранению и исправлению. Для всех дефектов, независимо от причин, их вызвавших, характерен один общий признак: они вызывают изменение физических характеристик материалов, таких как удельная электрическая проводимость, магнитная проницаемость, коэффициент затухания упругих колебаний, плотность, коэффициент ослабления электромагнитных излучений и др.

Учеными сделана попытка количественной оценки дефектов типа k и вида i введением характеристического размера S_{ki} . Это может быть отношение глубины дефекта к толщине изделия или площади дефекта и т.д. Появление дефектов случайно.

Методы НК в соответствии с ГОСТ 18353—79 подразделяются на акустические, капиллярные, магнитные, оптические, радиационные, радиоволновые, тепловые, электромагнитные (методы вихревых токов) и др.

При выявлении поверхностных дефектов применимы все методы, но наиболее приемлемыми оказываются магнитные и капиллярные. Подповерхностные дефекты эффективно обнаруживаются ультразвуковым, токовихревым и магнитным методами, а внутренние дефекты — только ультразвуковым, радиоволновым и радиационным (ионизирующие излучения).

Неразрушающий контроль — процесс измерения, но при этом измеряются не отдельные величины, а пространственно-материальные, физико-химические и структурные образы. В настоящее время еще не разработаны достаточно полные количественные оценки указанных образов, нет шкал, по которым можно оценивать степень отклонения от нормы (эталона). Если говорить о структурных свойствах материалов и изделий, то в качестве эталонов следует выбирать материалы и изделия, в которых отсутствуют несплошности, имеет место однородность структуры, выдерживается необходимый физико-химический состав и молекулярная структура (аморфное или кристаллическое состояние). Отличия указанных характеристик реальных материалов и изделий от эталонных следует трактовать как обобщенные погрешности. К сожалению, количественные характеристики этих погрешностей отсутствуют.

Основными характеристиками методов НК являются чувствительность (разрешающая способность), достоверность результатов контроля, надежность и простота. Приборы НК строятся по агрегатному принципу и составляют агрегатный комплекс средств неразрушающего контроля (АСНК).

АСНК представляет собой набор совместимых и взаимозаменяемых блоков различного назначения с унифицированными связями и нормированными сигналами, которые позволяют комплектовать автономные приборы, системы и комплексы для неразрушающего контроля материалов и изделий.

По физическим принципам АСНК подразделяются на подкомплексы оптического, магнитного, акустического, электромагнитного и др. контроля. АСНК входит в Государственную систему промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП).

АСНК строится на следующих принципах: деление входящих в комплекс блоков и устройств на классы по выполняемым функциям и параметрам; разработка рациональных нормализованных функционально-параметрических рядов изделий АСНК; использование единой конструкторско-технологической базы, определяемой государственными и отраслевыми стандартами; изделия АСНК должны удовлетворять требованиям конструкторской, технологической, информационной и метрологической совместимости.

Рассмотрим магнитные, токовихревые, радиоволновые, акустические и радиационные методы и средства неразрушающего контроля материалов и изделий.

9.2 Магнитные методы и средства

Магнитные методы контроля основаны на измерении характеристик магнитных полей, возникающих в области дефектов, или на определении магнитных свойств контролируемых материалов и изделий, находящихся в намагниченном состоянии. Для намагничивания деталей применяют постоянный, переменный, однополупериодный выпрямленный и импульсный токи.

Для создания оптимальных условий контроля применяют следующие способы намагничивания: продольный (рисунок 60,а), циркулярный (рисунок 60,б) и комбинированный (рисунок 60,в). Выбор того или иного способа определяется формой и размерами деталей.

После окончания операций контроля детали размагничиваются, для чего создается переменное магнитное поле с амплитудой, равномерно уменьшающейся до нуля. Частоты переменного размагничивающего поля выбирают от долей герца до 50 Гц, при этом, чем больше магнитная проницаемость и толщина изделия, тем должна быть меньше частота.

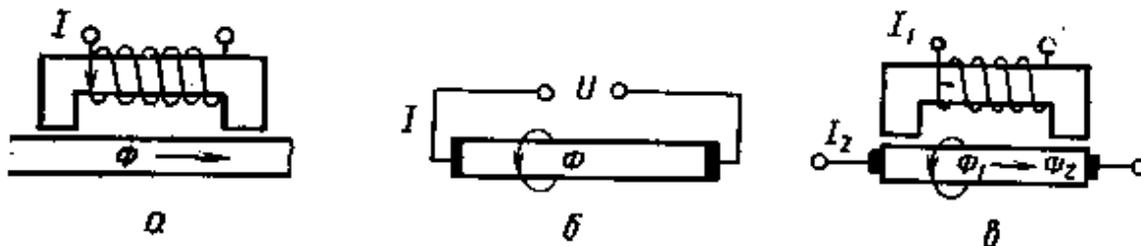


Рисунок 60 - Способы намагничивания деталей

Разновидностями магнитных методов являются: магнитопорошковый, магнитографический, феррорезонансный, с преобразователями Холла, индукционный и пондеромоторный. Магнитные методы применяются для: определения дефектов; измерения толщины немагнитных покрытий на ферромагнитных материалах, азотированных и цементированных слоев; определения качества термообработки, механических характеристик сталей, магнитной анизотропии.

В магнитных приборах для НК в качестве первичных преобразователей применяются: магнитные порошки; магнитные ленты; феррозонды; преобразователи Холла и магниторезисторы; индукционные преобразователи и пондеромоторные преобразователи.

Магнитные порошки изготавливаются из окислов железа (магнетита Fe_3O_4 и окиси железа Fe_2O_3 и др.). При контроле деталей с блестящей поверхностью применяют порошок магнетита черного цвета, а деталей с черной

поверхностью — кирпично-красного цвета или магнитно-люминесцентные порошки.

Магнитные ленты, применяемые в магнитографических приборах, бывают двухслойные и монолитные. Двухслойная лента состоит из слоя магнитного порошка и немагнитной основы — ацетилцеллюлозы, поливинилхлорида и др. Монолитные ленты на полиамидной основе содержат магнитный слой по всей толщине.

Преобразователь Холла основан на принципе возникновения ЭДС в результате искривления пути носителей тока в металлах и полупроводниках, находящихся в магнитном поле. Преобразователь состоит из полупроводниковой пластинки, пронизываемой магнитным потоком. К зажимам a, b подводится ток I , а с зажимов c, d снимается ЭДС e , причем

$$e = kBI/h,$$

где k — коэффициент Холла;

B — магнитная индукция;

I — сила тока;

h — толщина пластинки.

Рассмотрим более детально магнитные методы и средства НК.

9.3 Магнитопорошковые методы и средства

Магнитопорошковый метод, применяемый для контроля ферромагнитных материалов, основан на обнаружении магнитных полей рассеяния над дефектами с помощью ферромагнитных частиц. Магнитные силовые линии, встречая дефект (несплошность и др.), искривляются, выходя за пределы изделия. Ферромагнитные частицы порошка, находящиеся в жидкости (воде, керосине, минеральном масле) или в воздухе, располагаются вдоль силовых линий. По скоплению частиц порошка судят о наличии дефекта. Рассматриваемый метод позволяет выявлять трещины шириной до 0,001 мм при глубине до 0,01 мм.

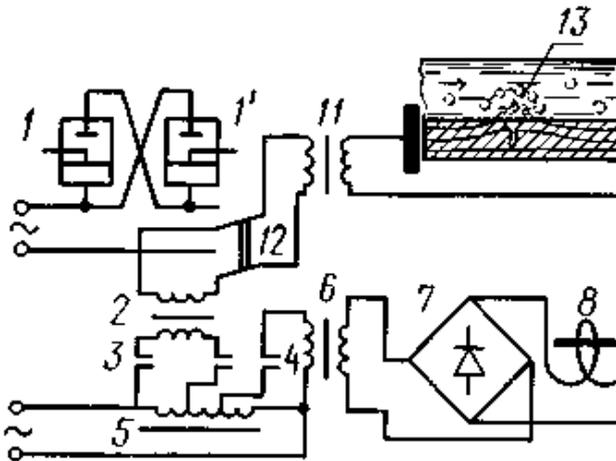
Для контроля крупногабаритных изделий применяется ряд приборов, реализующих магнитопорошковый метод, схема одного из которых приведена на рисунке 61. Прибор включает силовой понижающий трансформатор 11 , в первичной обмотке которого включены встречно-параллельно два игнитрона 1 и $1'$ предназначенные для регулирования намагничивающего тока при больших его значениях (до 2000 А). При малых токах игнитроны с помощью рубильника 12 отключаются, и регулирование тока намагничивания производится автотрансформатором 5 , включенным в первичную обмотку трансформатора 2 . Для питания передвижного соленоида 8 применен трансформатор 6 с двухполупериодным выпрямителем 7 . Контролируемые детали 9 и 10 помещаются в соленоид 8 или в зажимы 10 .

Размагничивание производят без снятия изделий с прибора (дефектоскопа) снижением до нуля переменного тока в намагничивающем контуре.

9.4 Магнитографические методы и средства

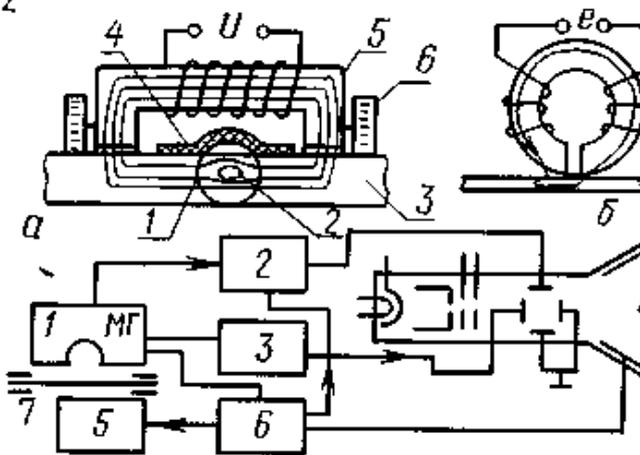
Магнитографический метод (схема 2, рисунок 61) основан на записи магнитных полей рассеяния над дефектом на магнитную ленту.

1



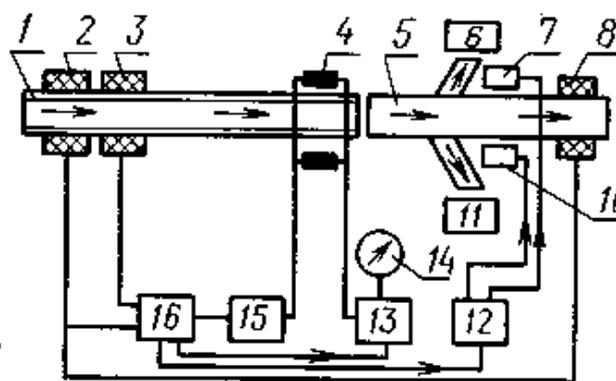
Магнитопорошковый дефектоскоп:
 1 и 1' - регулировочные игнитроны; 2 - трансформатор; 3 и 4 - контакты; 5 - звукотрансформатор; 6 - трансформатор; 7 - двухполупериодный выпрямитель; 8 - соленоид; 9 - проверяемая деталь в соленоиде; 10 - проверяемая деталь в зажимах; 11 - понижающий трансформатор; 12 - рубильник; 13 - дефект

2



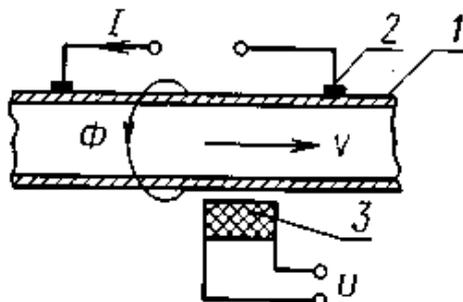
Магнитографический дефектоскоп:
 а: 1 - сварной шов; 2 - дефект; 3 - изделие; 4 - магнитная лента; 5 - электромагнит; 6 - ролики;
 б: 1 - полукольца магнитной головки; 2 - катушки; 3 - лента;
 в: 1 - лентопротяжный механизм; 2 - усилитель; 3 - генератор развертки; 4 - электронно-лучевая трубка; 5 - стирающее устройство; 6 - блок питания; 7 - маг. лента; МГ - магнитная головка

3



Магнитный феррозондовый дефектоскоп:
 1 - транспортер; 2 - размагничивающая катушка; 3 - намагничивающая катушка; 4 - феррозонд; 5 - канал; 6, 9 и 11 - сборники; 7 и 10 - исполнительные механизмы; 12 - логическое устройство; 13 - измерительное устройство; 14 - индикатор; 15 - генератор; 16 - блок питания

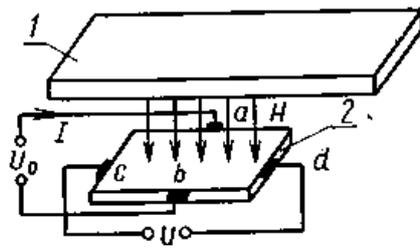
4



Магнитный индукционный дефектоскоп:
 1 - движущаяся труба; 2 - подвод тока для циркулярного намагничивания; 3 - индукционная катушка; Φ - магнитный поток; v - скорость движения трубы; U - напряжение на зажимах катушки

Рисунок 61 - Схемы магнитных методов

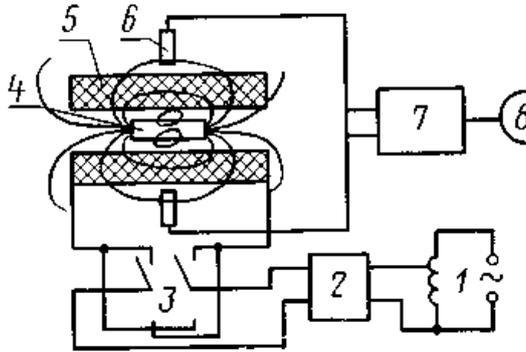
5



Магнитный дефектоскоп с преобразователем Холла:

1 — исследуемое изделие; 2 - преобразователь Холла; H — вектор напряжённости магнитного поля; I — сила тока; U - выходной сигнал, причем $U = kIH/d$, где k — постоянная Холла; d — толщина пластинки

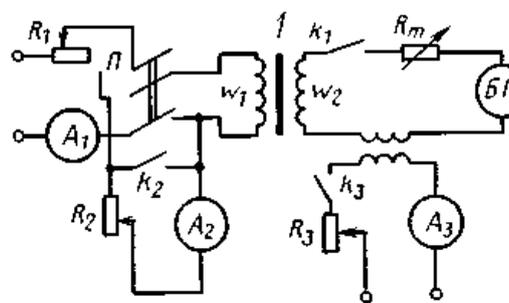
6



Коэрцитиметр:

1 — автотрансформатор; 2 — выпрямитель с фильтром; 3 — переключатель; 4 — контролируемое изделие; 5 — намагничивающая катушка; 6 — преобразователь напряженности поля (например, преобразователь Холла); 7 —

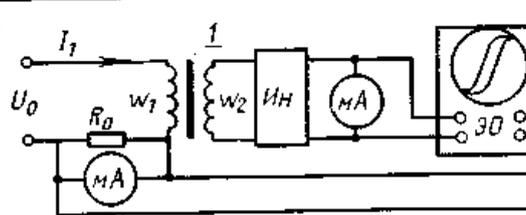
7



Баллистический измеритель напряженности:

1 — контролируемое изделие; R , R_2 , R_3 — реостаты для регулирования тока намагничивания, размагничивания и градуировки; A_1 , A_2 , A_3 — амперметры; k_j , k_3 — ключи; Π — переключатель; w_1 и w_2 — обмотки намагничивающая и измерительная; БГ — баллистический гальванометр

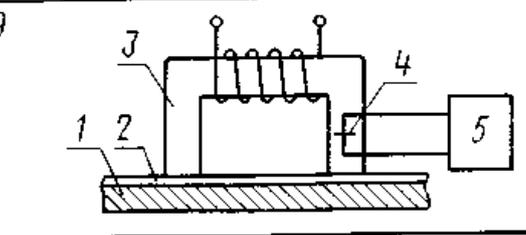
8



Феррограф:

1 — контролируемое изделие; R_0 — образцовое сопротивление; I_n — интегратор; мА - миллиамперметр; ЭО — электронный осциллограф; w_1 и w_2 — намагничивающая и измерительная обмотки

9



Толщиномер:

1 — ферромагнитное изделие; 2 — немагнитное покрытие; 3 — электромагнит; 4 — преобразователь Холла; 5 — измерительный прибор

Продолжение рисунка 61 – Схемы магнитных методов

Для этого намагничивают контролируемый участок изделия и накладывают на него прижатую ленту (схема 2, а, поз. 4), перемещая ее по контролируемой детали вместе с электромагнитом 5 на роликах 6. В этом методе первичным преобразователем является магнитная лента. Метод находит широкое применение при контроле сварных швов.

Принцип работы прибора, реализующего магнитографический метод, состоит в следующем. Размагниченную ленту 4 укладывают с небольшим натягом на контролируемый сварной шов (схема 2, а). Перемещая

электромагнит 5 вместе с лентой 4 вдоль шва, производят намагничивание изделия, что фиксируется на ленте. В местах дефекта производится дополнительное подмагничивание ленты выступающими за пределы дефекта магнитными линиями.

Для воспроизведения и расшифровки полученной записи на ленте служит магнитная головка (схема 2, б) и система воспроизведения (схема 2, в).

Магнитная головка состоит из двух полуколец 1, набранных из листовой стали, на которые наложены две идентичные катушки 2. В системе воспроизведения головка перемещается относительно ленты или наоборот. По ЭДС на зажимах катушек головки судят о характере дефектов.

Система воспроизведения включает: электронно-лучевую трубку 4, на экране которой наблюдают показание, пропорциональное ЗДС e , и характеризующее дефекты; лентопотяжный механизм 1; усилитель 2; генератор развертки 3; стирающее устройство 5 и блок питания 6.

Магнитографический метод находит широкое применение в поточном производстве изделий (трубопроводов, конструкций машин и сооружений, изготовленных из стали толщиной до 18* мм), изготовленных сваркой.

9.5 Феррозондовые методы и средства

Феррозондовый метод (схема 3, рисунок б1) основан на использовании феррозонда в качестве первичного преобразователя сигнала напряженности или градиента магнитного поля в электрический сигнал.

Представленная на схеме 3 феррозондовая установка, реализующая феррозондовый метод, является примером автоматической системы для контроля качества термообработки стальных и чугунных деталей. Принцип работы системы заключается в следующем. Контролируемая деталь, транспортируемая лентой 1, размагничивается в катушке 2, что необходимо для подготовки детали к контролю. В катушке 3 деталь намагничивается в нужном для контроля направлении и поступает в индикаторный узел феррозондов 4. Блок 16 служит для питания катушек 2 и 3 привода транспортера. Обмотки возбуждения феррозонда питаются от генератора синусоидального напряжения 15. Выходной сигнал феррозондов, пропорциональный напряженности магнитного поля детали (следовательно, ее твердости), усиливается в измерительном устройстве 13 и поступает в индикатор 14 и логическое устройство 12. В логическом устройстве, в зависимости от сигнала с феррозондов вырабатываются команды на исполнительные механизмы 7 и 10, открывающие один из каналов в сборники 6, 9 или 11, и деталь через канал 5 соответственно направляется в сборник годных деталей 9, мягких 11 или твердых 6. Годные детали размагничиваются в катушке 8.

Феррозондовые дефектоскопы часто применяются для контроля качества труб при циркулярном намагничивании трубы при ее поступательном движении со скоростью до 3 м/с. В приборах для контроля труб система феррозондовых преобразователей обычно вращается вокруг трубы. Снятые с

феррозондов сигналы регистрируются, а также подаются в автоматическую систему разбраковки труб на годные и негодные. Обмотки возбуждения феррозондов питаются синусоидальным напряжением частоты от 20 до 100 кГц.

9.6 Индукционные методы и средства

Индукционный метод (схема 4, рисунок б1) основан на наведении ЭДС в катушке 3, мимо которой движется контролируемое изделие 1 (например, труба).

Циркулярное намагничивание изделия производится путем подвода тока 2. В этом методе первичным преобразователем является индукционная катушка. Индукционные дефектоскопы обычно содержат ряд первичных преобразователей, совершающих вращение вокруг контролируемой трубы. Поскольку труба движется со скоростью, то осуществляется тем самым сканирование наружной поверхности контролируемого участка по винтовой линии. Для бесконтактной передачи информации низкочастотный сигнал первичного индукционного преобразователя модулируют напряжением высокой частоты.

При контроле сварных труб применяются дефектоскопы с бесконтактной поперечной вращающейся вокруг трубы системой намагничивания. Эта система вращается совместно с индукционными преобразователями. В целях устранения помех от вибрации контролируемых изделий индукционные преобразователи обычно соединяются в две подгруппы последовательно, согласно, а подгруппы, в свою очередь, соединяются встречно. При таком соединении также повышается чувствительность прибора.

Полезные сигналы, несущие информацию о дефектах, в зависимости от характера дефектов и скорости движения изделий, лежат в области 3—3,5 кГц. На эти сигналы накладываются помехи, частоты которых лежат ниже и выше частот полезных сигналов, а иногда спектры частот и полезных сигналов перекрываются. В целях уменьшения помех применяют фильтрацию сигналов, выбирая фильтр с частотой среза, равной средней частоте диапазона полезных сигналов $f_c = 3,2$ кГц.

9.7 Методы и средства контроля магнитных, физико-механических и химико-термических характеристик материалов и толщины покрытий

Основными магнитными характеристиками материалов в магнитных полях являются: магнитная индукция B напряженность магнитного поля H , петля гистерезиса $B(H)$, магнитная проницаемость μ , коэрцитивная сила H_c и др. Магнитные характеристики связаны с физико-механическими, химико-термическими и структурными характеристиками материалов. Так, например, форма и размеры петли гистерезиса зависят от химического состава, кристаллографической анизотропии, наличия и расположения примесей и легирующих элементов, микро- и макронапряжений,

неоднородностей, дислокаций, размера зерен и др. Сложный характер зависимости магнитных характеристик от физико-химических свойств материалов затрудняет использование ее для создания первичных преобразователей. Однако в ряде случаев удастся использовать указанные связи, удерживая некоторые параметры постоянными. Так, например, известна связь между твердостью углеродистых низколегированных сталей, содержанием углерода, температурой закалки и отжига и их коэрцитивной силой. На рисунке 62 приведены зависимости: а — H_c от σ , содержания С и θ ; б — σ и содержания С от H_c . Пользуясь подобными связями, можно построить прибор, называемый коэрцитиметром. Приборы подобного вида применяются для измерения твердости и других параметров материалов.

На схеме 6 рисунка 61 показан коэрцитиметр, применяемый в процессе производства для определения коэрцитивной силы, а следовательно, твердости. Исследуемый образец 4 помещается внутри катушки 5. В процессе измерения намагничивающий ток увеличивают до максимального значения, а затем уменьшают до нуля. Намагниченное до насыщения изделие 4 после включения тока начинает размагничиваться до остаточной магнитной индукции.

Затем переключателем 3 изменяют направление тока в намагничивающей катушке и увеличивают его до момента полной компенсации рассеянного поля изделия магнитным полем тока в катушке. Ток в катушке, при котором происходит полная компенсация рассеянного поля изделия, является мерой коэрцитивной силы. В качестве чувствительных элементов в коэрцитиметрах применяются преобразователи Холла, магниторезисторы и феррозонды.

Нулевой сигнал коэрцитиметра соответствует измеряемой коэрцитивной силе.

При нормальной температуре железо растворяет до 0,006 % углерода. При большем содержании углерода сплав Fe — С состоит из феррита и цементита Fe_3C . Внедрение углерода в кристаллическую решетку железа приводит к появлению сильных внутренних напряжений, росту коэрцитивной силы и уменьшению магнитной проницаемости.

Магнитные свойства сталей тесно связаны с режимами термической обработки. На рисунке 62 приведены зависимости коэрцитивной силы и твердости от температуры закалки и температуры отжига. Очевидно, что измерители коэрцитивной силы можно использовать для контроля режимов термической обработки.

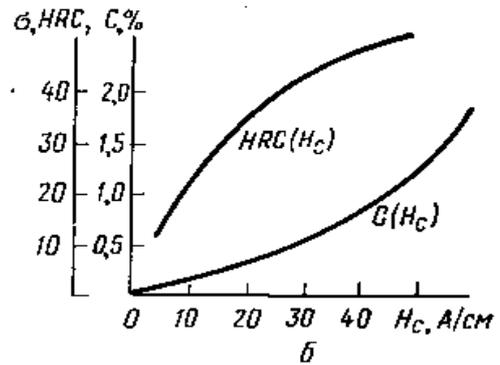
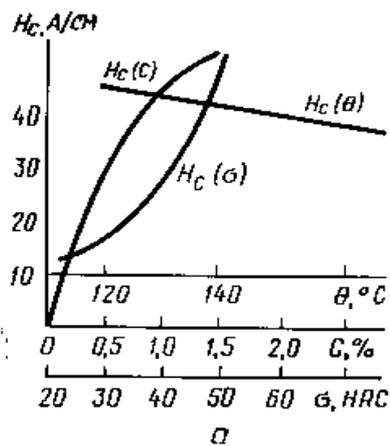


Рисунок 62 - Зависимость коэрцитивной силы от твердости, содержания углерода и температуры отжига (а) и зависимость твердости и содержания углерода от коэрцитивной силы (б)

Магнитные методы позволяют контролировать глубину закаленного и цементированного слоев углеродистых сталей. При этом наряду с коэрцитиметрами применяются измерители напряженности магнитного поля, магнитной проницаемости, магнитного насыщения, петли гистерезиса и др.

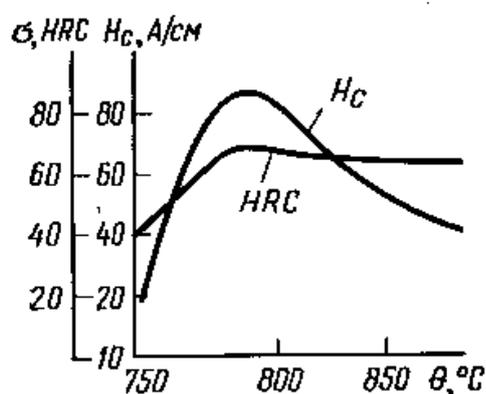


Рисунок 63 - Зависимость коэрцитивной силы и твердости от температуры закалки

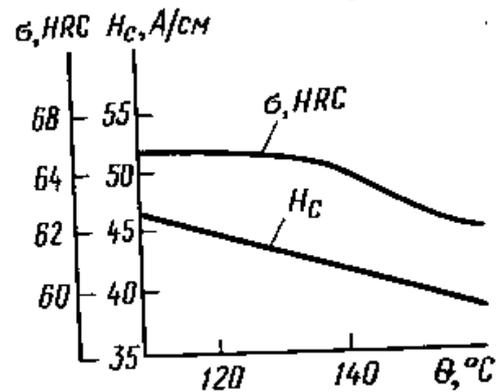


Рисунок 64 - Зависимость коэрцитивной силы и твердости от температуры отжига

Для измерения напряженности постоянного магнитного поля применяется баллистический прибор (схема 7, рисунок 61). В процессе измерения ключ k_2 замкнут, а ключ k_3 разомкнут. По амперметру A с помощью реостата Ri устанавливают силу тока в намагничивающей обмотке, необходимую для получения первого значения намагничивающего поля. После этого с помощью переключателя производят коммутацию тока (10—15 раз) с целью стабилизации магнитного состояния образца 1. Затем замыкают ключ, включая измерительную обмотку.

После определения первой точки кривой $Bi(Hi)$ отключают измеритель ключом k и с помощью реостата Ri по амперметру A устанавливают второе значение тока, соответствующее напряженности поля, производя

коммутирование, определяют отклонение стрелки прибора и вычисляют B_2 . Подобным же образом определяют все точки функции $B(H)$.

Характеристику $B(H)$ можно получить непосредственно с помощью приборов, называемых *феррометрами* (схема 8, рисунок 61). Прибор обычно включает электронный осциллограф ЭО, интегратор Ин, образцовое сопротивление R_0 , миллиамперметр mA , намагничивающую w_i и измерительную w_z обмотки.

На вход горизонтальных пластин осциллографа подается сигнал с образцового сопротивления, по которому протекает ток намагничивания, пропорциональный напряженности поля H .

Сигнал в измерительной обмотке как вторичной обмотке трансформатора пропорционален производной магнитной индукции в образце B по времени, т.е. — dB/dt . Если этот сигнал подать на интегратор, то на его выходе получим магнитную индукцию B . После этого сигнал поступает на вертикальные пластины осциллографа. В результате на экране осциллографа появляется петля гистерезиса $B(H)$.

По найденной характеристике $B(H)$ можно определить магнитную проницаемость, коэрцитивную силу и другие магнитные параметры исследуемого образца, а по ним находят физико-механические, структурные и термические характеристики.

Для измерения толщины покрытий на ферромагнитных изделиях применяют приборы двух видов: пондемоторные и магнитостатические.

Пондемоторные магнитные приборы основаны на измерении силы отрыва или притяжения постоянных магнитов или электромагнитов к контролируемому изделию. Эта сила пропорциональна квадрату индукции в зазоре между ферромагнитным изделием и намагниченным телом. Очевидно, что сила притяжения будет зависеть от толщины покрытия.

Магнитостатические приборы основаны на принципе определения вариации напряженности магнитного поля (с помощью преобразователя Холла, магниторезистора и др.) в цепи электромагнита при изменении расстояния между ним и ферромагнитным изделием из-за наличия немагнитного покрытия.

На схеме 9 рисунка 61 показан магнитостатический толщиномер с преобразователем Холла 4. Прибор включает электромагнит (или постоянный магнит) 3 и измерительный прибор 5. Электромагнит своими полюсами устанавливается на немагнитное покрытие 2, нанесенное на ферромагнитное изделие 1. Изменение магнитного потока, вызванное вариациями толщины покрытия, измеряется преобразователем Холла.

9.8 Токовихревые методы и средства

Токовихревые методы (ТВМ) НК основаны на зависимости амплитуды, фазы, траекторий, переходных характеристик и спектра частот вихревых токов, возбуждаемых в проводящих изделиях, от их формы и размеров, физико-механических свойств и сплошности материала, расстояний до

преобразователей частоты и скорости перемещений. ТВМ применяются для: оценки размеров и вида несплошностей; измерения физико-механических характеристик материалов; измерения размеров деталей и покрытий; измерения параметров вибраций и перемещений.

9.9 Радиоволновые методы и средства

Радиоволновой метод основан на зависимости прошедшего или отраженного радиоизлучения от параметров и характеристик диэлектрических материалов (пластмасс, резины, стеклопластиков, термоизоляционных материалов, бумаги, фанеры, зерна, песка и др.).

В радиоволновом методе используется диапазон длин волн $1 — 1000$ мм, называемый диапазоном сверхвысоких частот (СВЧ).

Электромагнитная волна представляет собой совокупность электрического E и магнитного H полей, распространяющихся в определенном направлении z . В свободном пространстве электромагнитные волны поперечны, т.е. векторы E и H перпендикулярны направлению распространения.

При радиоволновом контроле диэлектрических материалов в качестве характеристик последних используют диэлектрическую постоянную ϵ и тангенс угла потерь $tg \alpha$; при контроле полупроводниковых материалов необходимо учитывать диэлектрическую постоянную ϵ и магнитную проницаемость μ , а при контроле электропроводных материалов — электропроводность σ .

Приборы радиоволнового контроля можно разделить на фазовые, амплитудно-фазовые, поляризационные, резонансные, спектральные, частотные, лучевые и преобразовательные. Все эти приборы основаны на использовании явлений отражения, прохождения, поглощения, преломления, поляризации и преобразования радиоволнового излучения.

Принципы построения радиоволновых приборов НК. При прохождении сигнала через контролируемую среду, последняя оказывает влияние на его характеристики. Для измерения степени влияния среды на сигнал применяются амплитудно-фазовые приборы (рисунок 65). Прибор подобного типа содержит излучающую 4 и приемную антенны 6 , источник СВЧ 1 , вентиль 2 , аттенюаторы 3 и 7 , детектор 8 и блок обработки и выдачи информации 9 . Если P_0 — мощность, излучаемая антенной 4 , то после прохождения сигнала через объект контроля 5 , мощность меняется.

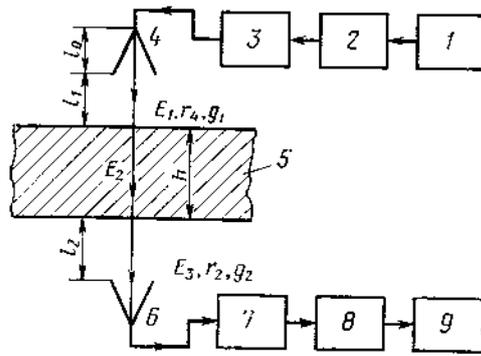


Рисунок 65 - Схема амплитудно-фазового радиоволнового прибора

При заданной мощности P_0 можно определить толщину контролируемого объекта или физические параметры. Для исключения переотражений необходимо согласовать границы раздела с приемной и излучающей антеннами.

Радиоволновые приборы могут быть построены на принципе приема отраженного от дефекта сигнала (рисунок 66). Принцип работы подобных приборов состоит в следующем. Сигналы СВЧ клистронного генератора 1 через вентиль 2 и узел разделения 3 подаются на излучающую антенну 4. Отраженный от объекта 6 (главным образом от несплошности) сигнал поступает в антенну 5, детектируется в элементе 7 и индуцируется в системе 8.

Особенностью приборов, основанных на приеме отраженных сигналов, является наличие связи E_1 между излучающей и приемной антеннами. Эта связь реализуется за счет части излучения антенны 4 и является опорным сигналом, с которым суммируются отраженные сигналы.

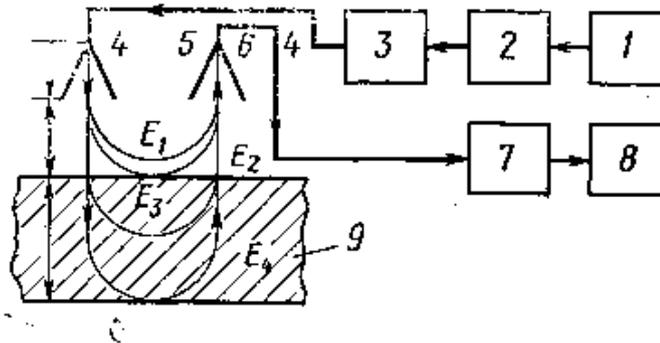


Рисунок 66 - Схема амплитудно-фазового прибора

Совокупность всех компонентов сигнала, принимаемого антенной 5, носит интерференционный характер, зависящий от соотношения между амплитудой и фазой отраженного сигнала и сигнала связи. Вид интерференционной картины зависит от отраженного сигнала, несущего информацию о внутренней структуре контролируемого объекта.

Радиоволновые поляризационные приборы основаны на зависимости поляризации электромагнитной волны, т.е. ориентации вектора E в пространстве по мере распространения ее в контролируемой среде. По виду поляризации (плоская, круговая, эллиптическая) можно судить о внутренней

структуре материала. Обычно прибор настраивают так, что при отсутствии внутренних дефектов в объекте сигнал в приемной антенне равен нулю. При наличии дефекта или структурной неоднородности меняется плоскость или вид поляризации излученного сигнала и в приемной антенне появляется сигнал, несущий информацию о дефекте.

В радиоволновых *резонансных приборах* состояние контролируемого объекта определяется по воздействию среды на добротность, смещение резонансной частоты или на распределение поля в резонаторе. Обычно резонатор 1 цилиндрической формы диаметра D возбуждается на волне типа H_{01} (рисунок 67). Испытуемый образец 2 диаметра d помещается внутри резонатора.

Для миллиметрового диапазона волн электромагнитное излучение можно трактовать на основе геометрической оптики. В схеме на прохождение луча по известным (измеренным) значениям толщины h и размера можно определить угол преломления β , и, следовательно, составить представление о параметрах и структуре контролируемого объекта. В схеме на отражение (рисунок 68) также получается необходимая информация для определения характеристик исследуемого объекта.

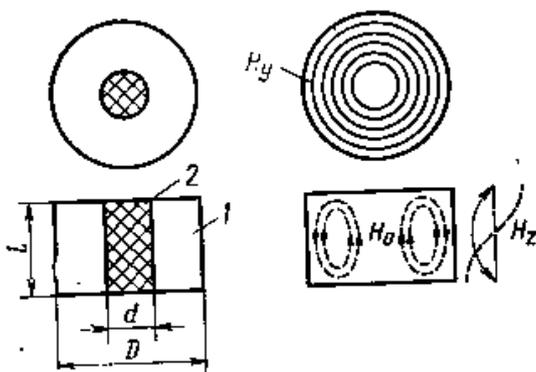


Рисунок 67- Схема цилиндрического резонатора

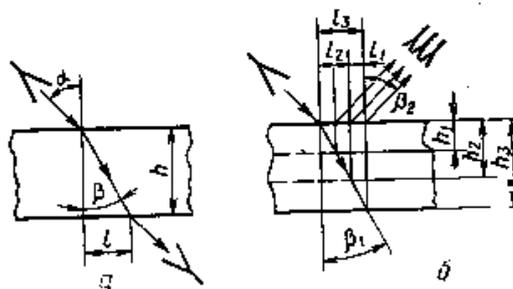


Рисунок 68 - Схема работы лучевых приборов

Поскольку миллиметровые волны подчиняются законам геометрической оптики, то их можно использовать для построения радиоизображений внутренних дефектов. Для этого применяют радиолинзы и коллиматоры подобно оптическим устройствам.

Радиоволновые толщиномеры. Радиоволновые методы позволяют контролировать толщину диэлектрических материалов, слоев диэлектриков на металле и металлических листах. Информация о толщине может содержаться в амплитуде, фазе, смещении резонансной кривой и т. д. Наиболее важными параметрами объекта, влияющими на прошедший или отраженный сигнал, являются толщина и диэлектрическая проницаемость материала. Чем однороднее материал, тем точнее измеряется толщина.

Коэффициенты отражения R и прохождения M радиоволны для плоского однородного слоя при нормальном падении представляют собой осциллирующие функции, убывающие при возрастании толщины h и

отношения h/λ , где λ — длина волны. Период этих функций определяется длиной волны и показателем преломления, а степень убывания — коэффициентом затухания волны.

В качестве примера рассмотрим *толщиномер для измерения толщины прокатываемого металлического листа* (рисунок 69).

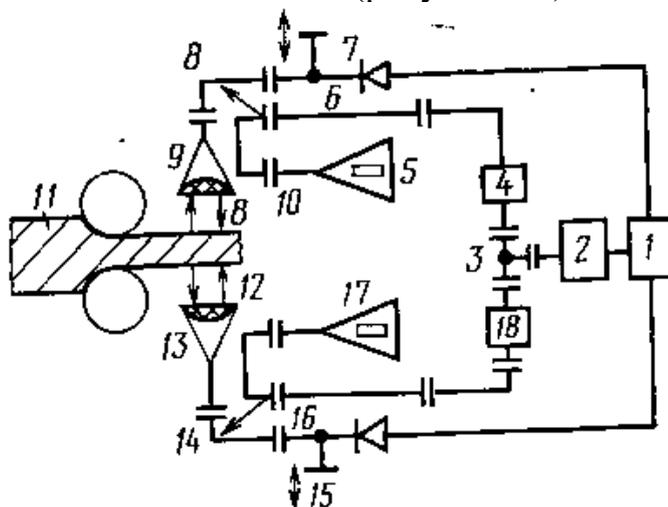


Рисунок 69 - Схема резонансно-фазового прибора

В приборах этого назначения имеет место зеркальное отражение электромагнитной волны от поверхности контролируемого объекта, при этом на самой поверхности устанавливается пучность тока и узел напряжения. При изменении толщины объекта меняется пространственная картина поля, что отмечается прибором.

Толщиномер включает следующие элементы (рисунок 69): клистрон-генератор СВЧ сигналов 2, тройник 3, вентили 4 и 18, направленные ответвления 8 и 14, согласующие нагрузки 5 и 17, детекторные секции 6 и 15, излучающие и приемные антенны (рупоры) 9 и 13, линзы 10 и 12, подстроечные закорачивающие пунжеры 7 и 15, узел обработки сигналов и выдачи их на индикацию и управление 1.

Генерируемые сигналы СВЧ через тройник 3 и вентили 4 и 18 поступают на ответвители 8 и 14, а затем - на рупорные антенны 9 и 13 с линзами 10 и 12. Сигналы, отражаясь от поверхностей измеряемого объекта 11, образуют стоячие волны. Резонаторы отраженных волн настраиваются в резонанс посредством короткозамкнутых пунжеров 7 и 15.

Радиоволновые влагомеры. Методы измерения влажности материалов основаны на поглощении и рассеянии радиоволн молекулами воды в области СВЧ. Информативными параметрами являются амплитуда, фаза и угол поворота плоскости поляризации электромагнитной волны.

Известно, что в области СВЧ имеет место резонансное поглощение. Кроме того, диэлектрическая постоянная воды в указанной области частот меняется от 80 до 20 (рисунок 70), тогда как эта величина для других материалов лежит в пределах 2—9. Это обстоятельство позволяет использовать радиоволновой метод для устройства влагомеров различного назначения.

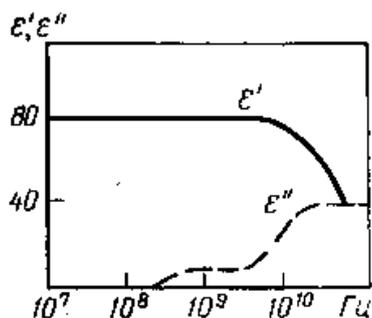


Рисунок 70 - Зависимость диэлектрических проницаемостей воды от частоты

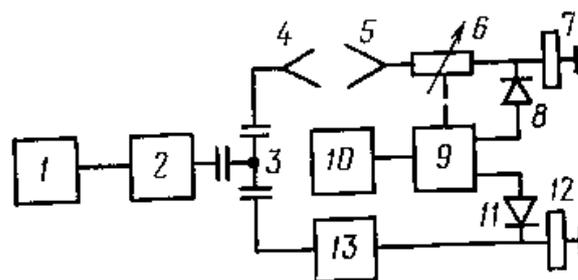


Рисунок 71 - Схема амплитудного влагомера

На рисунке 71 приведена одна из возможных схем радиоволнового влагомера — *амплитудного влагомера*, основанного на ослаблении мощности прошедшего через объект сигнала. В области слабосвязанной влаги коэффициент прохождения сигнала пропорционален содержанию воды. Влагомер включает следующие элементы: клистронный генератор СВЧ 7, вентиль 2, волноводный тройник 3, излучающую 4 и приемную 5 антенны, аттенюатор 6, подстроечные закороченные плунжеры 7 и 12, детекторы 8 и 11, устройство управления аттенюатором 9, устройство индикации 10, усилитель 13.

Схема *амплитудно-фазового влагомера* приведена на рисунке 71.

Этот прибор включает: клистронный генератор 1, переменные аттенюаторы 2, тройник 3, излучающую 4 и приемную 5 антенны, фазовращатель ϕ , устройство согласования нагрузки 6, двойной волноводный тройник 7, индикатор S, усилитель 9 и детектор 10. Прибор работает на принципе сравнения сигнала, прошедшего через влажный объект, и сигнала, прошедшего по волноводному тракту. В волноводном тройнике 7 сигналы сравниваются по амплитуде и фазе. Разностный сигнал после усиления индицируется в устройстве 8.

Радиоволновые дефектоскопы. Эти приборы применяются для контроля трещин, воздушных включений, инородных включений, неоднородностей, дефектов склеивания и др. в диэлектрических материалах.

Радиоволновые дефектоскопы строятся на принципе прохождения или отражения волны, которая несет информацию о толщине слоев и показателя преломления, т.е. о физических параметрах слоев (плотность, пористость, влажность, состав и т.д.). На рисунке 72 в качестве примера приведена схема дефектоскопа с механическим сканированием. Генерируемые СВЧ колебания в генераторе 1 после модуляции низкой частотой 2 через фидерный тракт поступают на излучающую антенну 7. Радиоволна, пройдя через объект S, поступает в соосную приемную антенну 9. После приемной антенны сигнал детектируется в детекторе 10, усиливается в усилителе низкой частоты 11 и индицируется в блоке 12. Механическое сканирование

контролируемого объекта 8 осуществляется автоматом 14. В приборе помимо сканирования осуществляется управление лучом, для этой цели используются сигналы преобразователя 13.

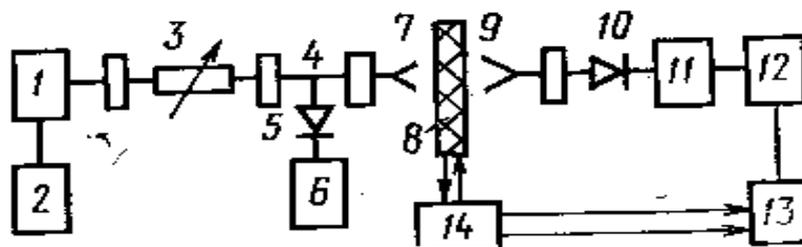


Рисунок 72 - Радиоволновый дефектоскоп

В настоящее время создано большое число радиоволновых дефектоскопов, нашедших широкое применение в промышленности.